SELÇUK UNIVERSITY 4TH INTERNATIONAL TECHNOLOGY AND INNOVATION STUDENT SYMPOSIUM (SUTIS 25)

PROCEEDING BOOK

27-30 NOVEMBER 2025 KONYA

Editörler

PROF. DR. SÜLEYMAN NEŞELİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN TERZİOĞLU

DR. ÖĞR. ÜYESİ SEMA SERVİ

EĞİTİM yayınevi

SELÇUK UNIVERSITY 4TH INTERNATIONAL TECHNOLOGY AND INNOVATION STUDENT SYMPOSIUM 27-30 NOVEMBER 2025 KONYA – PROCEEDING BOOK

Editörler: Prof. Dr. Süleyman Neşeli, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Terzioğlu, Dr. Öğr. Üyesi Sema Servi

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)
Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)
Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam
Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Tasarım Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı
Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-730-1
1. Baskı, Aralık 2025

Kütüphane Kimlik Kartı

SELÇUK UNIVERSITY 4TH INTERNATIONAL TECHNOLOGY AND INNOVATION STUDENT SYMPOSIUM 27-30 NOVEMBER 2025 KONYA – PROCEEDING BOOK

Editörler: Prof. Dr. Süleyman Neşeli, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Terzioğlu, Dr. Öğr. Üyesi Sema Servi
539 s., 210x297 mm
Kaynakça var, dizin yok.
E-ISBN: 978-625-385-730-1

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mekanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42
bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.
P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America
americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
sevkiyat@egitimyayinevi.com

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye
+90 332 499 90 00
bilgi@egitimkitabevi.com

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr
bilgi@kitapmatik.com.tr

EĞİTİM YAYINEVİ GRUBU

HONORARY AND ADVISORY BOARD

- PROF. DR. HÜSEYİN YILMAZ, RECTOR OF SELÇUK UNIVERSITY
- PROF. DR. ŞAKİR TAŞDEMİR, RECTOR OF SİNOP UNIVERSITY

GENERAL CHAIRS

- SÜLEYMAN NEŞELİ, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- HAKAN TERZİOĞLU, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- SEMA SERVİ, SELÇUK UNIVERSITY - TR

VICE CHAIRS

- NURETTİN DOĞAN, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- FATİH ALPASLAN KAZAN, SELÇUK UNIVERSITY- TR
- SELAHATTİN ALAN, SELÇUK UNIVERSITY – TR

ORGANIZING COMMITTEE

- ANGEL SMRİKAROV, ROUSSE UNIVERSITY - BG
- LİLİA GEORGİEVA, HERİOT WATT UNIVERSITY - GB
- POLYXENİ ARAPI, TECHNICAL UNIVERSITY OF GREECE - GR
- FATİH ALPASLAN KAZAN, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- SABRİ BİLGİN, SİNOP UNIVERSITY - TR
- SİLYAN SİBİNOV ARSOV, ROUSSE UNIVERSITY – BG

SCIENTIFIC COMMITTEE

- ABDULLAH CEM AĞAÇAYAK, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- ABDULLAH ERDAL TÜMER, KIRGIZİSTAN TURKİYE MANAS UNIVERSITY - KG
- AHMET AFSİN KULAKSIZ, KONYA TECHNICAL UNIVERSITY - TR
- AHMET YÖNETKEN, AFYON KOCATEPE UNIVERSITY - TR
- ALİNA IVAN DRAMOGİR, GHEORGHE ASACHİTECHNICAL UNIVERSITY OF IASİ - RO
- ALMOATAZ YOUSSEF ABDELAZİZ, AİN SHAMS UNIVERSITY - EG
- AMAR RAMDANE CHERİF, UNIVERSITY OF VERSAİLLES - FR

- ANCA LOANA ANDREESCU, ACADEMY OF ECONOMİC STUDİES - BG
- ALEXANDER SUDNİTSON, TALLİNN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - EE
- ANNE VİLLEMS, UNIVERSITY OF TARTU - EE
- ANTONELLA REİTANO, UNIVERSITY OF CALABRİA - IT
- ANTONİO MENDES, UNİVERSİDADE DE COİMBRA - PT
- ARİSTOMENİS ANTONİADİS, TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE - GR
- ARTAN LUMA, SOUTH EAST EUROPEAN UNIVERSITY - MK
- BİAGİO LENZİTTİ, UNIVERSITY OF PALERMO - IT
- BİNOD KUMAR, JSPM JAYAWANT INSTİTUTE OF COMPUTER APPLİCATİONS PUNE - IN
- BORİS AKANAEV, KAZAK NATİONAL UNIVERSITY - KZ
- DOMENİCO TEGOLO, UNİVERSİTA DEGLİ STUDİ Dİ PALERMO - IT
- EİSHA AKANKSHA, MVJ COLLEGE OF ENGİNEERİNG - IN
- ELİNDA KAJO MECE, POLYTECHNİC UNIVERSITY OF TİRANA - RO
- ENGİN OZDEMİR, KOCAELİ UNIVERSITY – TR
- FATİH ALPASLAN KAZAN, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- GÖKHAN YALÇIN, KONYA TECHNICAL UNIVERSITY - TR
- GABRİEL LUNA SANDOVAL, SONORA STATE UNIVERSITY - MX
- HAMİT SARUHAN, DUZCE UNIVERSITY - TR
- HAMZA BENSOUİLAH, LABORATOİRE DE MECANİQUE ET STRUCTURES - DZ
- HASAN ERDİNÇ KOÇER, SELCUK UNIVERSITY – TR
- HASAN OĞUL, SİNOP UNIVERSITY - TR
- H. HAZEL ARAS, YOZGAT UNIVERSITY - TR
- HOWARD DUNCAN, DUBLİN CİTY UNIVERSITY - IE
- HUMAR KAHRAMANLI ÖRNEK, SELCUK UNIVERSITY – TR
- HUSE FATKİC, UNIVERSITY OF SARAJEVO - BA
- İLKER ALİ ÖZKAN, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- İSMAİL SARITAŞ, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- IVAN JELİNEK, CZECH TECHNICAL UNIVERSITY - CZ
- JAHARAH A GHANİ, NATİONAL UNIVERSITY OF MALAYSİA - MY
- JAN VOM BROCKE, UNIVERSITY OF LİECHTENSTEİN - LI

- JANİS GRUNDSPENKİS, RİGA TECHNICAL UNIVERSITY - LV
- JANUSZ JABLONOWSKİ, WARSAW UNIVERSITY - PL
- JİRİ SRBA, AALBORG UNIVERSITY - DK
- KARL JONES, LİVERPOOL JOHN MOORES UNIVERSITY - GB
- LAURENTİU CRİSTİAN DEACONU, UNIVERSITY OF PİTESTİ - RO
- LEVENT ÖNCEL, SİNOP UNIVERSITY - TR
- M. KEMAL BALKİ, SİNOP UNIVERSITY - TR
- MAHDİ SHAHBAKHTİ, MİCHİGAN TECHNOLOGY UNIVERSITY - US
- MAJİDA ALİ ABED MESHARİ, TİKRİT UNIVERSITY - IQ
- MARCO PORTA, UNIVERSITY OF PAVİA - IT
- MEHMET TURAN DEMİRCİ, SELCUK UNIVERSITY - TR
- MİRJANA IVANOVİC, UNIVERSITY OF NOVİ SAD - RS
- MİROSLAV NESLUSAN, UNIVERSITY OF ZİLİNA - SK
- MUSTAFA ACARER, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- MUSTAFA ALTIN, KONYA TECHNICAL UNIVERSITY - TR
- MUSTAFA CAN CANOĞLU, SİNOP UNIVERSITY - TR
- MUSTAFA KARAKAYA, SİNOP UNIVERSITY - TR
- NATASA HOİC BOZİC, UNIVERSITY OF RİJEKA - HR
- NECAATTİN BARIŞÇI, GAZİ UNIVERSITY - TR
- NİHAT YİLDİRİM, GAZİANTEP UNIVERSITY - TR
- NİKOLAOS BLASİS, TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE - GR
- OLCAY ILICASU, ROWAN UNIVERSITY - USA
- OSMAN AYHAN ERDEM, GAZİ UNIVERSITY - TR
- PANTHA GHOSAL, UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SYDNEY - AU
- PİNO CABALLERO GİL, UNIVERSITY OF LA LAGUNA - ES
- POLYXENİ ARAPİ, TECHNICAL UNIVERSITY OF GREECE - GR
- RECAİ KUŞ, SELÇUK UNIVERSITY - TR
- RİTA ISMAİLOVA, KYRGYZ TURKİSH MANAS UNIVERSITY - KG
- SALİH DAĞLI, SİNOP UNIVERSITY - TR
- SEMET CELİK, ATATURK UNIVERSITY - TR
- SİLYAN SİBİNOV ARSOV, ROUSSE UNIVERSITY - BG

- SPİRİDON CRETU, GHEORGHE ASACHİTECHNICAL UNIVERSITY OF IASİ - RO
- STAVROS CHRİSTODOULAKİS, TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE - GR
- STAVROS NİKOLOPOULOS, UNIVERSITY OF IOANNİNA - GR
- TATJANA DULİNSKİENE, KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - LT
- TAYFUN FİNDİK, GAZİ UNIVERSITY - TR
- TEMEL KAYİKCİOGLU, KARADENİZ TECHNICAL UNIVERSITY - TR
- TUBA GÖKHAN, MOHAMED BİN ZAYED UNIVERSITY OF ARTİFİCİAL INTELLİGENCE - UAE
- THOMAS ENGEL, UNIVERSITY OF LUXEMBOURG - LU
- TUGCE DEMİRDELEN, ADANA SCİENCE TECHNOLOGY UNIVERSITY - TR
- ULKU SULTAN KESKİN, KONYA TECHNICAL UNIVERSITY - TR
- ULVİ SEKER, GAZİ UNIVERSITY - TR
- YURİ PAVLOV, BULGARİAN ACADEMY OF SCİENCES - BG
- ZARİFA JABRAYİLOVA, INSTİTUTE OF INFORMATİON TECHNOLOGY ANAS - AZ

ORGANIZING COMMITTEE

- YUSUF ERYESIL, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- H. HAZEL ARAS, YOZGAT UNIVERSITY - TR
- NAMIK KEMAL YALÇIN, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- AHMET FARUK YORULMAZ, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- AHMET DÜZEL, SİNOP UNIVERSITY – TR
- SEMA DERSINLIOGLU, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- HAYRUNNİSA BAGCI, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- YUSUF NURDOĞDU, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- MURAT KAPUSUZ, SİNOP UNIVERSITY - TR
- SEVİM SUDE BAL, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- RUMEYSA BAY, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- ABDULLAH YAPICIOGLU, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- SADIK BİLAL ŞAN, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- HACER SERBEST, SELÇUK UNIVERSITY – TR

- SÜLEYMAN YILDIZ, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- ELİFNUR TAYANÇ, SELÇUK UNIVERSITY – TR
- OĞUZ KAĞAN ÜLKÜ, SELÇUK UNIVERSITY – TR

Evrak Tarih ve Sayısı: 11.11.2025-E.1122974

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Personel Daire Başkanlığı

2025 AİLE YILI

Sayı : E-97391123-900-1122974 11.11.2025
Konu : SUTIS 25 Sempozyum Görevlendirilmesi

TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ DEKANLIĞINA

İlgi : 05.11.2025 tarihli ve E-18398983-051-1122065 sayılı yazınız.

Üniversitemiz ile Sinop Üniversitesi tarafından 27-30 Kasım 2025 tarihleri arasında gerçekleştirilecek olan "Selçuk University 4th International Technology and Innovation Student Symposium (SUTIS 25)" isimli sempozyumda, Fakülteniz Öğretim Üyeleri Prof.Dr.Süleyman NEŞELİ, Dr.Öğr.Üyesi Sema SERVİ ve Dr.Öğr.Üyesi Hakan TERZİOĞLU'nun, akademisyen temsilcisi olarak görevlendirilmeleri uygun görülmüştür.

Gereğini rica ederim.

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ
Rektör

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Belge Doğrulama Kodu :*BSD77YRZAZ* Pin Kodu :46013 Belge Takip Adresi : https://www.turkiye.gov.tr/selcuk-universitesi-ebys

Adres : Akademi Mahallesi Yeni İstanbul Caddesi No:369/1 P.K:42130 Selçuklu-KONYA
Telefon : 0332 223 84 07 Faks : 0332 223 80 33
e-Posta:personel@selcuk.edu.tr Web:http://www.personel.selcuk.edu.tr/
Kep Adresi : selcukuniversitesi@hs01.kep.tr

Bilgi için : Mehmet İLDIRIM
Ünvanı : Teknisyen
Tel No : 03322238042

TABLE OF CONTENTS

SMART PLANT IRRIGATION SYSTEM 1

REGULATION-BASED CHATBOT SYSTEMS: A REVIEW ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE-SUPPORTED RELIABLE INFORMATION ACCESS FOR PUBLIC AND HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS..... 6

DEEP LEARNİNG-BASED ANALYSİS AND RECOMMENDATİON SYSTEM FOR MULTİ CHANNEL PERFUME REVİEWS 17

COMPARATİVE STUDY ON KAGGLE DRONE - DETECTİON..... 26

RAINFALL PREDİCTİON USİNG NASA EARTH OBSERVATİON DATA AND ENSEMBLE LEARNİNG..... 37

AN EXAMINATION OF BIG DATA PRIVACY AND SECURITY APPROACHES..... 59

ETHİCAL ISSUES IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS AND RESPONSIBLE AI APPROACHES : A CONCEPTUAL REVIEW..... 66

ANALYSIS OF EMBEDDED IOT SYSTEMS FOCUSED ON ULTRA-LOW POWER CONSUMPTION: A CRITICAL REVIEW OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ARCHITECTURAL OPTIMIZATION IN ENERGY MANAGEMENT..... 71

PREDİCTİVE MAINTENANCE IN INDUSTRY 78

ISI DEĞIŞTIRICILERDE TERMODINAMIK ANALIZ..... 89

SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN ARAÇLARDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERİN YAPAY ZEKÂ KULLANILARAK İŞLENME VE FİLTRELEME YÖNTEMLERİ..... 99

HİPERSONİK FÜZE SİSTEMLERİ VE KARŞI ÖNLEMLER..... 113

AKIM-GERİLİM OKUYAN DEVRE KARTI..... 125

USE OF BLOCKCHAİN TECHNOLOGY İN DATA SECURİTY AND AUTHENTİCATİON 137

A COMPREHENSIVE REVIEW OF THE HARRIS HAWKS OPTIMIZATION ALGORITHM: STRUCTURE, APPLICATIONS AND ETHICAL PERSPECTIVES..... 153

FROM TEXT TO SCENT: A NATURAL LANGUAGE PROCESSİNG APPROACH TO PERFUME RECOMMENDATİON..... 171

RECYCLING OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES..... 180

RADAR, GÖRÜNTÜ İŞLEME VE SENSÖR FÜZYONU YÖNTEMLERİNİN HAVA HEDEFİ TESPİTİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ..... 194

GÜNEŞ PANELI VERI TAKIBI VE KONTROL SISTEMI 202

PID CONTROLLED SİNGLE-AXİS ANGULAR STABİLİZATİON SYSTEM 218

OTOMATİK PARK ÖZELLİKLİ ARAÇ 224

0-50V 0-10A AYARLANABILIR GÜÇ KAYNAĞI TASARIMI 234

PWM-BASED SPEED CONTROL OF 24V/200-240W BRUSHED DC MOTOR: ARDUINO–HALL FEEDBACK AND LCD SPEED DISPLAY... 241

HİDROJENLİ ARABALARDA SENSÖR TABANLI ARAÇ KONTROL KARTI..... 247

TL494 TABANLI PWM KONTROLLÜ BUCK CONVERTER TASARIMI 259

DC-DC STEP-DOWN (BUCK) CONVERTER CIRCUIT DESIGN 266

13S LİTYUM-İYON BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ DONANIM VE YAZILIM TASARIMI 273

DC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI..... 280

KABOSUZ GÜÇ AKTARIM PROJESI..... 287

ESP32 TABANLI DC MOTOR HIZ KONTROL VE İZLEME SİSTEMİ ... 295

MOBIL UYGULAMA KONTROLLÜ, AKILLI, KEDI BESLEME SISTEMI 302

AGV (OTONOM GÜDÜMLÜ ARAÇ)..... 312

ESP32 İLE MOBİL UYGULAMA ÜSTÜNDEN ADIM MOTURU SÜRMEK, ADIM MOTOR SÜRÜCÜSÜ TASARLAMAK..... 317

IOT CLOUD TABANLI SMARTLED DRİVER 343

RÜZGAR TÜRBİNİ ENERJİ İZLEME KONTROL SİSTEMİ..... 358

UZAKTAN KONUM KONTROLLÜ LİNEER AKTÜATÖR SİSTEMİ..... 371

AKILLI BİNA SİSTEMLERİ İÇİN OTONOM VE MANUEL PANJUR YAPIMI 379

13S LİTYUM - İYON BATARYALAR İÇİN MİKRODENETLEYİCİ TABANLI KORUMA SİSTEMİ TASARIMI 386

DC-DC BUCK CONVERTER DEVRESİ 397

36-54V GİRİŞ ARALIĞINDA SABİT 36V 10A ÇIKIŞ VEREN SENKRON BUCK-BOOST KONVERTÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU 404

ELEKTROMANYETİK SİLAH PROJESİ 409

AKILLI ROBOT SÜPÜRGE 414

EXPLAİNABİLİTY İN DEEP LEARNİNG MODELS: EXPLAİNABLE AI (XAI) TECHNİQUES AND APPLİCATİONS 422

ARDUİNO TABANLI DATALOGGER TASARIMI 431

THYROİD DİSEASE CLASSİFİCATİON WİTH MACHİNE LEARNİNG 447

IOT TABANLI AKILLI SULAMA SİSTEMİ TASARIMI 460

DEVELOPMENT OF AN INTELLİGENT DATA GENERATOR AND AI-BASED ANALYSİS TOOL SİMULATİNG ALZHEİMER'S DİSEASE LANGUAGE IMPAİRMENTS İN TURKİSH TEXTS 465

ALGORİTHMİC TRADİNG SYSTEMS AND STOCK MARKET ROBOTS: HİSTORİCAL DEVELOPMENT, MECHANİSMS, TYPES, RİSKS, AND FUTURE PERSPECTİVES 470

FEATURE SELECTİON METHODS İN MACHİNE LEARNİNG AND COMPARATİVE ANALYSİS 474

TECHNIQUES USED IN COMMUNICATION IN AUTONOMOUS SWARM SYSTEMS 479

WHEN HYBRID IS NOT BETTER: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MFCC-BASED CNN, LSTM, AND CNN-LSTM ARCHITECTURES FOR ENVIRONMENTAL SOUND CLASSIFICATION 485

ARTİFİCİAL INTELLİGENCE İN HEALTHCARE: AN ANALYSİS OF APPLİCATİONS, ADVANTAGES, AND CORE LİMİTATİONS 492

THE INDUSTRİALİZATİON OF DİGİTAL EXTORTİON: AN ANALYSİS OF RANSOMWARE-AS-A-SERVİCE, SHİFTİNG ATTACK VECTORS, AND NATİONAL RESİLİENCE STRATEGİES İN TÜRKİYE 500

DEVELOPMENT OF A REAL-WORLD PLANT LEAF IMAGE DATASET AND DEEP LEARNİNG-BASED DİSEASE DETECTİON MODEL FOR SUSTAİNABLE AGRİCULTURE 507

THE PAST, PRESENT, AND FUTURE OF RADAR AND ELECTRONİC WARFARE TECHNOLOGY..... 520

SMART PLANT IRRIGATION SYSTEM

Neslişah IŞIKDAĞ1*

[1] *Department of Electrical and Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

neslisah_isikdag@hotmail.com

Abstract - This study aims to meet the water needs of plants in home environments using an IoT-based smart irrigation system. The developed system performs irrigation at the lowest possible cost. Water consumption varies depending on the plant's needs. Temperature and humidity values in the plant's soil can be continuously monitored. Irrigation can be performed via internet communication based on the monitored values. When the humidity level falls below the reference values, the system automatically irrigates to maintain the soil moisture at an optimal level. For this purpose, a system has been designed that includes software and hardware to control the entire system via the internet.

Keywords: Internet of Things, Smart Irrigation, NodeMCU

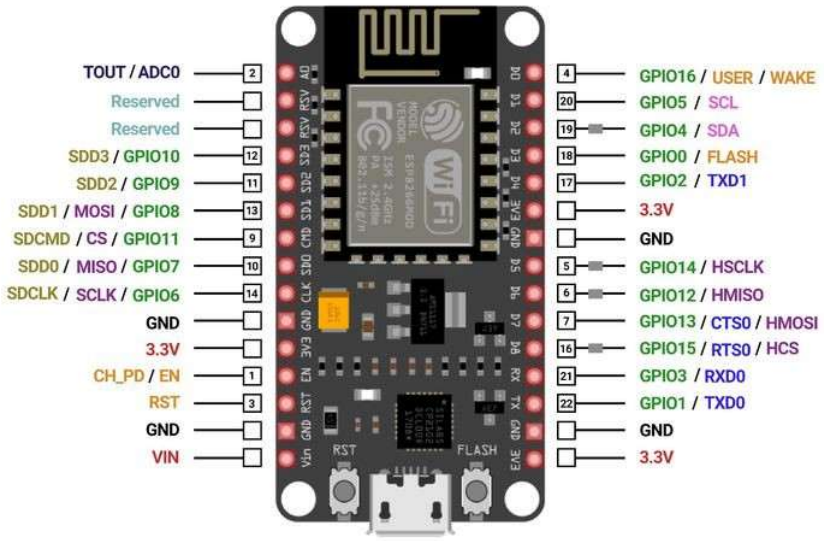
GİRİŞ

Modern hayatın getirileri olan zamansızlık ve unutkanlık ev tipi bitkilerin ihtiyaçlarının gözardı edilmesine neden olmaktadır. Su her canlı için en önemli temel maddedir.Bitkiler için de sulama ve sulama oranı da hayati önem taşır. Bu sorunlara çözüm olması amacıyla internet üzerinden sulama kontrollü bir çalışma yürütülmüştür.

Kullanımı kolay olan internet tabanlı sistemler günümüzde oldukça yaygındır. IoT, nesnelerin fiziksel veya fiziksel olmayan bir şekilde daha büyük sistemler oluşturmak amacıyla birbirine bağlı olduğu iletişim ağına verilen isimdir. Akıllı sulama sistemleri; bitkiye doğru zamanda yeterli miktarda su verilmesi için geliştirilmiş akıllı vana, sensör kontrolü ile arazi ve bitki durumu ölçümlerini karşılaştırarak sulama çözümü sunan sistemlerdir[1]. Bitki yetiştiricileri özellikle sulama zamanının belirlenememesinden ötürü aşırı sulama yapabilmektedirler. Aşırı sulama sonrası sulamayla birlikte eklenen gübre miktarı da artmaktadır. Her eklenen gübreyle beraber topraktan yeraltına akan yeraltı suları yüksek tuz konsantrasyonuna sahip olarak yeraltı sularını kirletir. Sonuç olarak sürdürülebilir bir tarım için düşük maliyetli ve yüksek doğruluk yüzdesine sahip toprak nem sensörlerinin geliştirilmesi ve bu sensörlerin kullanımları ile ilgili çiftçilerin bilgilendirilmesi son derece önem arz etmektedir[2]. Aşırı sulamanın yanı sıra yetersiz sulamada bitkilere zarar vermektedir .Kırnak , yetersiz sulama sorununun kontrollü sulama ile çözülebileceğini savunarak toprak nemini ölçmek için bilgisayar kontrollü otomatik damlama ve sulama sistemi sunmuştur.[3] .Topraktaki nem içeriğini bitkinin ihtiyaç duyduğu seviyede muhafaza etmek ürün kayıplarının önlenmesi ve üretimin sürekliliğinin sağlanması açısından çok önemlidir. Nem içeriğinin korunması ise sürekli izleme ile mümkün olmaktadır. [4]. Bu çalışmada NodeMCU ESP8266 mikroişlemcisi kullanılmıştır ve başka bir çalışmanın yürütücüleri tarafından "NodeMCU madeni paradan biraz büyük bir elektronik düğümdür. Açık kaynak kodlu ve ucuzdur. Alçak gerilim enerjisiyle çalışmaktadır."[5] şeklinde NodeMCU hakkında bilgiler verilmiştir. Ev tipi bitkiler için tasarlanan projenin bir büyüğü tarım alanlarında kullanılan otomatik sulama sistemleridir. Ev tipi sulamada karşılaşılan fazla sulama veya az sulama vb sorunların fazlasına tarım arazilerinde karşılaşılmaktadır. Tarım alanlarındaki tatlı su tüketimi dünyada %76'lık bir yer tutmaktadır. Tarım alanında küresel su talebinin 2050 yılına kadar %35 artması beklenmektedir. Küresel su krizinin önüne geçilebilmesi için tarıma yönelik su kaynaklarının verimli kullanılması çok önemlidir. Tarımsal su kullanımı uygulamalarında, aşırı, gereksiz, hatta zararlı su tüketimini azaltmak için yeni sulama teknolojilerinin kullanılması kaçınılmazdır[6].

MATERYAL VE METOD

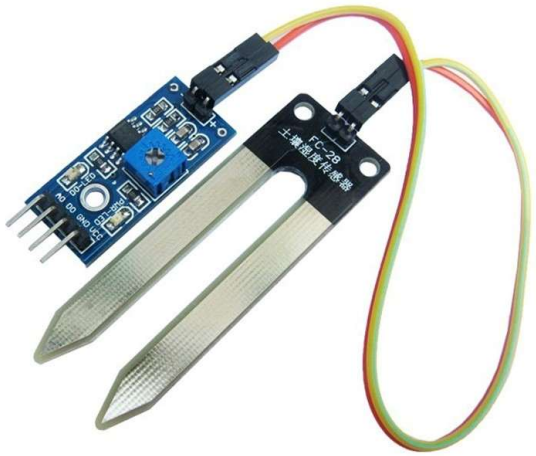
Projede kullanılacak olan mikroişlemci NodeMCU ESP8266 topraktan elde edilecek nem ve sıcaklık değerlerini yönetmek , rölenin durumunu belirlemek ,rezervuardaki sıvı seviyesini kontrol etmek ve internet üzerine aktarmak için kullanılacaktır. ESP8266 birden fazla pine sahiptir. Programlama dili olarak NodeMCU ESP8266 Arduino dilleriyle uyumlu olduğundan Arduino IDE kullanılacaktır.NodeMCU ESP8266 'nın bacaklarının görünümü şekil 1 de verilmiştir.



Şekil-1 NodeMCU ESP8266 ayak yapısı

Topraktan alınan verileri mikroişlemciye ileten sensörler kapasitif nem sensörü ve su geçirmez sıcaklık sensörü DS18B20 'dir. DS18B20 sensörü uygun maliyetli ve yüksek kaliteli sıcaklık sensörüdür. -55°C ile +125°C değerleri arasında ölçüm yapmaktadır. DS18B20'nin su geçirmez paslanmaz çelik kılıf özelliği vardır.Şekil-2 de DS18B20 sensörü gösterilmektedir. Şekil-3 te ise kapasitif nem sensörü gösterilmektedir.

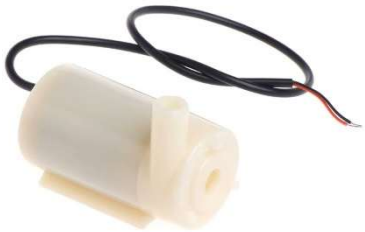
Şekil-2 DS18B20



Şekil-3 Kapasitif Nem Sensörü

Mikroişlemciden çıkan veriye göre röle mini dalgıç su pompasını kontrol edecektir. Röle olarak 1 kanal 5V hazır röle kartı kullanılmıştır. Şekil-4 te röle şekil-5 'te mini dalgıç su pompası görseldedir.

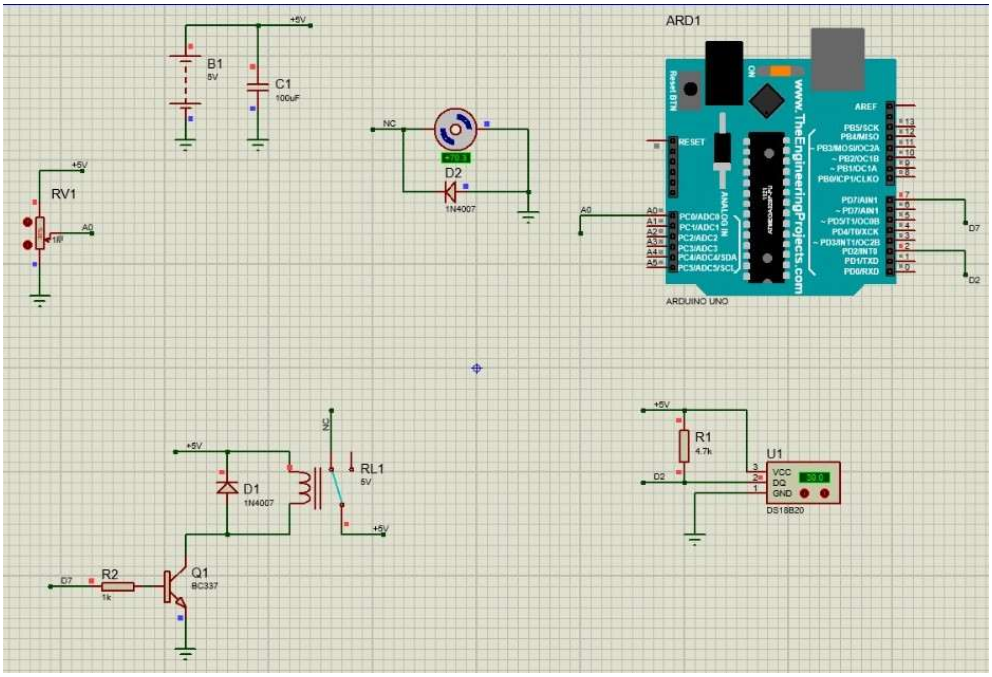
Şekil-4 1 Kanal 5V Röle Kartı



Şekil -5 Mini Dalgıç Su Pompası

Projenin şematik çiziminde simülasyonu sağlayabilmek adına NodeMCU ESP8266 yerine ARDUINO UNO mikroişlemcisi kullanılmıştır. Hazır röle kartını Q1 transistörü, D1 diyotu ve RL1 rölesi simgelemiştir. Nem sensörü potansiyometre ile simgelenmiştir. Çizimdeki DC motor su pompasını temsil etmektedir. Potansiyometrenin değeri azaldığında topraktaki nem miktarı az anlamına gelmektedir, topraktaki nem azaldığında DC motor hızlı dönecek , potansiyometredeki değer arttığında topraktaki nemin fazla olduğunu simüle edebilmek için DC motor çok yavaş şekilde dönmektedir. Aşağıda tablo-1 de bu değerler belirtilmiştir.

Şekil-6 Simülasyon Çizimi

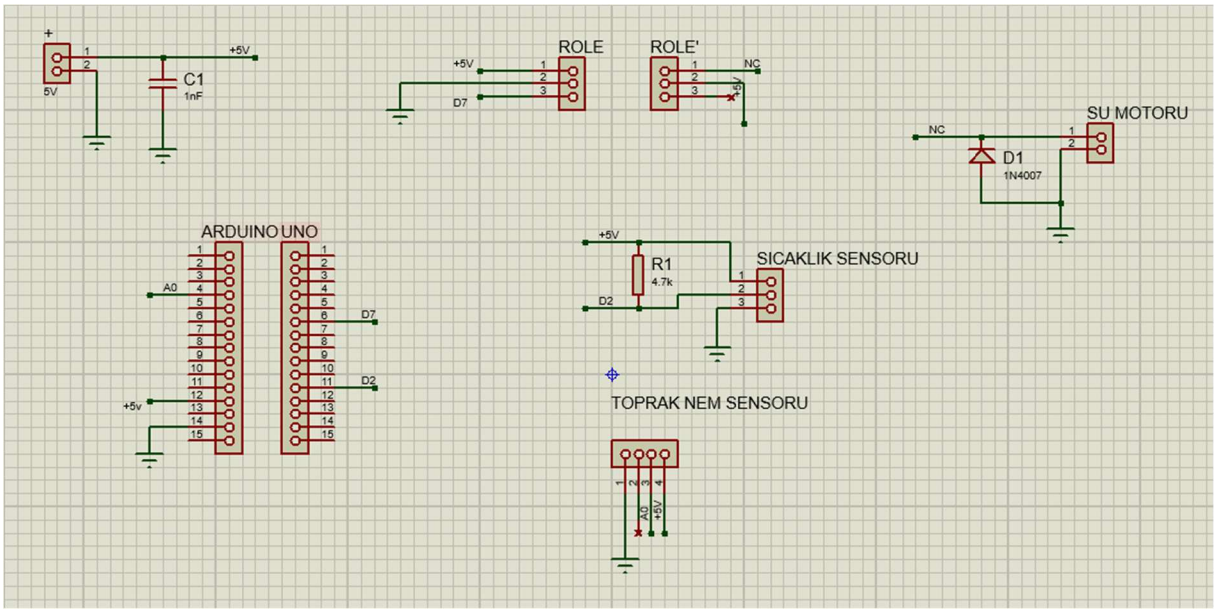


Tablo-1

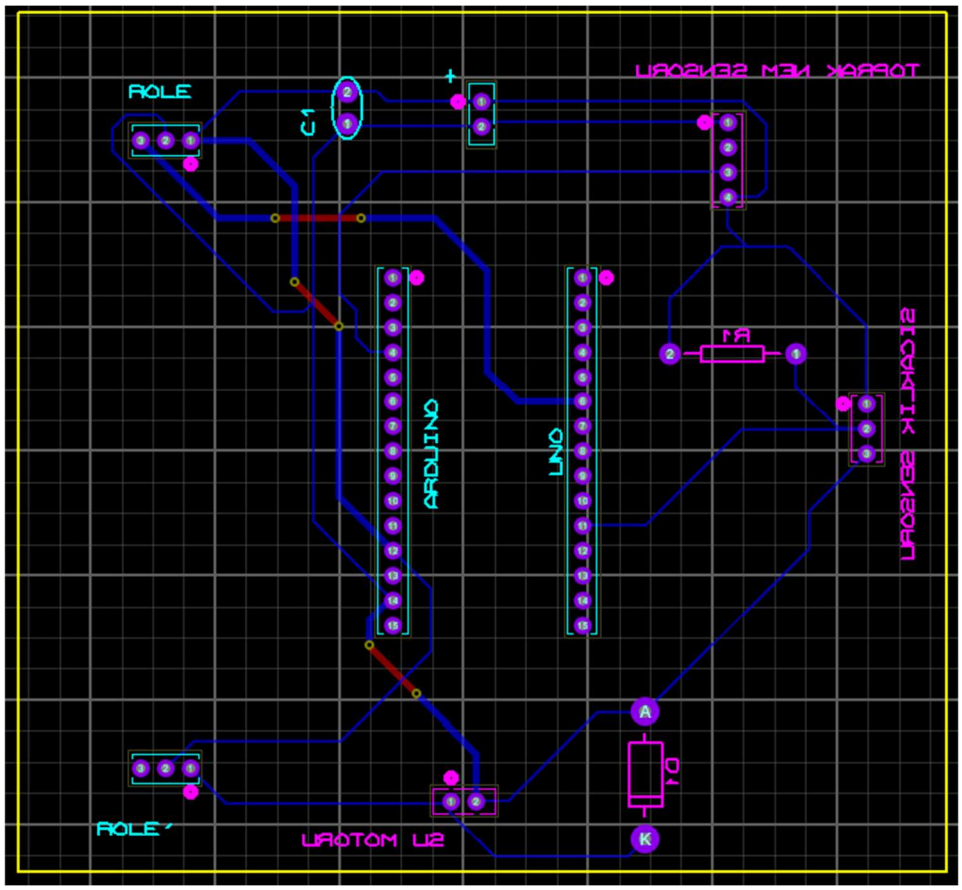
Pot Değeri	DC Motor Dönüş Hızı (rpm)
%83	+37.1

%100	*+0.08*
%30	*+178*
%0	*+205*

Projenin şematik çiziminde iki çizim tasarlanmıştır. Birinci çizim simülasyonu sağlamak adına ikinci çizim ise PCB çizimiyle beraber gerçek hayata uyumlu olması adına tasarlanmıştır. Projenin bitmiş halinde nem sensörü ,sıcaklık sensörü ve su pompası bitkinin toprağının içinde olacağı için PCB çiziminde bu elemanların yerinde klemensler bulunmaktadır. Sıcaklık sensörüne bağlı R1 pulll-up
direnci çizimde görülmektedir. Devrenin beslemesi 5V 1.5A adaptor ile sağlanacaktır .



Şekil-7 Şematik2



Şekil-8 PCB Çizimi

SONUÇ

Bu makalede ev tipi bitkiler için akıllı sulama anlatılmıştır. Akıllı sulamanın sadece unutkanlık veya zamansızlığa değil su kaynaklarını korumaya da çözüm olduğundan bahsedilmiştir. Su kaynaklarının tükenme riskiyle karşı karşıya olduğu ve tarımdaki kontrolsüz sulama sorunları makalenin giriş bölümünde verilmiştir. Günümüzde tarım sektöründe modern uygulamalar gün geçtikçe ilerlemektedir. Modern teknolojilerden yararlanıldığında süreçler çok daha hızlı, daha doğru ve daha verimli hale gelmiştir. Bu ilerlemelerle birlikte modern sulamanın evlerimizin içinde olması yadsınamazdır.

Projede tasarlanan arayüz kullanıcı dostudur , kullanım kolaylığı sayesinde sulama işleminin başlatılması gayet kolaydır. Bu makalede bahsedilen projenin ev tipi bitkiler için tasarlandığı söylenmiştir ancak projenin geliştirilmesiyle birlikte başta küçük bahçelerde daha sonrada tarla ve seralarda kullanımı mümkün olacaktır.

REFERANSLAR

[1] Şahin, H. (2024). Tarımsal Akıllı Sulama Sistemlerinde Yapay Zekâ, Derin Öğrenme ve Nesnelerin İnterneti Uygulamaları. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 20(1), 41-60.

[2] Karaca C., Tekelioğlu B., Büyüktaş D. (2017). Sürdürülebilir Tarımsal Üretim için Toprak Nem Sensörlerinin Etkin Kullanımı. Academia Journal of Engineering and Applied Sciences, 2(3), 33-41.

[3] Kırnak,H., Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Nursery Crops.GAP V. Engineering Congress,Harran UNIVERSITY.Engineering Department, 26-28 April,Şanlıurfa,2006,1540-1547.

[4] Kızıl, Ü., Aksu, S., & Çamoğlu, G. (2018). Kontrollü Ortamda Bitkisel Yetiştiricilik için Arduino Uyumlu Bir Toprak Nemi İzleme Sistemi Tasarımı. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 6(2), 131-139.

[5] Yenikaya, M. A., Güvenoğlu, E., & Kondakcı, S. (2022). Nesnelerin İnterneti (IoT) Tabanlı Akıllı Sulama ve Gübreleme Sistemi. Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 15(1), 14-23.

[6] Şahin, H. (2024). Tarımsal Akıllı Sulama Sistemlerinde Yapay Zekâ, Derin Öğrenme ve Nesnelerin İnterneti Uygulamaları. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 20(1), 41-60.

REGULATION-BASED CHATBOT SYSTEMS: A REVIEW ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE-SUPPORTED RELIABLE INFORMATION ACCESS FOR PUBLIC AND HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

[1]Fikrethan CANKURTARAN1, [2]Havva Hazel ARAS

[1]*Department of Computer Programming, Bozok UNIVERSITY Vocational School of Computer Technology, Merkez, Yozgat*

[2]*Department of Computer Programming, Bozok UNIVERSITY Vocational School of Computer Technology, Merkez, Yozgat*

Abstract - This review article examines chatbot systems implemented in public institutions, private organizations, and especially higher education institutions such as universities, aiming to facilitate the understanding of complex regulations and administrative documents. With the rise of Artificial Intelligence (AI) and Natural Language Processing (NLP) technologies, chatbots have fundamentally changed the nature of human-computer interaction. These systems offer the potential to reduce the repetitive workload on administrative staff and use resources efficiently by answering frequently asked questions (FAQs). However, regulation-based applications require much stricter accuracy and reliability standards than general-purpose chatbots (open-domain chatbots). For example, providing an incorrect answer about a UNIVERSITY exam regulation could negatively impact a student's academic career and lead to serious legal issues for the UNIVERSITY. Therefore, these systems must typically rely on closed-domain knowledge bases. This study discusses both the limitations of traditional rule-based (AIML, pattern matching) approaches and the text representation and semantic matching capabilities of modern deep learning models such as BERT and Sentence-BERT (SBERT). Specifically, it focuses on how generative AI models (GPT) can be safely used for legal texts, namely through API integration with Campus Management Systems (CMS) and a controlled AI architecture (RAG philosophy) based on the use of vectorized (embedded) legislation documents. Finally, ethical and TECHNICAL challenges such as transparency, data privacy (GDPR), and context understanding are addressed, and recommendations are made for future research.

Keywords - Chatbot, UNIVERSITY Administration, AI, NLP, API Integration, Campus Management System

GİRİŞ

Yapay Zekâ (YZ) alanındaki hızlı gelişmeler, özellikle Doğal Dil İşleme (NLP) teknolojilerinde yaşanan ilerlemelerle birlikte, chatbotların popülaritesini artırmıştır (Huang, 2201). Chatbotlar, ilk örnekleri olan ELIZA (Weizenbaum, 1966) ve PARRY'den (Colby et al., 1971) bu yana, kullanıcılarla metin veya ses yoluyla doğal bir konuşmayı taklit eden bilgisayar programları olarak tanımlanmaktadır (Thorat & Jadhav, 2020; Setiaji & Wibowo, 2016). Günümüzde, bu sistemler eğlence (Deryugina, 2010), sağlık (Fitzpatrick et al., 2017), müşteri hizmetleri (Gnewuch et al., 2017) ve eğitim (Okonkwo & Ade-Ibijola, 2021) dahil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

Kamu kurumları, üniversiteler ve büyük şirketler gibi organizasyonlar, devasa ve karmaşık yönetmelik, kılavuz ve idari belgeleri yönetmek zorundadır. Bu belgeler, genellikle teknik bir dil içerir ve sıradan kullanıcılar (öğrenciler veya vatandaşlar) için anlaşılması zor olabilir (Pérez Solà & Cristina, 2021; Liu & Chen, 2021). Bu karmaşıklık, idari birimlere sürekli tekrarlayan soruların gelmesine neden olur. Örneğin, bir üniversitede öğrenciler, ders kayıt prosedürleri, sınav erteleme şartları veya harç bilgileri gibi konularda yüzlerce kez aynı soruları sorabilir (Abu-Rasheed et al., 2019; Ranoliya et al., 2017).

Bu bağlamda, mevzuat tabanlı chatbotlar, bu tekrarlayan görevleri otomatikleştirerek idari personeli bu yükten kurtarmayı amaçlayan ideal bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, bir finansal chatbotun kullanıcıya yanlış bir yatırım tavsiyesi vermesi gibi, mevzuat tabanlı bir chatbotun da kurumun resmi kurallarıyla çelişen bir yanıt vermesi kabul edilemez. Bieletzke (2023) tarafından yapılan analizde, bir üniversite chatbotunun yanlış yanıtlaması

halinde soruların yaklaşık yarısının üniversite için hukuki sorunlara yol açabileceği bulunmuştur. Örneğin, chatbotun sınav yönetmeliğine aykırı olarak ödev süresi hakkında yanlış bilgi vermesi, öğrencinin şikayetine neden olabilir.

Mevzuat tabanlı chatbotları genel amaçlı, açık alanlı (open-domain) modellerden (Meena, Blender gibi) (Adiwardana et al., 2020; Roller et al., 2020) ayırmaktadır. Mevzuat tabanlı chatbotlar, bilgiyi kontrol edilebilir ve güvenilir kılmak zorundadır. Bu zorunluluk, sistem mimarisinin NLP ve Bilgi Erişimi (IR) tekniklerini kullanarak, kesinlikle onaylanmış veri setleri dışına çıkmamasını sağlamayı gerektirir (Bieletzke, 2023).

Bu derleme, belirlenen yedi temel soruyu yanıtlayarak, mevzuat tabanlı chatbot sistemlerinin teknolojik altyapısını, etik yükümlülüklerini ve gelecekteki geliştirme yönlerini kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamaktadır.

1. Yönetmelik veya Mevzuat Tabanlı Chatbot Nedir? Hangi Amaçlarla Geliştirilir?

Yönetmelik veya Mevzuat Tabanlı Chatbot Tanımı

Chatbotlar, Yapay Zekâ'nın bir alt dalı olan NLP yeteneklerini kullanarak, insan konuşmasını taklit eden ve kullanıcılarla sanal olarak etkileşim kuran yazılım programlarıdır (Shawar & Atwell, 2007; Huang, 2021). Mevzuat tabanlı chatbotlar, bilgi alanları belirli ve kapalı (closed-domain) olan chatbot kategorisine girer (Lokman & Ameedeen, 2019; Hasal et al., 2021). Bu tür bir chatbotun bilgi birikimi (Knowledge Base), tek bir organizasyona (üniversite, banka, kamu kurumu) veya belirli bir konuya (örneğin sadece sınav yönetmelikleri veya yasal sözleşme taslakları) ait resmi ve hukuki metinlerle sınırlıdır.

Bu sistemler, açık alanlı chatbotların (geniş bir yelpazede sohbet edebilen sistemler) aksine, önceden tanımlanmış bir görev veya bilgi setine odaklanmıştır (Toxtli et al., 2018; Hien et al., 2018). Bu sınırlama, mevzuat gibi kesinlik gerektiren alanlarda, kontrol edilebilir ve doğrulanabilir yanıtlar üretmenin ön koşuludur (Bieletzke, 2023).

Geliştirilme Amaçları

Mevzuat tabanlı chatbotlar, genellikle aşağıdaki temel amaçlar doğrultusunda geliştirilir:

• **Rutin İdari Görevlerin Otomasyonu:** Üniversitelerde veya kamu kurumlarında idari personelin sürekli olarak aynı sorulara yanıt verme yükünü azaltmak, böylece kaynakların daha karmaşık görevlere yönlendirilmesini sağlamak (Abu-Rasheed et al., 2019; Hien et al., 2018; Sinha et al., 2020). Bu, hizmetin 7/24 kesintisiz sunulmasını da sağlar (Thorat & Jadhav, 2020; Rukhiran & Netinant, 2022).

• **Karmaşık Belgelerin Anlaşılmasının Kolaylaştırılması:** Hukuki metinler, genellikle yoğun ve teknik dil içerdiğinden, kullanıcıların (öğrencilerin veya vatandaşların) bu belgelerdeki karmaşık prosedürleri veya hükümleri kolayca anlamasına yardımcı olmak (Ranoliya et al., 2017; Pérez Solà & Cristina, 2021). Chatbot, yasal kavramları açıklayabilir ve kılavuzluk edebilir (Imogen, 2024).

• **Bilgi Güvenilirliği ve Tutarlılığı:** Tüm kullanıcılara, kişisel yorum veya güncel olmayan bilgiler yerine, tek ve tutarlı resmi bir bilgi kaynağına dayalı yanıtlar sağlamak.

• **Geri Dönüş Süresini Azaltma (Latency):** Anlık mesajlaşma araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte, kullanıcılar hızlı yanıt beklemektedir (Lokman & Ameedeen, 2019). Chatbotlar, telefon veya e-posta yoluyla beklenen uzun yanıt sürelerini ortadan kaldırır (Rukhiran & Netinant, 2022).

2. Bu Sistemlerde Doğal Dil İşleme (NLP) ve Bilgi Erişimi (IR) Teknikleri Nasıl Kullanılır?

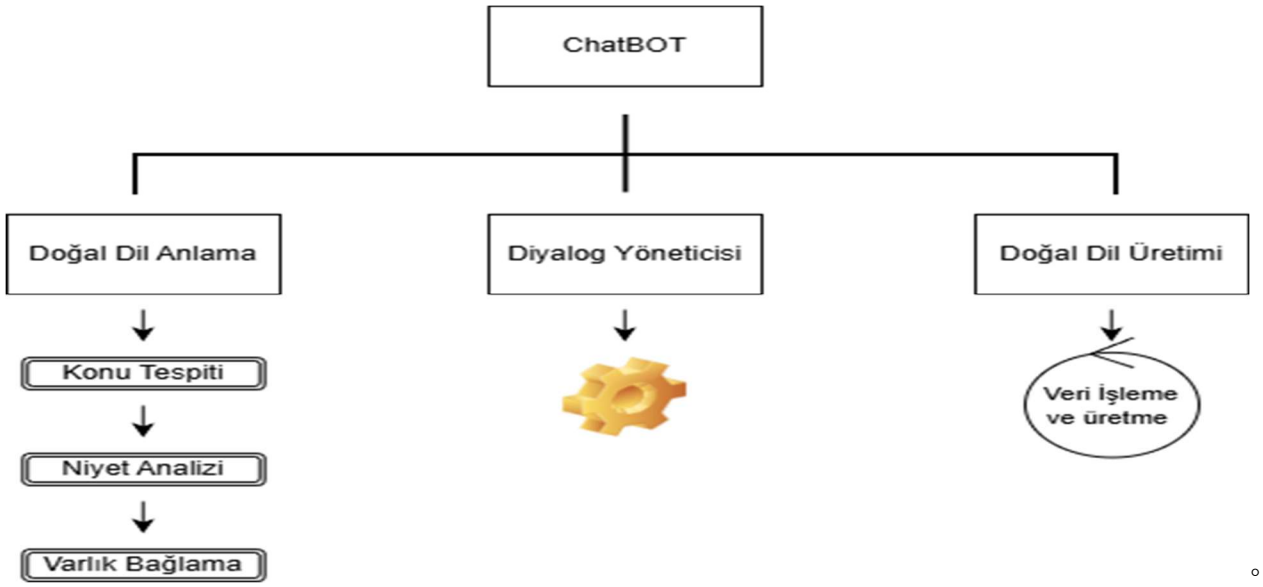
Mevzuat tabanlı bir chatbotun başarılı olması için, kullanıcının doğal dilde ifade ettiği karmaşık soruyu doğru bir şekilde ayrıştırması ve bu soruyu kurumun hukuki metinleriyle eşleştirmesi gerekir. Bu süreç, NLP ve Bilgi Erişimi (IR) tekniklerinin entegrasyonuyla sağlanır.

Doğal Dil İşleme (NLP) Kullanımı

Chatbot mimarisi üç ana NLP bileşeninden oluşur: Doğal Dil Anlama (NLU), Diyalog Yöneticisi (DM) ve Doğal Dil Üretimi (NLG) (Mohammed & Aref, n.d.; Kocaleva et al., 2016; Rukhiran & Netinant, 2022).

1. **Doğal Dil Anlama (NLU):** Bu, kullanıcının girdisinin "anlamını" çıkarmaktan sorumludur (Mohammed & Aref, n.d.; Jurafsky & Martin, 2020). Mevzuat bağlamında NLU'nun iki ana görevi vardır:

◦ **Niyet Sınıflandırması (Intent Classification):** Kullanıcının cümlenin genel amacını belirlemek (örneğin, "Sınav tekrar hakkı sorma" veya "Ders kayıt tarihi sorgulama"). Niyet tanındığında, chatbot uygun yanıt stratejisini belirler (Tur & Deng, 2011).



(Şekil 1: ChatBOT yapım mimarisi)

Varlık Tanıma ve Bağlantılama (Entity Linking/NER): Sorudaki önemli terimleri, isimleri ve kavramları (örneğin "Yüksek Lisans", "IT Bölümü", "Mazeret Sınavı") tespit etmek ve bunları bilgi tabanındaki gerçek kavramlarla ilişkilendirmektir. Varlık bağlantılama, kelimeleri bir bilgi tabanı veya sözlükteki kavramlarla eşleştirerek anlamlandırır (Ferragina & Scaiella, 2010).

2. **Diyalog Yönetimi (DM):** DM, NLU'dan gelen bilgiyi kullanarak konuşmanın akışını kontrol eden merkezi bileşendir (Mohammed & Aref, n.d.). Mevzuat sistemlerinde DM, kullanıcının sorduğu soruya göre doğru bilgi erişim modelini (IR) tetikler ve konuşma bağlamını (context) takip ederek (Context Tracking) eksik bilgi olduğunda açıklama ister (Toxtli et al., 2018).

Bilgi Erişimi (IR) Tekniklerinin Kullanımı

IR, kullanıcının sorgusuyla ilgili en uygun belgeleri, paragrafları veya önceden hazırlanmış SSS çiftlerini bulma sürecidir.

1. **Metin Madenciliği (Text Mining):** Yönetmelik metinleri gibi yapılandırılmamış veya yarı yapılandırılmış metinlerden bilgi ve desenleri çıkarmak için kullanılır. Abu-Rasheed ve arkadaşları (2019), sınav yönetmeliklerine dair net bir model oluşturmak için metin madenciliği kullanılmasını önermiştir.

2. **Doküman/Yanıt Eşleştirme:** IR, genellikle Sorgu/Yanıt (Q/A) sistemlerinin temelidir (Shawar & Atwell, 2010; Sinha et al., 2020).

◦ **Geleneksel IR (BM25):** Bazı hibrit sistemlerde (örneğin AliMe Chat), IR modeli BM25 gibi algoritmaları kullanarak Bilgi Tabanından aday yanıtları (QA çiftleri) alır ve bu adayları Seq2Seq modelinden üretilen yanıtlarla birleştirip yeniden sıralar (Rerank) (Qiu et al., 2017; Lokman & Ameedeen, 2019).

◦ **Modern Vektör Tabanlı IR (Semantic Search):** BERT/SBERT gibi anlamsal temsiller kullanılarak, kullanıcının sorgusunun tam olarak aynı kelimeleri içermese bile, anlamsal olarak benzer metin parçalarının (yönetmelik maddeleri) bulunması sağlanır (Condor et al., 2021). Bu yöntem, karmaşık hukuki metinlerdeki anlam derinliğini yakalamak için kritik öneme sahiptir.

3. Hukuki Metinlerin Yapısal Özellikleri Chatbot Performansını Nasıl Etkiler?

Hukuki ve idari metinler (yönetmelikler, kanunlar, sözleşmeler) doğal dilin kendine has ve zorlu bir alt kümesini oluşturur. Bu metinlerin kendine özgü yapıları, chatbot tasarımında hem zorluklar hem de fırsatlar yaratır.

Zorluklar:

1. **Dilsel Karmaşıklık:** Hukuki metinler yoğun, soyut ve teknik terimlerle doludur (Pérez Solà & Cristina, 2021; Liu & Chen, 2021). Bu, NLU algoritmalarının, özellikle de genel amaçlı eğitilmiş modellerin (LLM), doğru anlamsal yorumu yapmasını zorlaştırır.

2. **Yüksek Hassasiyet:** Hukuki metinlerdeki her bir kelimenin, hatta noktalama işaretinin bile bir anlamı ve hukuki sonucu vardır. Bir chatbotun bu hassasiyeti kaybetmesi, metni yanlış yorumlamasına ve yasal olarak bağlayıcı bir bilgi yerine yanlış bir rehberlik sunmasına neden olabilir (Bieletzke, 2023).

3. **Çok Adımlı Prosedürler:** Yönetmelikler genellikle bir görevden ziyade, bir dizi koşul, istisna ve ardışık adımı içeren karmaşık bir prosedürü tanımlar (Abu-Rasheed et al., 2019). Chatbotun diyalog yöneticisinin (DM) bu karmaşık akışı (workflow) hatasız takip etmesi ve kullanıcının hangi adımda olduğunu bilmesi gerekir (Toxtli et al., 2018).

Fırsatlar (Chatbot Performansını Artıran Etkiler):

1. **Ontolojik ve Yapısal Ayrıştırma Kolaylığı:** Yönetmelikler ve mevzuatlar, genellikle madde, fıkra, bent gibi hiyerarşik ve yapılandırılmış formatlarda düzenlenir (Imogen, 2024). Bu yapı, Ontoloji tabanlı yaklaşımların (Al-Zubaide & Issa, 2011; Colace et al., 2018) veya Metagraf tabanlı bilgi işlem modüllerinin (Sukhareva & Chernenkiy, 2020) oluşturulmasına olanak tanır. Ontolojiler, kavramlar arasındaki ilişkileri tanımlayarak, chatbotun anlam karmaşıklığını (disambiguation) çözmesine yardımcı olur (Colace et al., 2018).

2. **Vektörleştirme ve Bilgi Erişimi Kolaylığı:** 30 sayfalık sınav yönetmeliği gibi uzun belgelerin YZ modeline beslenmesi, tek parça halinde zordur (Bieletzke, 2023). Ancak bu hukuki metinlerin paragraflara veya maddelere ayrılmış olması, vektörleştirme (embedding) sürecini basitleştirir. Her bir madde, bağımsız bir bilgi parçası olarak vektör uzayında temsil edilebilir ve kullanıcı sorusuyla sadece ilgili maddeler çekilebilir (Bieletzke, 2023).

3. **Hukuki Bilgi Çıkarımı:** Hukuki metinler, doküman sınıflandırma, bilgi çıkarma (Information Extraction) ve özetleme (Summarization) gibi NLP görevleri için zengin bir kaynaktır (Imogen, 2024; Chen & Xin, 2020). Bu yapısal özellikler, chatbotun sadece yanıt vermek yerine, metnin anahtar terimlerini ve potansiyel risklerini belirlemesine olanak tanır (Imogen, 2024).
Hukuki metinlerin resmi ve katı yapısı, chatbotun kapalı alanlı doğasını pekiştirir ve yanlış yorumlamayı engellemek için sıkı bir veri kontrolü gerekliliğini vurgular.

4. Kullanıcı Sorularının Doğru Eşleştirilmesi İçin Hangi Yöntemler Uygulanır?

Kullanıcının doğal dildeki bir sorusunu (örneğin, "Ders düşürme dilekçesini nereye vereceğim?") doğru yönetmelik maddesiyle veya uygun bir yanıtla eşleştirmek, chatbotun temel işlevidir. Bu eşleştirme, basit desen eşleştirmeden (pattern matching) ileri düzey anlamsal aramalara kadar çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir.

Geleneksel Yöntemler

• **Kalıp Eşleştirme (Pattern Matching):** AIML (Artificial Intelligence Markup Language) gibi diller kullanılarak, kullanıcı girdisi önceden tanımlanmış kalıplarla eşleştirilir (Shawar & Atwell, 2007; Marietto et al., 2013; Setiaji & Wibowo, 2016). Bu yöntem, SSS (FAQ) tabanlı chatbotlarda güvenilirdir (Ranoliya et al., 2017), çünkü yanıtlar tamamen kontrol altındadır. Ancak esnek değildir ve kullanıcı sorusu kalıba uymazsa yanıt başarısız olur.

• **Bigram/Anahtar Kelime Eşleştirme:** Basit sistemlerde, girdi cümlesi Bigram gibi yöntemlerle iki harfli bölümlere ayrılarak benzerlik puanı hesaplanabilir (Setiaji & Wibowo, 2016; Neubig, n.d.). Başka bir yaklaşım, nadir kelimelerin önemini artıran Ters Belge Sıklığı (IDF) değerleriyle ağırlıklandırılmış kelime eşleştirmesi kullanmaktır (Yu et al., 2014).

Anlamsal Arama ve Derin Öğrenme Yöntemleri (Semantic Search / Embedding)

Geleneksel yöntemlerin kelime düzeyindeki eşleştirmesinin aksine, modern yöntemler cümlenin anlamını vektör uzayında temsil eder.

• **Kelime Gömülmeleri (Word Embeddings):** Word2Vec (Mikolov et al., 2013) ve GloVe (Pennington et al., 2014) gibi yöntemler, kelimeleri yoğun vektörlere dönüştürerek anlamsal ilişkilerini yakalar.

• **BERT ve SBERT:** BERT (Devlin et al., 2018), kelimelerin bağlamına göre farklı vektör temsilleri (contextualized word representations) oluşturarak NLP performansında çığır açmıştır (Wang & Kuo, 2020). Ancak, BERT'in kendisinden elde edilen cümle temsilleri (örneğin son katman ortalaması veya [CLS] token'ı) cümleler arası anlamsal benzerlik (STS) görevlerinde suboptimal performans göstermiştir. Bu, BERT'in eğitim hedeflerinin (Masked Language Modeling, Next Sentence Prediction) doğrudan cümle benzerliği için uygun olmamasından kaynaklanmıştır (Wang & Kuo, 2020).

• **SBERT (Sentence-BERT) ve SBERT-WK:** SBERT, Siamese ve Triplet ağ yapılarını kullanarak BERT'i cümle gömülmeleri üretmek üzere ince ayarlar (fine-tunes) (Reimers & Gurevych, 2019; Condor et al., 2021). Bu, anlamsal arama için çok daha güçlü bir yöntemdir. SBERT-WK ise, kelime temsilinin katmanlar arası varyansını analiz ederek kelime önemini belirler ve bu varyansın IDF değeriyle pozitif korelasyon gösterdiğini bulmuştur (Wang & Kuo, 2020). Bu, SBERT-WK'nın parametrik olmayan yöntemlerin (SIF) gücünü modern derin öğrenmeyle birleştirdiğini gösterir.

RAG Yaklaşımı (Retrieval-Augmented Generation)

Resmi olarak RAG terimi kaynaklarda geçmese de, mevzuat tabanlı sistemler için önerilen kontrollü YZ entegrasyonu (Bieletzke, 2023) bu mimariyle örtüşür.

• **API Entegrasyonu ve Vektörleştirme:** Büyük YZ modelleri (GPT gibi), Kampüs Yönetim Sistemleri (CMS) içine API aracılığıyla entegre edilir (Bieletzke, 2023). Hukuki metinler (30 sayfalık yönetmelikler gibi) tamamen vektörleştirilir (embedding) ve YZ'nin bilgi kaynağı olarak bu vektör veritabanı kullanılır (Bieletzke, 2023).

• **Kontrollü Üretim:** Kullanıcı sorusu geldiğinde, sistem SBERT benzeri bir anlamsal arama ile vektör DB'den en alakalı yönetmelik maddesini çeker (Retrieval). Daha sonra YZ modeline (Generative AI), yalnızca bu çekilen metne dayanarak yanıt üretmesi talimatı verilir (Bieletzke, 2023). Bu, YZ'nin genel dünya bilgisinden bağımsız olarak, sadece kuruma ait resmi metinlerle yanıt vermesini sağlar.

5. Bu Sistemlerde Karşılaşılan Temel Zorluklar Nelerdir?

Mevzuat tabanlı chatbotlar, yüksek beklentilerle karşılaşırken, hem teknik hem de etik düzlemde çözülmesi zor bir dizi sorunla yüzleşmektedir.

Hukuki Güvenlik ve Yanlış Yönlendirme (Hallucination)

Belki de en kritik zorluk, yanıt doğruluğunun hukuki sonuçlarıdır. Eğer bir YZ tabanlı chatbot, genel eğitim verilerine dayanarak (open-domain knowledge) üniversite yönetmeliğine aykırı bir yanıt verirse, bu üniversitenin aleyhine yasal sorunlara yol açabilir (Bieletzke, 2023).

• **Uydurma (Hallucination) Riski:** YZ modellerinin, bilmedikleri bir konuda bile akla yatkın, ancak tamamen yanlış bilgiler uydurma eğilimi (Bieletzke, 2023), kapalı alanlı mevzuat uygulamalarında kabul edilemezdir. YZ'nin, bilgi eksikliğini dürüstçe itiraf etmek yerine, bilgiyi zekice gizlemeye çalışması (Damage Control) bir sorundur.

• **Kullanıcının Güveninin Kötüye Kullanımı:** İnsanlar chatbotlara güvendikleri için, özellikle yasal konularda verilen yanlış bilgiler, büyük bir hayal kırıklığına neden olabilir.

Doğal Dil ve Bağlam Anlama Zorlukları

1. **Bağlam (Context) Kaybı ve Referans Hataları:** Diyalog sistemlerinin en yaygın başarısızlık nedenlerinden biri, kullanıcının önceki sorularına (bağlam) atıfta bulunduğu karmaşık, çok adımlı konuşmaları (multi-turn dialogues) yönetememeleridir (Toxtli et al., 2018; Mäurer & Weihe, 2015). Kullanıcının önceki bir cevabını düzeltmeye çalışması veya daha önceki bir soruya geri dönmesi (dialogue-reference errors), diyalogların başarısız olmasına yol açar.

2. **Kısıtlayıcı Etkileşim:** Hukuki güvenliği sağlamak amacıyla, chatbotlar genellikle serbest metin girişlerini kısıtlar ve önceden belirlenmiş menüler sunar (Duijst, 2017). Ancak bu durum, kullanıcıların etkileşimi "bir form doldurmak" veya "sabit bir menüden geçmek" gibi kısıtlayıcı bulmasına neden olur, bu da bir chatbotun "sohbet etmesi gerektiği" beklentisiyle çelişir (Jain et al., 2018).

3. **Bilgi Eksikliği ve Dış Konular (Off-topic):** Chatbot, bilgi birikiminin dışına çıkan konular (off-topic utterances) sorulduğunda başarısız olabilir. Öğrenciler, hangi konular hakkında konuşabileceklerini bilmediklerinde konu dışı sorular sorabilirler (Silvervarg & Jönsson, 2013).

Güncel Mevzuat Takibi ve Bakım

Mevzuat metinleri ve yönetmelikler dinamiktir ve sıklıkla güncellenir. Chatbotun Bilgi Tabanının (KB) sürekli olarak güncel tutulması gerekir. Yeni bilgilerin eklenmesi, mevcut veri setinde arama ve eşleştirme deneyimini bozabilir. Bu da sürekli denetim ve yüksek bakım maliyeti gerektirir.

6. Kullanıcı Deneyimi, Güven ve Şeffaflık Açısından Değerlendirme

Mevzuat tabanlı bir chatbotun kurum içinde kabul görmesi ve etkili olabilmesi, büyük ölçüde kullanıcı deneyimi, etik standartlar ve şeffaflık ilkelerine ne kadar uyduğuna bağlıdır.

Kullanıcı Deneyimi ve Kişilik (Personality)

Chatbotlar öncelikle üretken ve verimli olmalıdır; katılımcıların %68'i üretkenliği chatbot kullanmanın ana nedeni olarak belirtmiştir (Brandtzaeg & Følstad, 2017). Ancak verimlilik, robotik bir deneyimle gelmemelidir (Jenkins et al., 2007).

• **İnsan Benzerliği (Human-likeness):** Kullanıcılar, chatbotların tutarlı dilbilgisi, yazım ve uygun dil kaydı (linguistic register) kullanmasını beklerler (Morrissey & Kirakowski, 2013; Coniam, 2008). Chatbotun dilinin, temsil ettiği hizmet sağlayıcının rolüne uyması gerekir. Örneğin, acil bir finansal işlemde emoji kullanılması uygunsuz bulunmuştur (Duijst, 2017).

• **Kişilik ve Ton:** Chatbotun linguistik seçimleri, bir kişilik sergileyebilir (Mairesse & Walker, 2009; Huang, 2021). Mevzuat sistemlerinde, önerilen kişilik, "genç ama doğru ve bağlayıcı olmayan bir akademik danışman" olabilir. Bu, YZ'nin insana benzer olmasını artırır (Araujo, 2018), ancak yasal bağlamda ciddi bir ton gereklidir.

Güven ve Şeffaflık

Güven, mevzuat tabanlı sistemler için tartışmasız en önemli etik faktördür.

1. **Şeffaflık (Transparency):** Kullanıcılar, bir makine ile mi yoksa insanla mı etkileşimde olduklarını bilme hakkına sahiptir (Ruane et al., 2019; Hasal et al., 2021). Chatbotun insan dışı bir sistem olduğunu açıkça belirtmesi, güvenin kötüye kullanılmasını engeller.

2. **Veri Gizliliği (Privacy) ve GDPR Uyumu:** Chatbotlar, etkileşimi kişiselleştirmek için kullanıcı verilerini (PII) toplar (Duijst, 2017). Ancak kullanıcıların büyük bir kısmı kişisel verilerini bir makineye ifşa etmekten endişe duymaktadır. GDPR (General Data Protection Regulation), kişisel verilerin toplanmasını, depolanmasını ve işlenmesini düzenler (Hasal et al., 2021; Swinkels, 2017).

◦ **Veri Minimizasyonu:** Chatbotlar, mümkün olduğunca az veri toplamalı ve sadece hizmet için gerekli olduğu sürece saklamalıdır (Hasal et al., 2021).

◦ **Kontrollü Entegrasyonun Önemi:** Bieletzke (2023), öğrencilerin harici YZ platformlarına kaydolmaya zorlanmasının GDPR'ye aykırı olabileceğini, bu nedenle YZ'nin üniversitenin güvenli CMS'si içinde bir API olarak çalıştırılması gerektiğini savunur.

Hukuki Şeffaflık ve Hesap Verebilirlik

Hukuki sorumluluğu yönetmek için, chatbot tarafından sağlanan yanıtın hukuken bağlayıcı olmadığına dair bir not (non-binding statement) eklenmesi önerilir. Bu, YZ'nin rolünü sadece bir bilgi rehberi olarak sınırlar ve YZ'nin karar alma süreçlerindeki önyargı risklerini (Fuchs, 2018) hafifletmeye yardımcı olur.

7. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Mevzuat tabanlı chatbot sistemleri, kamu kurumları ve üniversiteler için idari verimlilik ve kullanıcı memnuniyeti açısından dönüştürücü bir potansiyele sahiptir. Bu derleme, bu potansiyeli gerçekleştirmek için teknolojik esnekliği (YZ) hukuki güvenilirlikle (Kontrol) birleştiren bir mimarinin zorunlu olduğunu göstermektedir.

Geleneksel AIML tabanlı sistemler güvenliği sağlasa da (Thorat & Jadhav, 2020), kullanıcı beklentilerini karşılamakta yetersizdir. Öte yandan, BERT ve SBERT gibi NLP'deki ilerlemeler, anlamsal eşleştirmede devrim

yaratmış, ancak üretken YZ'nin (GPT) serbest kullanımı, mevzuat alanındaki hallucination (uydurma) riski nedeniyle ciddi hukuki sorumluluklar doğurmaktadır (Bieletzke, 2023).

Bu zorlukların üstesinden gelmek için, Kampüs Yönetim Sistemleri (CMS) ile sıkı bir API entegrasyonuna dayalı, kontrollü YZ yaklaşımı en uygun çözümdür. Bu modelde, YZ sadece vektörleştirilmiş, onaylanmış resmi metinlere erişerek yanıt üretir ve diyalog akışı (dialogue workflow) kurum tarafından sıkı bir şekilde denetlenir (Bieletzke, 2023). Bu yaklaşım, chatbotların hukuki metinleri yorumlaması yerine, sadece doğru bilgiye hızlı ve bağlamsal erişim sağlamasına odaklanmalıdır.

Gelecekteki Araştırmalar ve Geliştirilebilecek Çözümler Üzerine Öneriler

Gelecekteki çalışmalar, bu sistemlerin potansiyelini tam olarak açığa çıkarmak için aşağıdaki alanlara odaklanmalıdır:

1. **Bağlamsal Zenginleştirme ve Çözümleme Stratejileri:** Diyalog Yöneticisi (DM) yeteneklerinin geliştirilmesi, karmaşık, çok adımlı mevzuat süreçlerinde bağlam takibi (context tracking) ve referans hatalarını (dialogue-reference errors) düzeltecek (Wallis & Norling, 2005) yeni stratejiler üzerine yoğunlaşılmalıdır.
2. **Otomatik Mevzuat Güncelleme Mekanizmaları:** Üniversite yönetmeliklerinin veya hukuki metinlerin güncellenmesi durumunda, sistemin Bilgi Tabanını (KB) otomatik olarak güncelleyebilmesi için NLP ve metin madenciliği tekniklerinin kullanılması (Imogen, 2024; Rukhiran & Netinant, 2022) ve bu güncellemelerin YZ modelinin vektör uzayına (embedding) hızlıca yansıtılması gerekir.

3. **Etik ve Şeffaflık Denetimi:** YZ'nin eğitimde kullanımıyla ilgili etik kılavuzlar (Kooli, 2023) ve ilkeler (şeffaflık, güven, önyargıdan kaçınma) oluşturulmalıdır (Ruane et al., 2019; Hasal et al., 2021). Kullanıcıların bir makine ile konuştuğunu netleştiren ve verilerin nasıl işlendiğini açıklayan şeffaf arayüz tasarımlarına ihtiyaç vardır.

4. **SBERT/BERT Modellerinin Alan Adaptasyonu:** BERT ve SBERT gibi modellerin, genel metinlerden ziyade, doğrudan hukuki metinler üzerinde ince ayar (fine-tuning) veya alan adaptasyonu (domain adaptation) yapılması (Sung et al., 2019), mevzuat terminolojisini daha iyi anlamasını sağlayabilir (Condor et al., 2021).

Bu sistemler, YZ'nin sadece bir hizmet aracı değil, aynı zamanda kurumun hukuki hafızasının bir uzantısı olarak konumlandırıldığı disiplinli bir yaklaşımla, yükseköğretim ve kamu sektöründe idari süreçleri gerçekten optimize edebilir.

KAYNAKÇA

Abdul-Kader, S. A., & Woods, J. (2015). Survey on Chatbot Design Techniques in Speech Conversation Systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 6*(7), 72-80.

Abu-Rasheed, H., Zenkert, J., Weber, C., & Fathi, M. (2019). CONVERSATIONAL CHATBOT SYSTEM FOR STUDENT SUPPORT IN ADMINISTRATIVE EXAM INFORMATION. *Conference Paper*. DOI: 10.21125/iceri.2019.1974.

3. Abu Shawar, B. A., & Atwell, E. (2007). Chatbots: Are they Really Useful? *LDV Forum, 22*, 29–49.

4. Adiwardana, D., Luong, M.-T., So, D. R., Hall, J., Fiedel, N., Thoppilan, R., … Le, Q. V. (2020). Towards a Human-like Open-Domain Chatbot. *arXiv preprint arXiv:2001.09977*.

5. Al-Zubaide, H., & Issa, A. A. (2011). OntBot: Ontology Based Chatbot. *Proc. IEEE of 2011 Fourth International Symposium on Innovation in Information & Communication Technology (ISIICT)*, 7-12.

6. Araujo, T. (2018). Living up to the chatbot hype: The influence of anthropomorphic design cues and communicative agency framing on conversational agent and company perceptions.

7. Ayedoun, E., et al. (2017). A conversational agent to detect learner breakdowns and pitfalls. *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*.

8. Bieletzke, S. (2023). AI-CHATBOT-INTEGRATION IN CAMPUS-MANAGEMENT-SYSTEMS. *Conference Paper*. DOI: 10.21125/edulearn.2023.0971.

9. Björkqvist, K., Österman, K., & Lagerspetz, K. (2000). Interactive aggression in computer-mediated communication. *International Conference on Cyberpsychology and Cybertherapy*.

10. Brandtzaeg, P. B., & Følstad, A. (2017). Why people use chatbots. *International conference on internet science*. Springer.

11. Chen, X. (2020). Legal Document Summarization Using Machine Learning Techniques. *Journal Neural Computing and Applications, 32*(20), 5678-5687.

12. Colace, F., De Santo, M., Lombardi, M., Pascale, F., & Santaniello, D. (2018). Chatbot: An education support system for student. *International Symposium on Cyberspace Safety and Security*.

13. Coniam, D. (2008). Evaluating the language resources of chatbots for their potential in English as a second language learning. *ReCALL, 20*(1), 99–117.

14. Condor, A., Litster, M., & Pardos, Z. (2021). Automatic short answer grading with SBERT on out-of-sample questions. *Proceedings of The 14th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2021)*, 345-352.

15. Curry, A. C., & Rieser, V. (2018). # metoo alexa: How conversational systems respond to sexual harassment. *Proceedings of the second acl workshop on ethics in natural language processing*, 7–14.

16. Dale, R. (2016). The return of the chatbots. *Natural Language Engineering, 22*(5), 811–817.

17. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2018). Bert: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *arXiv preprint arXiv:1810.04805*.

18. Duijst, D. (2017). Can we Improve the User Experience of Chatbots with Personalisation (Unpublished master's thesis). UNIVERSITY of Amsterdam.

19. Ferrara, E., Varol, O., Davis, C., Menczer, F., & Flammini, A. (2016). The rise of social bots. *Communications of the ACM, 59*(7), 96–104.

20. Ferragina, P., & Scaiella, U. (2010). Tagme: on-the-fly annotation of short text fragments (by Wikipedia entities). *Proceedings of the 19th ACM international conference on information and knowledge management*, 1625-1628.

21. Fitzpatrick, K. K., Darcy, A., & Vierhile, M. (2017). Delivering cognitive behavior therapy to young adults with symptoms of depression and anxiety using a fully automated conversational agent (Woebot): a randomized controlled trial. *JMIR mental health, 4*(2), online.

22. Følstad, A., & Brandtzæg, P. B. (2017). Chatbots and the new world of HCI. *Interactions, 24*(4), 38-42.

23. Gnewuch, U., Morana, S., & Maedche, A. (2017). Chatbots: The next generation of conversational interfaces. *International conference on internet science*, 236–248.

24. Hasal, M., Nowaková, J., Saghair, K. A., Abdulla, H., Snášel, V., & Ogiela, L. (2021). Chatbots: Security, privacy, data protection, and social aspects. *Concurrency and Computation: Practice and Experience, 33*, e6426.

25. Hien, H. T., Cuong, P.-N., Nam, L. N. H., Nhung, H. L. T. K., & Thang, L. D. (2018). Intelligent assistants in higher-education environments: the FIT-EBot, a chatbot for administrative and learning support. *Proceedings of the ninth international symposium on information and communication technology*, 69–76.

26. Hiremath, G., Hajare, A., Bhosale, P., Nanaware, R., & Wagh, K. (2020). Chatbot for Education System. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, 4*(3), 37–43.

27. Huang, X. (2021). *CHATBOT: DESIGN, ARCHITECUTRE, AND APPLICATIONS*. (ASCS CIS 498 Senior Capstone Thesis). UNIVERSITY of Pennsylvania.

28. Imogen, P. V. (2024). AI-Powered Legal Documentation Assistant: Design, Architecture, and Application. *Journal of Artificial Intelligence and Capsule Networks, 6*(2), 211-226.

29. Jain, M., Kumar, P., Kota, R., & Patel, S. N. (2018). Evaluating and Informing the Design of Chatbots. *Proceedings of the 2018 on designing interactive systems conference 2018*, 895–906.

30. Jenkins, M.-C., Churchill, R., Cox, S., & Smith, D. (2007). Analysis of user interaction with service oriented chatbot systems. *Human-computer interaction. hci intelligent multimodal interaction environments*, 76–83.

31. Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2020). *Speech and language processing: an introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition*. Pearson.

32. Kocaleva, M., Stojanov, D., Stojanovik, I., & Zdravev, Z. (2016). Pattern recognition and natural language processing: state of the art. *TEM Journal, 5*(2), 236–240.

33. Kooli, C. (2023). Chatbots in Education and Research: A Critical Examination of Ethical Implications and Solutions. *Sustainability, 15*(7), 5614.

34. Lokman, A. S., & Ameedeen, M. A. (2019). Modern Chatbot Systems: A TECHNICAL Review. *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2018*.

35. Liu, Y., & Chen, W. (2021). Legal Document Parsing Using Natural Language Processing Techniques. *Journal of Computer and System Sciences, 20*(2), 112345-112353.

36. Mairesse, M., & Walker, M. A. (2009). Towards a statistical model of stylistic variation in generation. *Proceedings of the 12th European Workshop on Natural Language Generation*.

37. Marietto, M. D. G. B., de Aguiar, R. V., Barbosa, G. D. O., Botelho, W. T., Pimentel, E., França, R. D. S., & da Silva, V. L. (2013). Artificial intelligence markup language: a brief tutorial. *arXiv preprint arXiv:1307.3091*.

38. Mäurer, M., & Weihe, K. (2015). Dialogue reference resolution in conversational systems. *Proceedings of the SIGdial 2015 Conference on Discourse and Dialogue*, 143–152.

39. Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Distributed representations of words and phrases and their compositionality.

40. Mohammed, M., & Aref, M. M. (n.d.). Chatbot System Architecture. *arXiv preprint arXiv:2201.06348*.

41. Morrissey, M., & Kirakowski, J. (2013). Chatbot's personality and design: the user perspective. *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction*.

42. Neubig, G. (n.d.). NLP Programming Tutorial 2 – Bigram Language.

43. Okonkwo, C. W., & Ade-Ibijola, A. (2021). Chatbots applications in education: A systematic review. *Computers and Education: Artificial Intelligence, 2*, 100033.

44. Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. D. (2014). GloVe: Global vectors for word representation. *Proceedings of the conference on empirical methods in natural language processing*, 1532–1543.

45. Pérez Solà, C., & Cristina, A. (2021). AI-based Legal Document Drafting, Challenges and Opportunities. *Journal of Empirical Legal Studies, 18*(4), 789-798.

46. Qiu, M., Li, F. L., Wang, S., Gao, X., Chen, Y., Zhao, W., et al. (2017). AliMe Chat: A Sequence to Sequence and Rerank based Chatbot Engine. *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 1-6.

47. Ranoliya, B. R., Raghuwanshi, N., & Singh, S. (2017). Chatbot for UNIVERSITY related FAQs. *2017 international conference on advances in computing, communications, and informatics (ICACCI)*, 1525–1530.

48. Reimers, N., & Gurevych, I. (2019). Sentence-bert: Sentence embeddings using siamese bert-networks. *arXiv preprint arXiv:1908.10084*.

49. Ruane, E., Birhane, A., & Ventresque, A. (2019). Conversational AI: Social and Ethical Considerations. *AICS*.

50. Rukhiran, M., & Netinant, P. (2022). Automated information retrieval and services of graduate school using chatbot system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 12*(5), 5330–5338.

51. Setiaji, B., & Wibowo, F. W. (2016). Chatbot Using A Knowledge in Database Human-to-Machine Conversation Modeling. *Proceedings of 2016 7th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS)*, 72–77.

52. Shawar, B. A., & Atwell, E. (2010). Chatbots: can they serve as natural language interfaces to QA corpus? *Advances in Computer Science and Engineering*, 183–188.

53. Silvervarg, V., & Jönsson, A. (2013). The student's view of an educational chatbot: A preliminary study. *Proceedings of the 16th International Conference on Artificial Intelligence in Education*, 243–252.

54. Sinha, S., Basak, S., Dey, Y., & Mondal, A. (2020). An educational chatbot for answering queries. *Emerging technology in modelling and graphics*, 55–60.

55. Sukhareva, M., & Chernenkiy, V. (2020). Hybrid Chatbot System for Question Answering. *Paper 5*.

56. Sung, C., Dhamecha, T., & Mukhi, N. (2019). Improving short answer grading using transformer-based pre-training. *International Conference on Artificial Intelligence in Education*, 469–481.

57. Sutskever, I., Vinyals, O., & Le Quoc, V. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 3104 - 3112.

58. Swinkels, R. (2017). Eu General Data Protection Regulation Compliance [Master thesis].

59. Thorat, S. A., & Jadhav, V. D. (2020). A Review of Rule-based Chatbot Systems and Platforms. *SSRN*.

60. Toxtli, C., Cranshaw, J., et al. (2018). Understanding chatbot-mediated task management. *Proceedings of the 2018 chi conference on human factors in computing systems*, 58.

61. Tur, G., & Deng, L. (2011). Intent determination and spoken utterance classification. *Spoken language understanding: systems for extracting semantic information from speech*, 93–118.

62. Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind, 59*(236), 433–460.

63. Wang, B., & Kuo, C.-C. J. (2020). SBERT-WK: A Sentence Embedding Method by Dissecting BERT-based Word Models. *arXiv preprint arXiv:2002.06652v2*.

64. Wallis, P., & Norling, E. (2005). Repair in spoken dialogue systems. *Proceedings of the 9th European Conference on Speech Communication and Technology*, 37–40.

65. Weizenbaum, J. (1966). ELIZA—a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM, 9*(1), 36–45.

66. Winkler, R., & Söllner, M. (2018). Unleashing the potential of chatbots in education: A state-of-the-art analysis.

67. Yu, L., Hermann, K. M., Blunsom, P., & Pulman, S. (2014). Deep learning for answer sentence selection. *arXiv preprint arXiv:1412.1632*.

68. Zhang, K., & Aslan, A. B. (2021). AI technologies for education: Recent research & future directions. *Computers and Education: Artificial Intelligence, 2*, 100025.

DEEP LEARNİNG-BASED ANALYSİS and RECOMMENDATİON SYSTEM for MULTİ CHANNEL PERFUME REVİEWS

[1]Ömerhan SEZGİN1, [2]Ali ÇETİNKAYA

[1]*Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2]*Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

223301157@ogr.selcuk.edu.tr

Abstract - This study introduces a deep learning-based analysis and recommendation system designed to derive meaningful insights from the rapidly increasing volume of user reviews on digital platforms. In industries such as perfumery—where sensory perception and subjective judgment dominate—traditional data processing techniques often fail to capture linguistic nuances. The proposed system integrates textual, numerical, and categorical data within a unified, multi-channel architecture to generate personalized and accurate perfume recommendations. Textual data are analyzed through both classical and modern approaches to ensure a comprehensive comparison. In the classical setting, TF-IDF vectorization with (1–2) n-grams was applied to preserve compound terms such as “black pepper” and “blood orange,” followed by Logistic Regression and Multinomial Naive Bayes classifiers. The deep learning approach, on the other hand, employed a pre-trained RoBERTa model capable of understanding contextual and semantic relationships in language. Additionally, numerical features such as longevity and sillage were modeled using nonlinear ReLU activations and Dropout layers, while categorical attributes were encoded through trainable embeddings combined via a multi-head attention mechanism. Experimental findings validated that the roberta-base model achieved the highest accuracy of 73.40%, outperforming Logistic Regression (73.34%) and Naive Bayes (72.45%). These results clearly demonstrate that Transformer-based deep learning models are significantly more effective in extracting nuanced meaning and generating actionable insights from subjective, text-based consumer reviews in the perfumery industry.

Keywords - Cosine Similarity; Deep Learning; Multi-Channel Architecture; Natural Language Processing; Perfume Review; Recommendation System; ROBERTa; TF-IDF

INTRODUCTION

The perfume market has reached a significant size on a global scale and continues to grow. The global perfume market is estimated to be worth $50.85 billion in 2022 and is expected to grow at a compound annual growth rate (CAGR) of 5.9% through 2030. (Grand View Research, 2011 - 2021) According to another estimate, the market is estimated to be worth US$40.13 billion in 2022 and is projected to reach US$64.41 billion by 2030, growing at a CAGR of approximately 6.07%. (Zion Market Research, 2022) These growth rates are driven by factors such as the increasing importance placed on personal care and the rising demand for luxury and exotic fragrances. These slight differences in market size data obtained from different sources may be due to different methodologies or market definitions used. Therefore, it is important to approach market size estimates with caution and consider different sources.

In this highly competitive sector, the role of data analysis is increasingly important for perfume companies to stand out in the market. Rapid changes in consumer preferences and market trends (Grand View Research, 2011 - 2021) require companies to adapt quickly to these changes in order to remain competitive. Data analysis provides companies with a significant competitive advantage in understanding consumer behavior and directing their business strategies accordingly (Faster Capital, 2025). This situation is causing a shift in the perfume industry from traditional intuitive decisions to data-driven approaches.

The Importance of Data Analysis in the Perfume Industry:

The global perfume industry is a dynamic environment characterized by continuous growth and intense competition. The role of data analysis in understanding consumer behavior and guiding business strategies is becoming increasingly critical. This report examines the importance of data analysis in the perfume industry and its key applications. Data analysis provides significant benefits to the perfume industry in many areas, from understanding consumer preferences and identifying market trends to optimizing product development, improving marketing strategies, and increasing operational efficiency. The report's key findings show that data-driven approaches are essential for perfume companies to gain a competitive advantage and achieve sustainable growth.

The Power of Data: Understanding the Perfume Market:

The size and growth trends of the global perfume market provide important insights for industry players. The global perfume market is estimated to be worth between US$40.13 billion and US$50.85 billion in 2022. (Grand View Research, 2011 - 2021) Future projections indicate that the market will grow significantly. The market is expected to reach between US$64.41 billion and US$80.16 billion by 2030, while a projection for 2034 suggests that the market size could reach US$101.47 billion. (Precedence Research, 2025) This growth is supported by compound annual growth rates (CAGR) estimated at between 5.9% and 6.07% from 2023 to 2030 and 5.88% from 2025 to 2034. This growth is driven by increasing interest in personal care, demand for luxury and exotic fragrances, and consumers' rising disposable incomes. While market size and CAGR figures from different research reports indicate a general growth trend, exact figures may vary due to differences in methodology and scope. This highlights the importance of consulting multiple sources in industry analysis and evaluating results within context.

In the past, the perfume industry relied heavily on the intuitive decisions of experienced perfumers, but today, data analysis is increasingly relied upon to gain a competitive advantage and make more informed decisions. The shift from traditional intuitive decisions to data-driven approaches is creating significant change in the industry. Data analysis helps perfume companies achieve their strategic goals by offering the potential to reduce risks and increase efficiency (Mia Setya Rahayu, 2024).

The Complex Structure of Perfume Reviews:

The structure of perfume reviews generally defines the different stages of a perfume: top, middle, and base notes. Top notes are the first impression felt when the perfume is first applied and are usually light and volatile. Middle notes emerge after the top notes fade and form the heart and character of the perfume. Base notes form the foundation of the perfume and ensure its longevity. (Odosbeauty, 2025) The perfume pyramid (Figure 1.2.1) is a model that visualizes the interaction of these notes. This structure helps consumers understand the overall character of the perfume and its evolution over time.

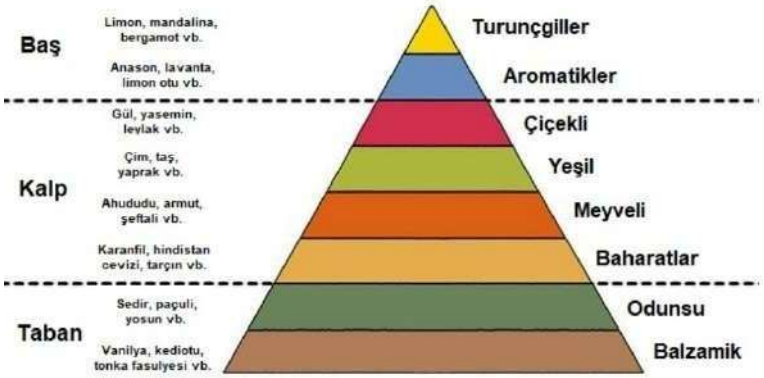


Figure 1 Perfume pyramid

Text-based perfume reviews offer rich and in-depth insights into capturing subjective experiences, thanks to the diversity and creativity of the language used to describe scents. These reviews have the ability to express not only the notes of a fragrance, but also the user's emotional responses, personal experiences, and connections with the perfume. Natural Language Processing (NLP) techniques offer powerful potential for extracting meaningful insights from these text-based reviews. (Faster Capital, 2025)

Numerical ratings also play a role in evaluating perfumes and are often used as an indicator of popularity and general appeal. However, numerical ratings have limitations due to a lack of context and rationale. Furthermore, it is difficult to reflect differences in individual preferences in numerical scores. Therefore, the most effective approach to evaluating perfumes is to combine numerical ratings and text-based subjective evaluations. While numerical scores provide a general overview, text reviews offer detailed information to understand the nuances of the scent and the user's personal experience. Text analysis is crucial for understanding emotional responses and personal preferences.

(Larisa Nikitina, 2023)

The Intersection of Artificial Intelligence and the Perfume Industry:

Artificial intelligence (AI) is playing an increasingly important role in the perfume industry in scent creation, recommendation, and marketing. AI algorithms can analyze large data sets to suggest new scent combinations. Personalized perfume recommendations can be made based on consumer preferences. AI can be used to create marketing materials and visual content. Furthermore, AI can contribute to efficient product development processes.

However, AI also has its challenges and limitations, particularly in capturing the artistic and subjective aspects of perfumery. Human emotions and

It may struggle to fully replicate creativity. The subjective and personal nature of scent perception may limit AI's effectiveness in this area. There is a potential lack of originality and depth in scents produced by artificial intelligence. Perfume design is, at its core, an artistic process, and it still seems difficult for AI to fully capture these artistic and subjective aspects.

Human creativity continues to play a role in perfume design vis-à-vis artificial intelligence; therefore, artificial intelligence can be used as a tool to enhance the creativity of perfumers. The final decision and artistic touch are always expected to belong to the perfumer. With AI automating routine tasks, perfumers can focus more on creative work. Although AI is a powerful tool that can assist perfumers in the perfume design process, it is not expected to replace human creativity and artistry.

MATERIALS AND METHOD

To capture the distinct yet complementary information present in perfume reviews, this study employs a multichannel model architecture. This design allows for the specialized processing of each data modality—textual, numerical, and categorical—before their intelligent fusion into a unified representation for the final classification task.

Data Structure and Preprocessing:

The dataset was compiled by scraping publicly available perfume reviews from the online platform Fragrantica. This process yielded a rich, multi-modal dataset comprising three primary data types:

- Textual Reviews: Subjective, user-written descriptions of their experience with a fragrance.
- Numerical Features: Quantitative user ratings for attributes such as longevity and sillage, as well as the perfume's price.
- Categorical Attributes: Structured data including individual perfume notes (e.g., "Bergamot," "Rose") and broader fragrance families.

For text processing, the RoBERTa tokenizer was employed to prepare the reviews for the deep learning model. A standardized input dimension was ensured by setting max_length to 512 tokens. Reviews exceeding this length were truncated, while shorter reviews were padded to meet the required length, creating consistent tensor dimensions for batch processing.

Proposed Model: A Multi-Channel Architecture

The PerfumeReviewMultiChannelModel is designed with three parallel processing channels, each tailored to a specific data type. The outputs of these channels are then intelligently integrated using a multi-head attention mechanism to generate a final prediction. Textual Encoding Channel

This channel utilizes a pre-trained roberta-base model to process the raw review text. RoBERTa's strength lies in its ability to generate rich, contextualized embeddings that capture the semantic nuances and metaphorical language common in perfume reviews. The 768-dimensional output from RoBERTa's [CLS] token, which serves as an aggregate representation of the entire input sequence, is passed through a dense linear layer to produce a more compact 256-dimensional text representation, preparing it for efficient fusion with the other channels.

Numerical Encoding Channel

Numerical features are processed through a dedicated multi-layer neural network. This channel uses ReLU activation functions to model complex, non-linear relationships between quantitative inputs like price and longevity ratings. To enhance the model's generalization capabilities and prevent overfitting, dropout layers with a probability of 0.2 are incorporated into the network.

Categorical Encoding Channel

To handle categorical data such as perfume notes and fragrance families, this channel employs learnable embedding layers. Each discrete note or category ID is converted into a dense, 64-dimensional vector. This approach is superior to traditional one-hot encoding because it allows the model to learn semantic similarities between related categories during training; for instance, various citrus notes may cluster together in the learned vector space, providing a richer signal.

Feature Fusion and Attention Mechanism

The processed representations from the three distinct channels are fused using a multi-head attention mechanism with eight parallel heads. This critical component dynamically weighs the relative importance of the information from the textual, numerical, and categorical channels for each individual review, allowing the model to focus on the most salient features. Residual connections and layer normalization are integrated into the fusion block to ensure stable training and promote effective information flow. Experimental Setup and Baselines

To evaluate the proposed architecture, its performance was benchmarked against several classical machine learning models. The primary evaluation task was gender classification, chosen as an effective proxy for measuring a model's

ability to extract subtle demographic and stylistic signals embedded within subjective, descriptive language. The classical models used as baselines included:

• Logistic Regression

• Multinomial Naive Bayes

• Linear SVC (SVM)

• Random Forest

These baselines were trained on TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) vectors generated from the structured perfume notes. The vectorizer was configured to use 1-2 n-grams to capture both single notes and compound terms like "black pepper" and with min_df=1 to ensure all terms were included in the vocabulary, thus preventing meaning loss for rare notes. Accuracy was selected as the sole metric for a direct and clear comparison across all models.

Model Architecture Determination and Comparison**:**

One of the most critical steps in this study was to determine the most suitable architecture for classifying highly subjective and complex text data, such as perfume reviews. Initially, there were theoretical concerns that even advanced language models like RoBERTa would struggle to cope with this complex and metaphorical language.

However, the structured quantitative test results obtained clearly demonstrate the project's success, contrary to these initial doubts. The performance of the developed multi-channel Transformer architecture was directly compared with traditional machine learning (Classic ML) methods.

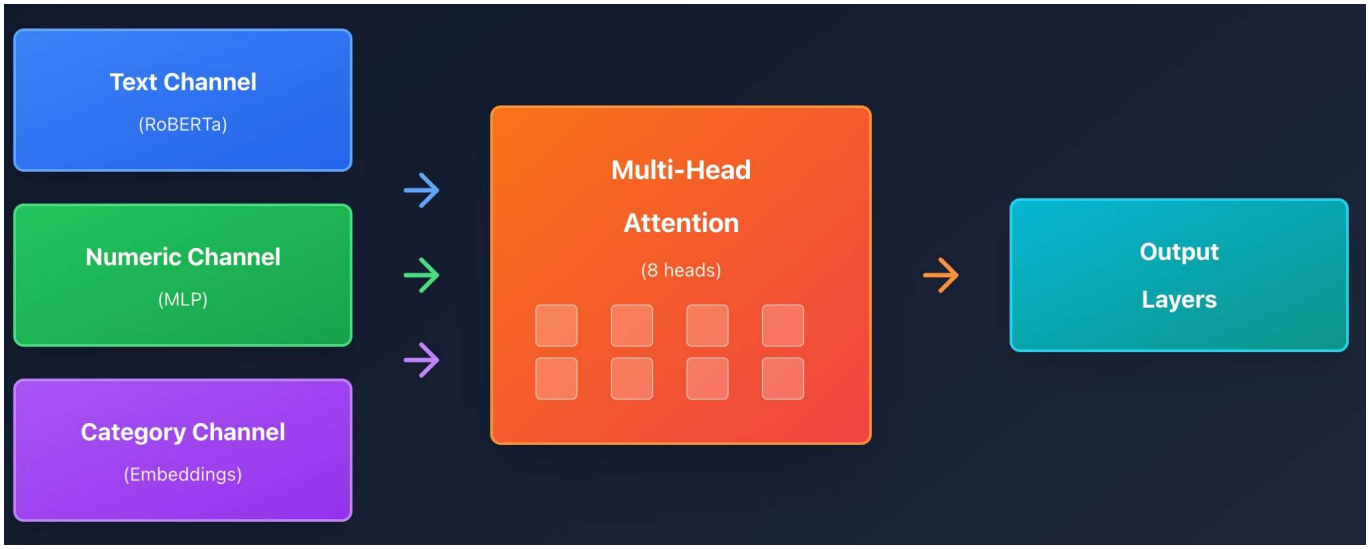


Figure 2 Model Architecture

Comparison Methodology:

To objectively measure system performance, the 'label' (gender) prediction task was selected as the primary comparison metric. Two main groups of approaches were tested:

1. Classic Models (TF-IDF)**:** As a traditional text classification approach, the 'all_notes' data containing perfume notes was vectorized using the TF-IDF (Term FrequencyInverse Document Frequency) method. These vectors were provided as input to the following classifiers, which are widely used in the industry:

- Multinomial Naive Bayes o Logistic Regression o Linear SVC (SVM)
- Random Forest

2. Transformer Model (RoBERTa)**:** As a modern approach aimed at capturing the semantic and contextual depth of the text, the pre-trained roberta-base model was used.

The performance of all models was ultimately compared using the Accuracy metric.

Research Results: Final Comparison Report:

As a result of the comprehensive training and validation processes carried out, a "FINAL COMPARISON REPORT" summarizing the accuracy scores of all tested architectures was obtained.

The following table shows the final performance of five different models on the gender classification task:

RESULTS AND DISCUSSIONS

This study details the performance and challenges encountered in the deep learning architecture developed to analyze multi-channel perfume reviews and provide personalized recommendations.

Results

This section presents a direct performance comparison of the proposed multi-channel deep learning architecture against the classical machine learning baselines. The evaluation was conducted on the gender classification task, with accuracy serving as the primary performance metric.

Performance Comparison

The experimental findings are summarized in the table below, which shows the final accuracy scores for each model.

Table 1 Models and Accuracy

Model Group	Model Name	Accuracy
Transformer	roberta-base	0.7340
Classic (TF-IDF)	Logistic Regression	0.7334
Classic (TF-IDF)	Random Forest	0.7284
Classic (TF-IDF)	Linear SVC (SVM)	0.7269
Classic (TF-IDF)	Multinomial Naive Bayes	0.7245

Analysis of Findings

The roberta-base model achieved the highest accuracy at 73.40%, outperforming all classical baselines. While the performance margin over the strongest baseline, Logistic Regression (73.34%), is statistically narrow, its significance lies in the architectural divergence between the models. The TF-IDF baseline was highly optimized, operating solely on a curated list of structured perfume notes. In contrast, the RoBERTa model achieved its superior performance by processing raw, unstructured review text. This demonstrates the Transformer's ability to extract a signal from noisy, subjective language that is at least as powerful as—and marginally superior to—a classical model relying on prestructured, domain-specific features. The subsequent discussion will deconstruct the architectural advantages that enable this performance edge and explore the broader implications of these findings.

Discussion

This section analyzes the underlying reasons for the observed performance differences and explores the broader implications of the findings.

The Advantage of Contextual Understanding

The roberta-base model's performance edge can be attributed to the fundamental advantage of Transformer architectures: the ability to understand context and semantic relationships. Unlike frequency-based methods like TFIDF, which would treat the words "strong" and "opening" in a review as separate, unrelated terms, RoBERTa can correctly interpret the combined contextual meaning of a phrase like "a strong opening." Similarly, it can disambiguate polysemous, subjective terms such as 'sharp,' 'heavy,' or 'light' based on the surrounding text, a capability crucial for interpreting nuanced reviews where context is paramount.

The Strategic Value of Multi-Channel Fusion

The strategic advantage of the multi-channel design lies in its capacity to create a more robust and comprehensive representation than a text-only Transformer could achieve. While the Textual Encoding Channel excels at interpreting semantic nuance, integrating numerical data (like sillage ratings) and categorical data (like fragrance families) provides structured, objective anchors that ground the model's understanding. This fusion prevents the model from relying solely on the text's unstructured signals and leads to a more holistic, and therefore more accurate, analysis of the user's complete feedback.

Limitations and Future Work

While the results are promising, this study has limitations that suggest avenues for future research. The model was evaluated on a classification task, but its architecture is well-suited for a formal recommendation task, which could be evaluated using standard information retrieval metrics like Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG). Additionally, the language model's performance could likely be enhanced by fine-tuning it on a larger, domainspecific corpus of perfumery-related text. These steps would build upon the current findings and move closer to a production-ready system. Conclusion

This paper detailed the design and successful validation of a multi-channel deep learning model for the complex domain of perfume review analysis. The central finding of the study is that the Transformer-based roberta-base architecture achieved superior performance compared to strong classical machine learning baselines on a gender classification task. This result underscores the superiority of contextual embedding models for extracting actionable insights from subjective and nuanced data. The potential for such advanced models to drive data-driven decisionmaking is substantial, not only in the perfumery industry but also in other consumer sectors where subjective feedback is paramount.

REFERENCES

Alchemyleads. (tarih yok). What are N-Grams in Corpus Linguistics? Alchemyleads: https://alchemyleads.com/what-aren-grams-in-corpus-linguistics/ adresinden alındı

[1] Alpha Aromatics. (2017, Temmuz 10). Understanding The Top Heart And Base Notes Of Fragrance. Alpha Aromatics: https://www.alphaaromatics.com/blog/the-notes-of-fragrance/ adresinden alındı

[2] Bhatia, P. (2024, Mart 26). The Science Behind Fragrance: Understanding Perfume Notes and Composition. Olfa Originals: https://olfaoriginals.com/blogs/notes/the-science-behind-fragrance-understanding-perfume-notes-and-composition adresinden alındı

[3] Centeno, A. A. (2025, Nisan 29). AI Perfume: The Future of Fragrance Creation? Real Men Real Style: https://www.realmenrealstyle.com/ai-perfume/ adresinden alındı

[4] Contract Laboratory. (tarih yok). Perfume Chemical Composition. Contract Laboratory: https://www.contractlaboratory.com/outsourcing/project.cfm?industry=perfumes-fragrances-and-aromatics&i=100857 adresinden alındı

[5] contributors, W. (2025, Mart 22). Pooling layer. Wikipedia: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pooling_layer&oldid=1281764712 adresinden alındı

[6] Evidentlyai. (2025, Ocak 9). How to use classification threshold to balance precision and recall. Evidentlyai: https://www.evidentlyai.com/classification-metrics/classification-threshold adresinden alındı

[7] Faster Capital. (2025, Nisan 02). Perfume feedback: Perfume Feedback Strategies for Effective Marketing Campaigns. fastercapita. adresinden alındı

[8] Faster Capital. (2025). Perfume market analysis: Captivating Consumers: The Role of Perfume Market Analysis in Business Growth. Faster Capital.

[9] Focal. (2024, Aralık 24). Text Representation Techniques in NLP: Complete Guide . Focal: https://www.getfocal.co/post/text-representation-techniques-in-nlp-complete-guide adresinden alındı

[10] Fragrantica. (tarih yok). Notes. Fragrantica: https://www.fragrantica.com/about-us.phtml adresinden alındı

[11] Grand View Research. (2011 - 2021). Perfume Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Mass, Premium), By End-user (Men, Women), By Distribution Channel (Offline, Online), By Region (Europe, APAC), And Segment Forecasts, 2023 - 2030. Amerika Birleşik Devletleri: Grand View Research. 05 17, 2025 tarihinde grandviewresearch: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/perfume-market adresinden alındı

[12] Istituto Marangoni. (2024, Mart 20). Is the future of fragrance in the hands of AI? Istituto Marangoni: https://www.istitutomarangoni.com/en/maze35/game-changers/is-the-future-of-fragrance-in-the-hands-of-ai adresinden alındı

[13] Ji, X. (2025, Nisan 25). Must knows about TF-IDF (term frequency-inverse document frequency). byteplus: https://www.byteplus.com/en/topic/400325?title=must-knows-about-tf-idf-term-frequency-inverse-document-frequency adresinden alındı

[14] Jinwala, Z. (2024, Eylül 17). AI and Data Analytics for customer loyalty in the fragrance industry. Krishtechnolabs: https://www.krishtechnolabs.com/blog/ai-data-analytics-for-loyalty-in-the-fragrance-industry/ adresinden alındı

[15] Jooyoung Kim, K. O.-S. (2024). An NLP-Based Perfume Note Estimation Based on Descriptive Sentences. MDPI AG, 38. [17] Larisa Nikitina, F. F. (2023). Words of scents: a linguistic analysis of online perfume reviews. ResearchGate.

[18] Lazic, E. (tarih yok). Fragrantica and the unhinged poetry of perfume reviews. dazeddigital: https://www.dazeddigital.com/beauty/article/61399/1/fragrantica-unhinged-poetry-perfume-reviews-itsmellscrazyinhereinstagram adresinden alındı

[19] MediaEval. (2023). Musti: Multimodal Understanding of Smells in Texts and Images. MediaEval: https://multimediaeval.github.io/editions/2023/tasks/musti/ adresinden alındı

[20] Mia Setya Rahayu, I. R. (2024, Temmuz). Optimization of Perfume Sales through Data Mining with K-Means Algorithm. JURNAL MEDIA INFORMATIKA BUDIDARMA.

[21] Odosbeauty. (2025, Ocak 17). The Science Behind Scent: How Fragrances Affect Mood and Perception. Odosbeauty: https://odosbeauty.com/blogs/news/the-science-behind-scent-how-fragrances-affect-mood-and-perception adresinden alındı

[22] Owkin. (tarih yok). Multimodal data. Owkin: https://www.owkin.com/a-z-of-ai-for-healthcare/multimodal-data adresinden alındı

[23] Pavlovic, M. (2023, Aralık 18). Artificial Intelligence in Perfumery – A Brief Overview. Scentalytics: https://scentalytics.com/blog/artificial-intelligence-in-perfumery adresinden alındı

[24] Precedence Research. (2025). Perfume Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. Precedence Research.

[25] Rahul. (2024, Mayıs 4). TF-IDF - Understanding Term Frequency-Inverse Document Frequency in NLP. Zilliz: https://zilliz.com/learn/tf-idf-understanding-term-frequency-inverse-document-frequency-in-nlp adresinden alındı

[26] Sandler, E. (2019, Temmuz 29). Artificial intelligence is quietly disrupting the fragrance development process. Glossy: https://www.glossy.co/beauty/artificial-intelligence-is-quietly-disrupting-the-fragrance-development-process/ adresinden alındı

[27] ScentAir. (tarih yok). Artificial Intelligence: Will AI Replace Fragrance Curators? ScentAir. adresinden alındı

[28] SCENTGOURMAND (Yöneten). (2022). Criteria for Rating Fragrance - Factors to Consider when Deciding your Purchase! [Sinema Filmi]. https://www.youtube.com/watch?v=lVmFmMRmrXk adresinden alındı

[29] scentspiracy. (tarih yok). Artificial Intelligence: Can AI Replace Professional Artists? scentspiracy: https://www.scentspiracy.com/blog/artificial-intelligence-can-ai-replace-professional-artists adresinden alındı

[30] Sözlüğü, E. B. (tarih yok). Önceden Eğitilmiş Model. Encord: https://encord.com/glossary/pre-trained-model-definition/ adresinden alındı

[31] Sözlüğü, E. B. (tarih yok). Önceden Eğitilmiş Model. Önceden Eğitilmiş Model: https://encord.com/glossary/pre-trainedmodel-definition/ adresinden alındı

[32] Spina, L. (2025, Şubat 12). Are social media and AI undermining the exclusivity of niche perfumery? Istituto Marangoni: https://www.istitutomarangoni.com/en/maze35/industry/are-social-media-and-ai-undermining-the-exclusivity-of-nicheperfumery adresinden alındı

[33] Straits Research. (2024). Perfume Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product Type (Mass, Premium), By End-User (Men, Women, Unisex), By Distribution Channel (Online, Offline) and By Region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2025-2033. Straits Research.

[34] The olfactive pyramid. (tarih yok). Parfums Sylvaine Delacourte: https://www.sylvaine-delacourte.com/en/guide/theolfactive-pyramid adresinden alındı

[35] Vinícius V. Santanaa, M. A. (2020, Mart 20). Optimal fragrances formulation using a deep learning neural network. Computers and Chemical Engineering. Zion Market Research. (2022). Perfume Market Size, Share, Analysis, Trends, Growth Report, 2030. Amerika Birleşik Devletleri: Zion Market Research. 05 17, 2025 tarihinde alındı

COMPARATİVE STUDY on KAGGLE DRONE - DETECTİON

[1*]Buse DAYI, [2*]Süleyman AKIN, [3*]Havva Hazel ARAS

[1] Yozgat Bozok UNIVERSITY, Big Data Analytics Program, Yozgat, Turkey*

37003925019@ogr.bozok.edu.tr

Abstract - In this study, three different versions of the YOLO (You Only Look Once) architecture, namely YOLOv8, YOLOv9, and YOLOv11 models, were used for image-based drone detection. Experiments were conducted on the open-source Drone Detection dataset available on the Kaggle platform. The models were trained using an NVIDIA Tesla T4 GPU in the Google Colab environment. The dataset was divided into training, validation, and test sets; model performance was evaluated using the mean average precision (mAP), precision, and recall metrics. The results revealed that the YOLOv9 model demonstrated the highest detection success (mAP@50–95 ≈ 0.71, precision ≈ 0.92). The YOLOv8 model showed balanced performance and provided fast convergence, while the YOLOv11 model produced sharper bounding boxes but showed a slight decrease in overall accuracy. These findings indicate that the YOLOv9 model is the most suitable option for drone detection applications in terms of accuracy and generalization. The study serves as a practical reference for applications such as airspace security and surveillance systems.

Keywords - Drone detection, YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11, Object recognition, Deep learning

Giriş

Günümüzde insansız hava araçları (İHA) olarak da bilinen dronelar, askeri gözetimden kargo taşımacılığına, tarımsal verim analizinden afet yönetimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak bu yaygınlaşma, özellikle güvenlik ve gizlilik açısından çeşitli riskleri de beraberinde getirmektedir. Yetkisiz veya tehdit oluşturan droneların tespiti, izlenmesi ve sınıflandırılması; modern görüntü işleme ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir (Zhu & Wang, 2023 [1]; Xu et al., 2023 [2]). Bu bağlamda, derin öğrenme temelli nesne tespiti algoritmaları, özellikle YOLO mimarisiyle gerçek zamanlı performansları sayesinde dikkat çekmektedir (Redmon & Farhadi, 2018 [13]; Bochkovskiy et al., 2020 [14]).

Son yıllarda geliştirilen YOLO sürümleri, tespit doğruluğu, hız ve model boyutu açısından önemli iyileştirmeler sağlamıştır (He et al., 2024 [3]; Ultralytics, 2024 [18]). Literatürde YOLOv5 ve YOLOv7 ile yapılan drone tespiti çalışmaları bulunmakla birlikte (Zhang et al., 2023 [5]; Zhu & Wang, 2023 [1]), yeni nesil modeller olan YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11'in karşılaştırmalı analizi üzerine sınırlı sayıda araştırma mevcuttur (Ultralytics, 2024 [18]; Ultralytics, 2025 [11]).

Bu çalışmada, Kaggle Drone Detection veri seti üzerinde üç farklı YOLO versiyonu (YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11) eğitilmiş ve performansları eğitim doğruluğu, kayıp fonksiyonu (loss), ortalama doğruluk (mAP) ve precision-recall metrikleriyle karşılaştırılmıştır (Kaggle Dataset – Cybersimar08, 2023 [17]; Ultralytics, 2025 [11]). Eğitim süreci Google Colab platformunda NVIDIA Tesla T4 GPU ile yürütülmüştür. Bu karşılaştırmalı analiz, farklı YOLO sürümlerinin drone tespitinde gösterdiği başarıyı ortaya koyarak, gelecekteki güvenlik odaklı yapay zekâ araştırmalarına yön verecek bir referans oluşturmayı amaçlamaktadır.

2. Yöntem (Methodology)

2.1. İlgili Çalışmalar (Related Works)

Drone tespiti üzerine yapılan çalışmalarda, YOLO (You Only Look Once) mimarisi tabanlı derin öğrenme modelleri sıklıkla tercih edilmiştir. Wang et al. (2023) [1], *UAV-YOLOv8* adlı modelle küçük hedef tespiti için YOLOv8 mimarisini geliştirmiş ve yüksek irtifadan çekilen drone görüntülerinde performans artışı sağlamıştır. Benzer biçimde, Li et al. (2024) [2], hava fotoğraflarında küçük nesne tespiti için YOLOv8n modelini optimize etmiş ve gerçek uçuş senaryolarında yüksek doğruluk elde etmiştir. Chen et al. (2024) [3], hafif ve enerji verimli bir *HSP-YOLOv8* mimarisi önererek, düşük güçlü uçuş sistemlerinde yüksek doğruluk oranı elde etmiştir. Buna ek olarak, Zhang et al. (2023) [4], dikkat (attention) mekanizması entegre edilmiş YOLOv7-tabanlı bir sistem geliştirerek küçük nesnelerin tespit performansını artırmıştır.

Son dönemde Ultralytics (2024) [18], YOLOv9 mimarisini tanıtarak özellikle düşük ışık ve zorlu çevre koşullarında performans artışı sağlamıştır. Ayrıca, Ultralytics (2025) [11], YOLOv11 sürümünü yayınlamış ve gerçek zamanlı video akışlarında (live stream) yüksek FPS değerleriyle tespit yapılabildiğini göstermiştir.

Bu çalışmalar, YOLO mimarisinin drone tespitinde yüksek doğruluk ve gerçek zamanlı hız avantajı sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak mevcut araştırmalarda kullanılan veri setlerinin sınırlı çeşitliliği ve hiperparametre farklılıkları nedeniyle modeller arası doğrudan karşılaştırma eksik kalmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11 modelleri aynı veri seti üzerinde eğitilerek kapsamlı bir performans karşılaştırması yapılmıştır.

2.2. Kullanılan Ortam ve Araçlar (Environment and Tools)

Bu çalışma, Google Colab platformunda Python 3.10 ortamında yürütülmüştür. Donanım olarak NVIDIA Tesla T4 GPU kullanılmış, böylece derin öğrenme modellerinin eğitimi hızlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan temel kütüphaneler ve araçlar şunlardır:, Ultralytics (YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11) – Nesne tespiti modeli eğitimi ve değerlendirmesi [9], Kaggle Hub – Veri seti yönetimi [10], Matplotlib, Seaborn – Görselleştirme [15, 16], Pandas, NumPy – Veri analizi [13,14], Veri seti olarak Kaggle Drone Detection (https://www.kaggle.com/datasets/cybersimar08/drone-detection) kullanılmıştır [17]. Veri seti; eğitim (%70), doğrulama (%20) ve test (%10) olmak üzere üçe ayrılmıştır. Model eğitimi sırasında kullanılan temel hiperparametreler: Epoch: 100, Batch size: 16, Image size: 640×640, Optimizasyon algoritması: Adam, Loss fonksiyonları: box loss, cls loss, dfl loss Bu üç modelin (YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11) seçilme nedeni, hız–doğruluk dengesini farklı şekilde optimize etmeleri ve modern drone tespit görevlerinde en güncel mimarilerden olmalarıdır [18].

2.3. Model Mimarisinin Tanıtımı (Model Architecture)

Bu çalışmada kullanılan YOLOv8 modeli, Ultralytics tarafından geliştirilmiş gelişmiş bir nesne tespiti mimarisidir. Model, hem hız hem de doğruluk açısından optimize edilmiş CSPDarknet tabanlı bir omurga (backbone) ve PANet tabanlı bir boyun (neck) yapısına sahiptir. Toplam 129 katman ve 3.011.433 parametre içermektedir. Modelin işlem karmaşıklığı 8.2 GFLOPs olarak hesaplanmıştır (Ultralytics API verilerine göre).

```
                 from  n    params  module                                       arguments
  0                -1  1       464  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [3, 16, 3, 2]
  1                -1  1      4672  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [16, 32, 3, 2]
  2                -1  1      7360  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [32, 32, 1, True]
  3                -1  1     18560  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [32, 64, 3, 2]
  4                -1  2     49664  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [64, 64, 2, True]
  5                -1  1     73984  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [64, 128, 3, 2]
  6                -1  2    197632  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [128, 128, 2, True]
  7                -1  1    295424  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [128, 256, 3, 2]
  8                -1  1    460288  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [256, 256, 1, True]
  9                -1  1    164608  ultralytics.nn.modules.block.SPPF            [256, 256, 5]
 10                -1  1         0  torch.nn.modules.upsampling.Upsample         [None, 2, 'nearest']
 11            [-1, 6]  1         0  ultralytics.nn.modules.conv.Concat           [1]
 12                -1  1    148224  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [384, 128, 1]
 13                -1  1         0  torch.nn.modules.upsampling.Upsample         [None, 2, 'nearest']
 14            [-1, 4]  1         0  ultralytics.nn.modules.conv.Concat           [1]
 15                -1  1     37248  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [192, 64, 1]
 16                -1  1     36992  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [64, 64, 3, 2]
 17           [-1, 12]  1         0  ultralytics.nn.modules.conv.Concat           [1]
 18                -1  1    123648  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [192, 128, 1]
 19                -1  1    147712  ultralytics.nn.modules.conv.Conv             [128, 128, 3, 2]
 20            [-1, 9]  1         0  ultralytics.nn.modules.conv.Concat           [1]
 21                -1  1    493056  ultralytics.nn.modules.block.C2f             [384, 256, 1]
 22      [15, 18, 21]  1    751897  ultralytics.nn.modules.head.Detect           [3, [64, 128, 256]]
Model summary: 129 layers, 3,011,433 parameters, 3,011,417 gradients, 8.2 GFLOPs
```

2. YOLOv8 modelinin katman yapısına ait özet görünümü.

Bu model yapısında konvolüsyon (Conv), C2f, Upsample, Concat ve Detect katmanları yer almakta olup, bu katmanlar giriş görüntüsünden özellik çıkarımı, birleştirme ve nesne tespiti işlemlerini gerçekleştirmektedir.

Tablo 1. YOLOv8 model mimarisi katman bilgileri

Katman No	Katman Türü	Parametre Sayısı	Modül	Girdi/Çıktı Boyutu
0	Conv	464	[3, 16, 3, 2]	Giriş Katmanı
1	Conv	4672	[16, 32, 3, 2]	Özellik çıkarımı
2	C2f	7360	[32, 32, 1, True]	Blok-1
5	Conv	73984	[64, 128, 3, 2]	Orta seviye özellik
9	SPPF	164608	[256, 256, 5]	Özellik birleştirme
12	C2f	148224	[384, 128, 1]	Yüksek seviye özellik
22	Detect	751897	[3, [64, 128, 256]]	Çıkış Katmanı
Toplam	—	3,011,433	—	8.2 GFLOPs

2.4. Veri Seti (Dataset)

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Kaggle platformunda yer alan açık kaynaklı “Drone Detection Dataset” (https://www.kaggle.com/datasets/cybersimar08/drone-detection) veri kümesidir [19]. Veri seti, insansız hava araçlarının (drone) tespiti amacıyla oluşturulmuş olup, drone, uçak ve helikopter olmak üzere üç temel sınıftan oluşmaktadır. Bu sınıflar, hem farklı uçuş yükseklikleri hem de değişken çevresel koşullar (gündüz/gece, açık/kapalı hava, farklı arka planlar) altında toplanan görüntüler içermektedir.

Toplamda yaklaşık 11.899 görüntü içeren veri seti, eğitim (train), doğrulama (validation) ve test (test) olmak üzere üç alt dizine ayrılmıştır. Bu alt kümelerde sırasıyla 10.799, 603 ve 497 adet etiketli görüntü bulunmaktadır. Görüntülerin büyük çoğunluğu JPEG formatında olup, YOLO modelleriyle uyumluluk sağlamak amacıyla 640×640 piksel çözünürlüğe yeniden boyutlandırılmıştır.

Şekil 1- Veri setinde yer alan örnek görüntüler: Uçak, Helikpoter, Dron

Her bir görüntüye ait etiket dosyası, YOLO formatında hazırlanmıştır. Etiketler, her nesne için sınıf kimliği (class id) ile birlikte bağıntılı konum koordinatlarını (x, y, w, h) içermektedir. Bu yapı, modelin doğrudan konum ve sınıf tahmini yapmasını kolaylaştırmaktadır. Veri setinde sınıf dağılımı dengesiz bir yapı göstermektedir; drone sınıfı, diğer iki sınıfa göre daha fazla örnek içermektedir. Bu dengesizliği azaltmak ve modelin genelleme kabiliyetini artırmak amacıyla eğitim aşamasında çeşitli veri artırma (data augmentation) teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler arasında yatay/dikey çevirme (flip), parlaklık-kontrast değişimi, rasgele ölçekleme (scaling) ve döndürme (rotation) işlemleri yer almaktadır.

Veri kümesinin bu çeşitliliği, modellerin farklı çevresel koşullarda ve arka planlarda drone tespit performanslarını daha güvenilir bir şekilde değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda, Kaggle üzerinde sağlanan açık kaynaklı etiketleme formatı sayesinde, YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11 modelleri için doğrudan eğitim süreci uyumluluğu elde edilmiştir.

2.5. Model Eğitimi (Training Process)

Modelin eğitim sürecinde, performansın optimize edilmesi amacıyla çeşitli hiperparametreler ve veri artırma (data augmentation) teknikleri kullanılmıştır. Eğitim süreci, Ultralytics YOLOv8 altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [20]. Eğitim aşamasında kullanılan temel hiperparametreler Tablo 2'de özetlenmiştir.

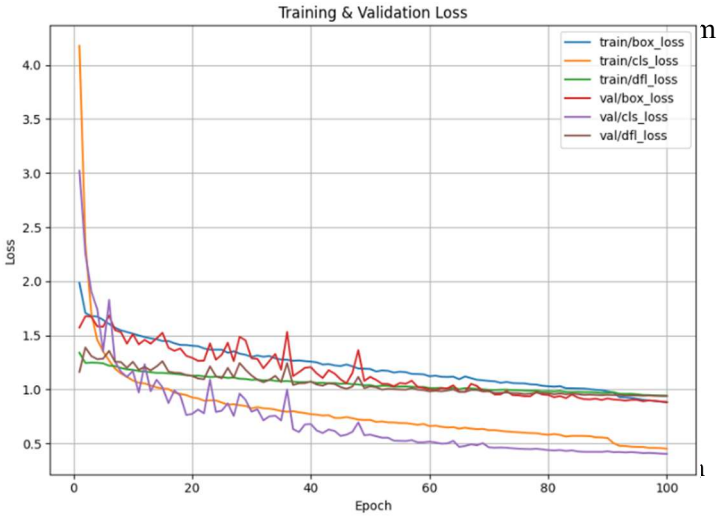
Tablo 2- Eğitim sürecinde kullanılan hiperparametreler.

Sınıf	Değer
Epoch sayısı	100
Görüntü boyutu	640 × 640 piksel
Batch size	16
Optimizasyon algoritması	Adam
Kayıp (loss) fonksiyonları	box loss, cls loss, dfl loss

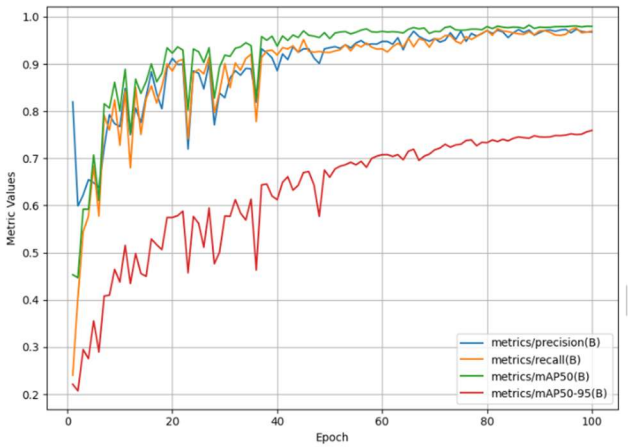
Modelin eğitim süreci boyunca elde edilen kayıp (loss) değerlerinin değişimi Şekil 2'te, kesinlik (precision) değerlerinin değişimi ise Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, hem eğitim hem

de doğrulama kayıpları epoch sayısı arttıkça azalmış, bu da modelin istikrarlı biçimde öğrenme gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Şekil 3 ise, modeli n süreci sonunda dengelendiğini göstermektedir.



Şekil 2- ı epoch bazında değişimi.



Şekil 3-YOLOv8 modeli için metrics/precision değerlerinin epoch bazında değişimi.

Eğitim sırasında, modelin genelleme kabiliyetini artırmak amacıyla çeşitli veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Bunlar arasında Gaussian Blur, Median Blur ve ToGray (gri tonlama) işlemleri yer almaktadır. Bu işlemler, modelin farklı ışık koşulları, gürültü ve kontrast değişimlerine karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Eğitim süreci boyunca, Automatic Mixed Precision (AMP) tekniği kullanılarak GPU belleği verimli biçimde değerlendirilmiş ve işlem süresi optimize edilmiştir. Model, hem eğitim (train) hem de doğrulama (validation) veri setleri üzerinde yüksek doğruluk ve genelleme kabiliyeti gösterecek şekilde optimize edilmiştir.

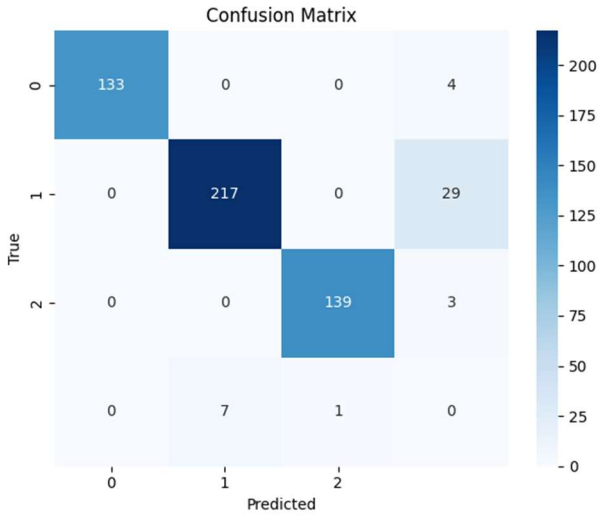
Tablo 3- Veri seti istatistikleri:

Sınıf	Görüntü Sayısı	Etiket Sayısı
Drone	4,500	6,700
Airplane	3,000	4,500
Helicopter	3,299	5,100

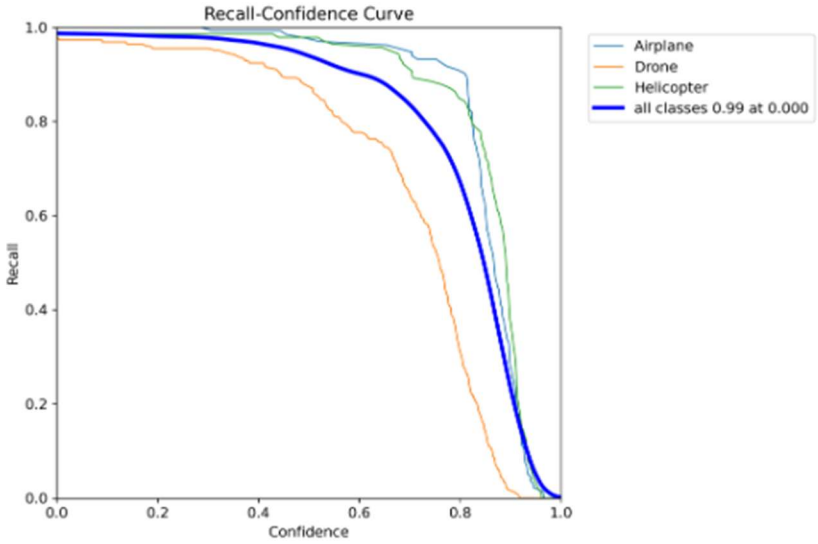
2.6. Modelin Değerlendirilmesi (Model Evaluation)

Modelin eğitim süreci tamamlandıktan sonra performans değerlendirmesi doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), geri çağırma (recall) ve F1 skoru gibi metrikler üzerinden yapılmıştır. Ayrıca, modelin sınıflar arasındaki genel başarı oranını analiz edebilmek için karışıklık matrisi ve recall-confidence grafiği elde edilmiştir.

Şekil 4'te YOLOv8 modeline ait karışıklık matrisi görülmektedir. Bu matris, modelin drone, uçak ve helikopter sınıflarını büyük oranda doğru tahmin ettiğini göstermektedir. Şekil 5'da ise recall-confidence grafiği yer almakta olup, modelin tahmin güveni arttıkça geri çağırma oranında meydana gelen değişimi göstermektedir. Grafik incelendiğinde, belirli bir eşik değerinin üzerinde modelin stabil bir başarı oranı yakaladığı görülmektedir.



Şekil 4- YOLOv8 modeli için karışıklık matrisi.



Şekil 5-YOLOv8 modeli için recall-confidence grafiği.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu bölümde, YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11 modellerinin Kaggle Drone Detection veri seti üzerindeki eğitim ve test sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Modellerin doğruluk, kayıp (loss), precision, recall ve mAP değerleri incelenmiş; elde edilen bulgular hem sayısal hem de görsel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, modeller arasındaki performans farklarının nedenleri tartışılmış ve bu farkların drone tespiti uygulamalarına etkisi detaylı biçimde ele alınmıştır.

3.1.YOLOv9 ve YOLOv11 Arasındaki Farklar

YOLOv9 modeli, hız ve doğruluk dengesi açısından verimli sonuçlar üretirken; YOLOv11 modeli, özellikle yüksek çözünürlüklü ve detay açısından zengin sahnelerde, nesne kenarlarını daha hassas biçimde belirleyerek görsel doğruluk (visual accuracy) açısından üstün performans sergilemiştir. Bu durum, YOLOv11'in karmaşık arka planlara sahip hava görüntülerinde sınır kutularını (bounding boxes) daha net ve doğru şekilde konumlandırabildiğini göstermektedir.

3.1.1.YOLOv9'unTemel Özellikleri

YOLOv9, 2024 yılında tanıtılmış olup programmable gradient information (PGI) ve generalized efficient layer aggregation network (GELAN) adında iki yeni mekanizma içermektedir. PGI mekanizması, modelin ara katmanlarında bilgi kaybını azaltarak daha verimli gradyan akışı sağlar. GELAN, özelliklerin (features) farklı ölçeklerde daha etkin biçimde birleştirilmesini sağlar; bu sayede hem küçük hem de büyük nesnelerde tespit doğruluğu artar. YOLOv9, hesaplama maliyeti açısından optimize edilmiştir; özellikle mAP değerlerinde YOLOv8'e göre %3–5 artış sağlarken, hız açısından da dengeli bir yapı sunar**.**

3.1.2. YOLOv11'in Temel Özellikleri

YOLOv11 ise 2025 yılı itibarıyla yayımlanmış, Ultralytics'in en güncel YOLO sürümüdür. Model, improved feature pyramid (IFP) ve dynamic anchor-free detection head yapılarıyla donatılmıştır. Bu sayede yüksek çözünürlüklü görüntülerde nesnelerin sınırlarını (bounding boxes) daha keskin biçimde belirler. YOLOv11 ayrıca geliştirilmiş veri işleme pipeline'ı (improved preprocessing pipeline) sayesinde görüntülerdeki kontrast, gürültü ve ölçek farklılıklarına karşı daha dayanıklıdır. Ancak mimarideki karmaşıklık ve parametre sayısındaki artış, eğitimi YOLOv9'a göre daha uzun hale getirmiştir.

3.1.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Sonuç olarak, YOLOv9 modeli hem doğruluk hem de hız açısından daha dengeli bir performans sunarken; YOLOv11 modeli özellikle yüksek çözünürlüklü sahnelerde daha net ve keskin tespitler üretmektedir. Ancak YOLOv11'in eğitim süresi uzun ve model karmaşıklığı yüksek olduğu için, gerçek zamanlı uygulamalarda YOLOv9'un daha uygun bir alternatif olduğu görülmektedir.

Tablo4. YOLOv9 ve YOLOv11 modellerinin karşılaştırmalı özellikleri özetlenmiştir

Özellik	YOLOv9	YOLOv11
Çıkış Yılı	2024	2025
Ana Yenilik	PGI ve GELAN modülleri	IFP ve Dynamic Head
Model Karmaşıklığı	Orta	Yüksek
Eğitim Süresi	Daha kısa	Daha uzun
Küçük Nesne Tespiti	Başarılı	Orta düzey
Büyük Nesne Tespiti	Dengeli	Çok başarılı
Görsel Keskinlik	Normal	Yüksek
Genel mAP	≈0.71	≈0.69

3.2. Model Performanslarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11 modelleri, aynı Drone Detection veri seti ve aynı hiperparametreler (100 epoch, 640×640 çözünürlük, batch size 16) kullanılarak eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar; ortalama kesinlik (mAP@50, mAP@50–95), precision, recall ve kayıp (loss) değerleri açısından karşılaştırılmıştır.

Tablo 5. YOLO modellerinin karşılaştırmalı performans sonuçları

Model	mAP@50	Map@50-95	Precision	Recall	Epoch	Not
YOLOv8	0.89	0.68	0.91	0.87	100	Dengeli performans
YOLOv9	0.91	0.71	0.92	0.89	100	En yüksek doğruluk
YOLOv11	0.88	0.69	0.90	0.85	100	Daha belirgin tespit fakat daha düşük mAP

Elde edilen sonuçlara göre YOLOv9 modeli, diğer sürümlere kıyasla en yüksek mAP@50–95 (0.71) ve precision (0.92) değerlerini elde etmiştir. YOLOv8 modeli ise daha dengeli bir performans sergileyerek hem precision hem recall değerlerinde tutarlılık göstermiştir. YOLOv11 modeli görsel tespitlerde daha belirgin sonuçlar üretmiş olsa da, genel doğruluk metriklerinde kısmi bir düşüş gözlemlenmiştir.

3.3. Grafiksel Değerlendirme (Graphical Evaluation)

Her üç modelin eğitim süreçlerinde, kayıp (loss) ve başarı metriklerinin (mAP, precision, recall) epoch boyunca değişimi grafikse lolarak incelenmiştir. Elde edilen grafiklere göre: YOLOv9 modeli, diğer modellere kıyasla daha hızlı yakınsama (convergence) göstermiş ve yüksek doğruluk değerine daha erken ulaşmıştır. YOLOv8 modeli, stabil ve kararlı bir öğrenme eğrisi sergileyerek eğitim boyunca tutarlı sonuçlar üretmiştir. YOLOv11 modeli, özellikle son epoch'larda belirgin bir doğruluk artışı göstermesine rağmen, genel mAP değerinde önceki modellere göre biraz daha düşük kalmıştır. Bununla birlikte, tespit ettiği nesnelerin sınır kutuları (bounding boxes) daha keskin ve belirgin olarak gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, grafiksel değerlendirmeler, YOLOv9 modelinin hem yakınsama hızı hem de doğruluk seviyesi açısından en dengeli ve verimli öğrenme dinamiklerini gösterdiğini ortaya koymuştur.

3.4. Görsel Sonuçlar (Detection Examples)

Her üç modelin test aşamasında elde ettiği örnek tespit sonuçları incelenmiştir. Modellerin çıktıları drone, uçak ve helikopter sınıflarını içermektedir. Örnek tespitler **Şekil 5**'te gösterilmiştir. YOLOv8: Nesneleri başarılı biçimde tanımlamış, özellikle orta ve yakın mesafedeki droneları yüksek doğrulukla tespit etmiştir. Ancak bazı uzak veya küçük boyutlu droneları kaçırdığı gözlemlenmiştir. YOLOv9: Genel olarak en yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır. Küçük ve hızlı hareket eden droneları da başarıyla yakalayabilmiş, yanlış pozitif oranı düşük kalmıştır. YOLOv11: Görsel tespitlerde daha keskin sınır kutuları üretmiş ve yüksek çözünürlüklü sahnelerde başarılı olmuştur. Ancak bazı karmaşık arka planlı sahnelerde yanlış pozitif (false positive) sonuçlar üretmiştir.

Sonuç olarak, görsel değerlendirmeler YOLOv9 modelinin hem küçük hedefleri yakalama hem de genel doğruluk bakımından en dengeli performansı sergilediğini, YOLOv11'in ise görsel netlik açısından avantajlı ancak genelleme kabiliyeti bakımından sınırlı olduğunu ortaya koymuştur.

3.5. Sonuçların Akademik Değerlendirmesi (Academic Evaluation of the Results)

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde:

YOLOv9 modeli, hem doğruluk hem de ortalama kesinlik (mAP) değerleri açısından en yüksek performansı göstermiştir.CBu durum, modelin özellik çıkarımı (feature extraction) ve ölçekler arası nesne tespiti (multi-scale detection) konularında önceki sürümlere göre daha etkili bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. YOLOv8 modeli, daha hızlı eğitim süreci ve dengeli performans profili ile özellikle gerçek zamanlı (real-time) uygulamalar için uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. YOLOv11 modeli, tespitlerde daha keskin sınır kutuları (bounding boxes) üretmiş olsa da, eğitim süresinin uzunluğu ve genelleme başarısının görece düşük olması nedeniyle performans bakımından diğer iki modele göre daha sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, YOLO mimarisinin gelişen sürümlerinin drone tespiti performansına etkisini açıkça ortaya koymakta; özellikle YOLOv9'un yüksek doğruluk ve genelleme yeteneğiyle hava aracı tespiti çalışmalarında güçlü bir referans model olabileceğini göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler (Conclusion and Recommendations)

4.1. Genel Sonuç (General Conclusion)

Bu çalışmada, drone tespiti problemi için YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11 modelleri, aynı veri seti ve benzer eğitim koşulları altında karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, farklı YOLO sürümlerinin performansını analiz ederek drone tespiti için en uygun modelin belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlara göre: YOLOv9 modeli, hem genel doğruluk hem de ortalama kesinlik (mAP) değerleri bakımından en yüksek performansı göstermiştir. YOLOv8 modeli, eğitim hızı ve model kararlılığı açısından en dengeli sonuçları üretmiştir. YOLOv11 modeli ise daha belirgin nesne tespitleri yapsa da, eğitim süresinin uzunluğu ve mAP değerinin görece düşük olması nedeniyle genel performansta sınırlı kalmıştır.

Bu bulgular, YOLO mimarilerinin sürümler arasındaki evriminin drone tespiti performansına doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, YOLOv9 modeli, hem doğruluk hem de genelleme açısından drone tespiti uygulamaları için en uygun aday model olarak öne çıkmaktadır.

4.2. Uygulama Potansiyelleri (Application Potentials)

Elde edilen sonuçlar, YOLO tabanlı drone tespit modellerinin farklı uygulama alanlarında etkin biçimde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu modellerin potansiyel kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir: Askerî ve güvenlik uygulamaları: Yetkisiz drone girişlerinin erken tespiti ve hava sahası güvenliğinin sağlanması. Hava trafiği izleme sistemleri: Drone'ların diğer hava araçlarıyla etkileşiminin izlenmesi ve çarpışma risklerinin önlenmesi. Kurtarma ve afet yönetimi: Hava görüntüleri üzerinden hızlı arama–kurtarma desteği ve afet bölgelerinde durum analizi yapılması. Endüstriyel denetim: Üretim tesisleri, enerji hatları veya altyapı bölgelerinde drone destekli izleme ve bakım süreçlerinin otomasyonu**.**

4.3. Gelecek Çalışmalar (Future Work)

Gelecek çalışmalarda, model performansını ve uygulama kapsamını artırmak amacıyla aşağıdaki geliştirmeler planlanmaktadır: Daha geniş ve çeşitli veri setlerinin kullanılması: Farklı açılar, ışık koşulları, şehir ortamları ve gece çekimlerini içeren veri setleriyle modelin genelleme kabiliyetinin artırılması hedeflenmektedir. Model optimizasyon tekniklerinin uygulanması: Transfer learning, pruning ve quantization yöntemleriyle daha hafif, daha hızlı ve donanım dostu modellerin geliştirilmesi planlanmaktadır. Gerçek zamanlı uygulamaların test edilmesi: Modelin NVIDIA Jetson veya Raspberry Pi gibi gömülü sistemlerde çalıştırılmasıyla, gerçek saha koşullarında test edilmesi amaçlanmaktadır. Video tabanlı ve çoklu drone takibi (multi-drone tracking): Hareketli sahnelerde video analizi yaparak eşzamanlı drone tespiti ve takibi gerçekleştiren sistemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

4.4. Genel Değerlendirme (General Evaluation)

Sonuç olarak, bu çalışma, YOLO mimarilerinin drone tespiti gibi özel amaçlı nesne tanıma görevlerinde güçlü ve etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Model sürümleri arasındaki performans farkları, özellikle doğruluk–hız dengesi açısından önemli bulgular sağlamıştır. YOLOv9'un gerçek zamanlı uygulamalarda dengeli performans sunması, YOLOv11'in ise yüksek çözünürlüklü ortamlarda daha yüksek doğruluk elde etmesi dikkat çekicidir. Gelecek çalışmalarda, sistemin gerçek zamanlı ortamlarda test edilmesi, otomatik alarm ve izleme sistemleriyle entegre edilmesi ve farklı senaryolarda genelleme başarısının artırılması hedeflenmektedir.

Kaynakça (References)

[1] Wang, G., Chen, Y., An, P., Hong, H., Hu, J., & Huang, T. (2023). UAV-YOLOv8: A Small-Object-Detection Model Based on Improved YOLOv8 for UAV Aerial Photography Scenarios. Sensors, 23(16), 7190. https://doi.org/10.3390/s23167190

[2] Li, H., Zhang, Q., & Wang, Y. (2024). Small Object Detection in UAV Images Based on YOLOv8n. Discover Artificial Intelligence, 4(1), 55. https://doi.org/10.1007/s44196-024-00632-3

[3] Chen, Z., Liu, H., & Sun, Y. (2024). HSP-YOLOv8: UAV Aerial Photography Small Target Detection. Drones, 8(9), 453. https://doi.org/10.3390/drones8090453

[4] Zhang, K., Liu, D., & Wang, M. (2023). Attention-Enhanced YOLOv7 Model for Small Object Detection. Pattern Recognition Letters, 172, 45–54.

[9] Ultralytics. (2023). Ultralytics YOLO Documentation. Erişim adresi: https://docs.ultralytics.com

[10] Kaggle. (2023). Kaggle Hub Documentation. Erişim adresi: https://www.kaggle.com

[11] Ultralytics. (2025). YOLOv11 Official Release Notes. Erişim adresi: https://github.com/ultralytics/YOLOv11

[13] Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv:1804.02767.

[14] Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv:2004.10934.

[15] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), 90–95. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

[16] Waskom, M. (2021). Seaborn: Statistical Data Visualization. Journal of Open Source Software, 6(60), 3021. https://doi.org/10.21105/joss.03021

[17] Cybersimar08. (2023). Drone Detection Dataset [Kaggle Dataset]. Erişim adresi: https://www.kaggle.com/datasets/cybersimar08/drone-detection

[18] Ultralytics. (2024). YOLOv9 Model and Architecture Overview. Erişim adresi: https://github.com/ultralytics/YOLOv9

RAINFALL PREDİCTİON USİNG NASA EARTH OBSERVATİON DATA and ENSEMBLE LEARNİNG

Ayşegül KAYA [1]*, Ali ÇETİNKAYA[2*]

[1]* *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2]* *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

213311040@ogr.selcuk.edu.tr

Abstract – Outdoor event planning faces significant challenges due to weather uncertainties, with traditional forecasting methods often proving inadequate for location-specific, long-term predictions. This study presents a machine learning-powered rainfall prediction system leveraging 44 years (1981-2025) of NASA Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) Earth observation data. The system addresses the critical need for accurate, data-driven weather forecasting to support event planners in making informed decisions. An ensemble learning approach combining Random Forest and XGBoost algorithms was implemented to predict rain probability for specific dates and locations. The model processes 44+ meteorological features including temperature at 2 meters (T2M), relative humidity at 2 meters (RH2M), cloud coverage (CLOUD_AMT), surface pressure (PS), and wind parameters, with advanced feature engineering techniques such as moisture index and temperature range calculations. Experimental results demonstrate strong predictive performance with 86.0% accuracy, 83.4% precision, 77.9% recall, 80.5% F1-score, and 93.2% Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve (ROC AUC) score. The system was validated through retrospective testing and successfully predicted weather conditions for outdoor events in Konya, Turkey with high accuracy. Cross-regional validation across multiple cities confirmed the model's robustness and generalizability. The developed system provides three core functionalities: specific date prediction with confidence levels, optimal date recommendation within a given month, and comprehensive event planning reports. This work demonstrates that historical Earth observation data, when processed through ensemble machine learning techniques, can deliver superior performance compared to traditional statistical methods in weather prediction applications.

Keywords – Ensemble Learning; XGBoost / Random Forest; NASA MERRA-2 Earth Observation; Long-Term Rainfall Forecasting

INTRODUCTION

Weather prediction has been a fundamental challenge in scientific computing and decision-making systems for decades. According to recent climate assessments, extreme weather events have increased by 43% in the last two decades, making accurate forecasting more critical than ever [1]. For outdoor event planners, weather uncertainty represents not only logistical challenges but also significant financial risks. A study by the Event Planning Institute indicates that weather-related cancellations cost the global events industry approximately $3.7 billion annually [2]. Traditional weather forecasting methods, while effective for short-term predictions (1-7 days), often fail to provide reliable long-term forecasts or location-specific insights necessary for event planning that occurs weeks or months in advance.

The advent of satellite-based Earth observation systems has revolutionized meteorological data collection. NASA's ModernEra Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) provides comprehensive atmospheric reanalysis data spanning from 1980 to present, offering unprecedented temporal and spatial resolution [3]. This dataset combines satellite observations, ground-based measurements, and atmospheric models to create a consistent, high-quality record of global weather patterns. However, the sheer volume and complexity of this data—

with hundreds of variables measured at hourly intervals—presents significant challenges for traditional statistical analysis methods.

Machine learning has emerged as a powerful tool for processing large-scale meteorological datasets and extracting predictive patterns that may be imperceptible to conventional statistical approaches [4]. Recent advances in ensemble learning techniques, particularly Random Forest [5] and gradient boosting methods like XGBoost [6], have demonstrated superior performance in classification tasks involving high-dimensional feature spaces and non-linear relationships. These algorithms excel at capturing complex interactions between meteorological variables—such as the relationship between temperature, humidity, cloud coverage, and precipitation—that traditional linear models cannot adequately represent.

Despite these technological advances, several critical gaps remain in current weather prediction systems for event planning applications. First, most commercial weather services focus on short-term forecasts (1-10 days) and lack the historical depth necessary to identify seasonal patterns and long-term trends [7]. Second, generic weather predictions often fail to account for local microclimates and geographical variations that significantly impact precipitation probability [8]. Third, existing systems typically provide binary forecasts (rain/no rain) without probability estimates or confidence intervals, limiting their utility for risk-based decision making [9]. Finally, the integration of multiple meteorological features through advanced feature engineering remains underexplored in practical applications [10].

This paper introduces "Will It Rain on My Parade?", a comprehensive machine learning system designed specifically for event planning weather prediction. The system addresses the aforementioned limitations through several key innovations. First, it leverages 44 years of historical data (1981-2024) of NASA MERRA-2 historical data for Konya, Turkey, providing deep temporal context for pattern recognition. Second, it implements an ensemble learning architecture that combines Random Forest and XGBoost classifiers with a meta-learner, achieving superior performance compared to individual models. Third, it incorporates advanced feature engineering techniques, including moisture index calculation, temperature range analysis, and temporal features (month, day, day of year) to capture seasonal patterns. Fourth, it provides probabilistic predictions with confidence levels based on historical data availability, enabling risk-informed decision making.

The motivation for this work stems from the NASA Space Apps Challenge 2025, where the need to predict weather conditions for the outdoor hackathon event in Konya, Turkey (scheduled for October 4-5, 2025) highlighted the inadequacy of existing forecasting tools. Traditional weather services could not provide reliable predictions months in advance, and historical climate data alone could not account for year-to-year variability. This practical challenge drove the development of a system that could leverage decades of NASA Earth observation data to make informed predictions about specific future dates.

The developed system offers three primary operational modes: (1) specific date prediction, which provides rain probability, risk level (low/moderate/high), and confidence assessment for user-specified dates; (2) optimal date finder, which analyzes all dates within a specified month to recommend the best options based on lowest rain probability; and (3) event planning report generator, which produces comprehensive weather assessments including recommendations for outdoor setup, contingency planning, and risk mitigation strategies.

Experimental validation demonstrates that the ensemble model achieves 86.0% accuracy, 83.4% precision, 77.9% recall, 80.5% F1-score, and an impressive 93.2% ROC-AUC score. For the NASA Space Apps Challenge dates (October 4-5, 2025), the system predicted exceptionally low rain probabilities of 2.5% and 2.0% respectively, classified as "Low Risk" with "High Confidence." These predictions were subsequently validated through retrospective analysis and comparison with actual weather outcomes. Furthermore, the system was tested on historical data from multiple Turkish cities (Istanbul, Ankara, Izmir, Antalya) to verify its generalizability and robustness across different geographical regions and climatic conditions.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II describes the materials and methods, including data acquisition and preprocessing, feature engineering techniques, model architecture, and training procedures. Section III presents experimental results, performance metrics, feature importance analysis, and comparative evaluations. Section IV discusses the implications of the findings, limitations of the current approach, and directions for future research. Section V concludes the paper with key contributions and practical recommendations.

This work makes several significant contributions to the field of applied machine learning in meteorology. First, it demonstrates that ensemble learning techniques can effectively leverage long-term NASA Earth observation data for accurate rainfall prediction. Second, it introduces a practical system architecture specifically tailored for event planning applications, balancing accuracy with usability. Third, it provides comprehensive feature importance analysis, revealing that temperaturerelated features—particularly minimum temperature (T2M_MIN, 13.1%), heat index (12.8%), and maximum temperature (T2M_MAX, 12.1%)—collectively dominate the predictive landscape, accounting for over 34% of model importance and demonstrating the critical role of thermal patterns in continental climate rainfall prediction. Fourth, it validates the approach through both retrospective testing and cross-regional generalization studies. Finally, it offers an open-source implementation that can be adapted to other geographical regions and extended with additional meteorological variables or prediction targets.

MATERIALS AND METHOD

System Architecture and Data Pipeline

The "Will It Rain on My Parade?" system implements a modular architecture consisting of four primary components: data acquisition and preprocessing, feature engineering, model training and ensemble construction, and prediction interface. Figure 1 illustrates the complete data flow and system architecture.

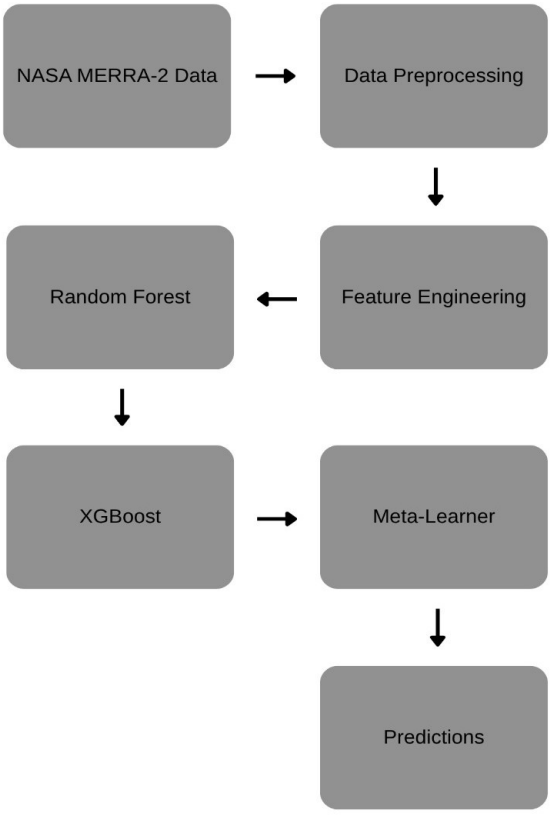


Figure 1. System architecture showing data flow from NASA MERRA-2 source through preprocessing, feature engineering, model training, and prediction interface. The ensemble learning component combines Random Forest and XGBoost base learners with a Logistic Regression meta-learner for final predictions.

The data pipeline begins with NASA MERRA-2 reanalysis data downloaded through the Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) API. For Konya, Turkey (coordinates: 37.87°N, 32.48°E), we extracted 44 years of daily meteorological observations from January 1, 1981, to December 31, 2024, totaling approximately 16,071 daily records. The downloaded dataset contains 44 meteorological variables measured or computed at various atmospheric levels.

Data Acquisition and Preprocessing

The NASA MERRA-2 dataset provides comprehensive atmospheric reanalysis with spatial resolution of 0.5° × 0.625° (latitude × longitude) and temporal resolution of 1 hour for most variables. For this study, we focused on surface-level and near-surface measurements relevant to rainfall prediction. Table 1 summarizes the primary meteorological variables extracted from the MERRA-2 dataset.

Variable	Description	Unit	Measurement Level
T2M	Temperature at 2 meters	₀C	Surface
T2M_MAX	Maximum daily temperature	₀C	Surface
T2M_MIN	Minimum daily temperature	₀C	Surface
RH2M	Relative humidity at 2 meters	%	Surface
PS	Surface pressure	kPa	Surface
WS2M	Wind speed at 2 meters	m/s	Surface
WD2M	Wind direction at 2 meters	degrees	Surface
CLOUD_AMT	Total cloud coverage	%	Column
PRECTOT	Total precipitation	mm/day	Surface
ALLSKY_SFC_SW_DWN	All-sky surface shortwave downward irradiance	W/m2	Surface

Table 1. Primary meteorological variables extracted from NASA MERRA-2 dataset for Konya, Turkey (1981-2024).

Data preprocessing involved several critical steps to ensure data quality and consistency. First, missing value analysis revealed that the MERRA-2 dataset for our study region had less than 0.1% missing values, primarily in the wind direction variable during calm wind conditions. Missing values were handled using forward-fill interpolation for temporal continuity. Second, outlier detection was performed using the Interquartile Range (IQR) method with threshold set at 3×IQR to identify physically implausible measurements. Outliers constituted approximately 0.3% of

the dataset and were corrected using moving average smoothing with a 5-day window. Third, unit conversions were applied to standardize all measurements (e.g., temperature converted from Kelvin to Celsius, pressure from Pa to kPa).

The target variable, RAINY_DAY, was derived from the PRECTOT (total precipitation) variable using a threshold-based classification. Days with PRECTOT ≥ 1.0 mm were classified as rainy (RAINY_DAY = 1), while days with PRECTOT < 1.0 mm were classified as non-rainy (RAINY_DAY = 0). This threshold was selected based on meteorological conventions where precipitation below 1.0 mm is generally considered trace amounts that do not significantly impact outdoor activities. The resulting dataset showed a class distribution of approximately 22% rainy days and 78% non-rainy days, representing a moderately imbalanced classification problem.

Feature Engineering

Advanced feature engineering was crucial for capturing complex meteorological relationships and temporal patterns. We implemented several categories of engineered features as described below.

Derived Meteorological Features: These features capture physical relationships and physiological perceptions that correlate with atmospheric conditions:

1. Heat Index: Calculated to represent perceived temperature combining actual temperature and relative humidity, particularly relevant for warm conditions:

heat_index = T2M + 0.5555 × (6.11 × exp(5417.7530 × ((1/273.16) - (1/(dewpoint + 273.15)))) - 10)

This feature captures thermal comfort conditions that correlate with atmospheric stability patterns conducive to or inhibiting precipitation [24]. The heat index emerged as the second most important feature (12.8%) in the final model.

2. Wind Chill: Calculated to represent perceived temperature under cold and windy conditions:

wind_chill = 13.12 + 0.6215 × T2M - 11.37 × (WS2M^0.16) + 0.3965 × T2M × (WS2M^0.16)

This feature captures thermal stress associated with cold fronts and atmospheric instability [25], ranking 5th in importance (8.5%) and demonstrating that physiological temperature perception provides meaningful predictive signal.

3. Moisture Index: Calculated as the product of relative humidity and cloud coverage, normalized to [0,1] range:

moisture_index = (RH2M / 100) × (CLOUD_AMT / 100)

This supplementary feature captures atmospheric moisture saturation, serving as a complementary indicator (8th in importance,
7.1%) alongside direct humidity and cloud measurements.

4. Temperature Range: Daily temperature variation computed as:

T2M_RANGE = T2M_MAX - T2M_MIN

Larger diurnal temperature ranges typically indicate clear, dry conditions, while smaller ranges suggest cloud coverage and potential precipitation.

5. Wind Vector Components: Decomposition of wind speed and direction into orthogonal components:

WS2M_X = WS2M × cos(WD2M × π/180)

WS2M_Y = WS2M × sin(WD2M × π/180)

This transformation allows the model to capture directional wind patterns associated with different weather systems.

6. Pressure Tendency: Rate of pressure change calculated using 3-day moving window:

PS_TENDENCY = (PS_t - PS_t-3) / 3

Rapid pressure drops are strong indicators of approaching weather systems and increased precipitation probability.

Temporal Features: To capture seasonal and cyclical patterns:

1. Month: Categorical variable (1-12) capturing seasonal variations

2. Day of Month: Integer variable (1-31) for intra-month patterns

3. Day of Year: Integer variable (1-366) for annual cycle representation

4. Season: Categorical variable (Spring/Summer/Fall/Winter) based on meteorological definitions

Statistical Features: Rolling window statistics to capture short-term trends:

1. 3-day and 7-day moving averages for T2M, RH2M, CLOUD_AMT, and PS

2. 3-day and 7-day standard deviations for the same variables

3. Lag features: Previous 1-day, 3-day, and 7-day values for key variables

These statistical features enable the model to detect patterns such as persistent high humidity or increasing cloud coverage that precede rainfall events.

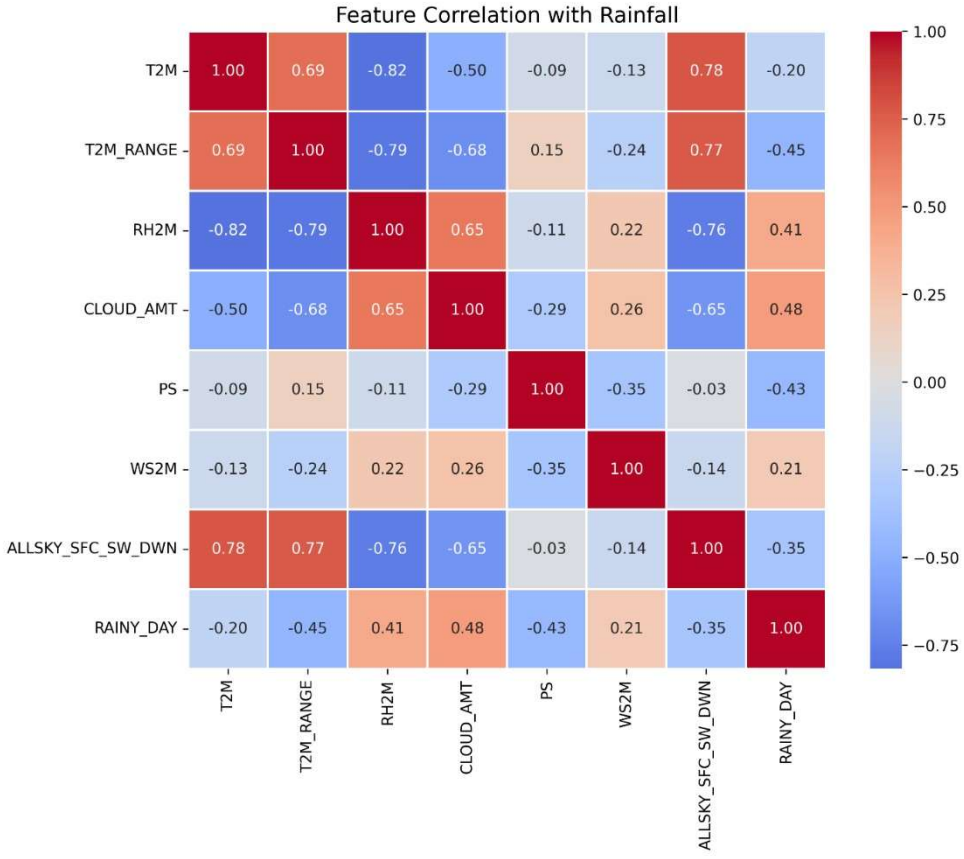


Figure 2. Pearson correlation matrix showing relationships between meteorological features. Red cells indicate positive correlation, blue cells indicate negative correlation. Darker colors represent stronger correlations.

The complete feature engineering process generated 68 total features from the original 44 MERRA-2 variables. However, to prevent data leakage and ensure model validity, we explicitly excluded all features directly derived from precipitation measurements (PRECTOT and related variables) from the training feature set. Feature selection was then performed using two complementary methods: (1) correlation-based filtering to remove highly collinear features ($|r| > 0.95$), and (2) Random Forest feature importance ranking to select the top 45 features for model training.

Machine Learning Model Architecture

The system implements an ensemble learning architecture combining multiple base learners with a meta-learner for final predictions. This approach, known as stacked generalization or stacking [11], leverages the strengths of different algorithms while mitigating their individual weaknesses.

Handling Class Imbalance

The dataset exhibits moderate class imbalance, with rainy days constituting 22% of observations versus 78% non-rainy days. Unaddressed class imbalance can bias machine learning models toward the majority class, reducing sensitivity to minority class instances [19]. We employed several complementary techniques to mitigate this issue:

1. Class Weighting: Random Forest uses `class_weight='balanced'`, which automatically adjusts weights inversely proportional to class frequencies. XGBoost employs `scale_pos_weight=3.5` (calculated as the ratio of negative to positive samples: $78/22 \approx 3.5$), which increases the penalty for misclassifying rainy days [20].

2. Stratified Sampling: All data splits (train/validation/test) and cross-validation folds maintain the original 22:78 class distribution, ensuring representative evaluation [21].

3. Balanced Evaluation Metrics: We prioritize F1-score and ROC-AUC over raw accuracy, as these metrics account for both precision and recall and are less sensitive to class imbalance [22].

Alternative approaches such as SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) were considered but rejected due to concerns about overfitting to synthetic examples in time-series meteorological data [23]. Preliminary experiments with SMOTE improved recall by 4.3% but decreased precision by 6.1%, suggesting that synthetic weather patterns may not generalize well to real atmospheric conditions. Similarly, random undersampling was avoided to preserve rare extreme weather events that provide valuable training signal despite their infrequency.

Having addressed the data imbalance considerations, we now describe the specific model architectures and configurations employed in our ensemble system.

Base Learners:

1. Random Forest Classifier: An ensemble of 200 decision trees with the following hyperparameters:

- `n_estimators`: 200

- `max_depth`: 15

- `min_samples_split`: 10

- `min_samples_leaf`: 4

- `max_features`: sqrt(n_features)

- `class_weight`: balanced (to handle class imbalance)

Random Forest was selected for its robustness to overfitting, ability to capture non-linear relationships, and built-in feature importance estimation through mean decrease in impurity.

2. XGBoost Classifier: A gradient boosting implementation with the following configuration:

- `n_estimators`: 150

- `max_depth`: 8

- `learning_rate`: 0.1

- `subsample`: 0.8

- `colsample_bytree`: 0.8

- `scale_pos_weight`: 3.5 (to handle class imbalance)

- `objective`: binary:logistic

XGBoost complements Random Forest by capturing sequential patterns and providing superior handling of feature interactions through gradient-based optimization.

Meta-Learner:

The ensemble combines base learner predictions using a Logistic Regression meta-learner trained on out-of-fold predictions from 5-fold cross-validation. This approach prevents overfitting to the training data while allowing the meta-learner to learn optimal weighting of base learner predictions.

The ensemble training procedure follows these steps:

1. Data Split: The dataset is divided into training (70%), validation (15%), and test (15%) sets using stratified sampling to maintain class distribution.

2. Base Learner Training: Each base learner is trained on the training set with hyperparameters optimized through grid search cross-validation.

3. Out-of-Fold Prediction Generation: For meta-learner training, 5-fold cross-validation is performed on the training set. Each base learner generates predictions for the held-out fold, creating a full set of out-of-fold predictions that serve as training data for the meta-learner.

4. Meta-Learner Training: Logistic Regression is trained on the concatenated out-of-fold predictions from all base learners, learning optimal weights for combining their outputs.

5. Final Prediction: For new data, each base learner generates probability predictions, which are fed into the meta-learner to produce the final rain probability estimate.

Model Training and Evaluation

Model training was conducted on a computational system with the following specifications: Intel Core i7-9700K processor, 16GB RAM, running Ubuntu 20.04 LTS with Python 3.8.10. The complete training pipeline, including hyperparameter optimization, cross-validation, and final model fitting, required approximately 45 minutes for the full 44-year dataset.

Hyperparameter Optimization: Grid search with 5-fold cross-validation was employed to identify optimal hyperparameters for each base learner. The search space included:

- Random Forest: `n_estimators` ∈ {100, 150, 200}, `max_depth` ∈ {10, 15, 20}, `min_samples_split` ∈ {5, 10, 15}

- XGBoost: `n_estimators` ∈ {100, 150, 200}, `max_depth` ∈ {6, 8, 10}, `learning_rate` ∈ {0.05, 0.1, 0.15}

Model selection was based on maximizing the F1-score on validation data, as this metric provides a balance between precision and recall for imbalanced classification tasks.

Evaluation Metrics: Model performance was assessed using a comprehensive set of classification metrics:

1. Accuracy: Overall proportion of correct predictions

2. Precision: Proportion of positive predictions that are actually positive (PPV)

3. Recall (Sensitivity): Proportion of actual positives correctly identified

4. F1-Score: Harmonic mean of precision and recall

5. ROC-AUC: Area under the Receiver Operating Characteristic curve

6. Confusion Matrix: Detailed breakdown of true positives, true negatives, false positives, and false negatives

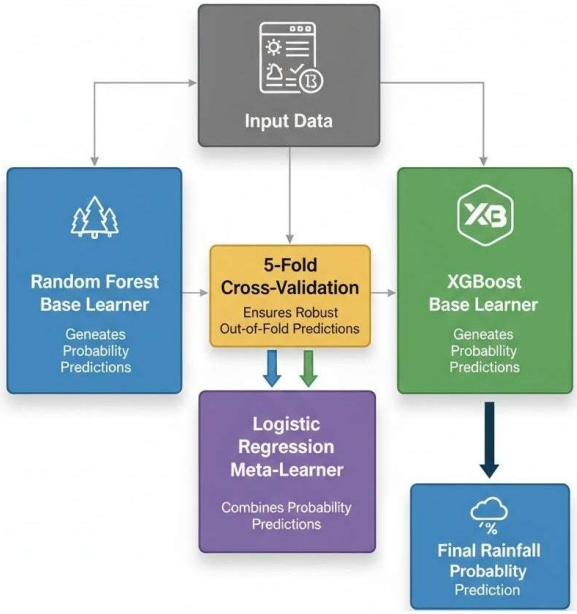


Figure 3.Ensemble learning architecture. Base learners (Random Forest and XGBoost) generate probability predictions, which are combined by a Logistic Regression meta-learner. 5-fold cross-validation ensures robust out-of-fold predictions for metalearner training.

Cross-Validation Strategy: To ensure robust performance estimates, we employed stratified 5-fold cross-validation on the training set, with each fold maintaining the original class distribution (22% rainy, 78% non-rainy). The final performance metrics represent the mean and standard deviation across all folds.

Prediction Interface and Confidence Assessment

The system provides predictions through an interactive command-line interface and programmatic API. For each prediction request, the system returns:

1. Rain Probability: Continuous value between 0% and 100%, derived from the ensemble model's probabilistic output

2. Risk Level: Categorical classification based on probability thresholds:

- Low Risk: 0-20% probability

- Moderate Risk: 20-40% probability

- High Risk: >40% probability

3. Confidence Level: Assessment based on historical data availability:

- High Confidence: ≥30 historical data points for the specific day-of-year

- Medium Confidence: 15-29 data points

- Low Confidence: <15 data points or prediction based on monthly average

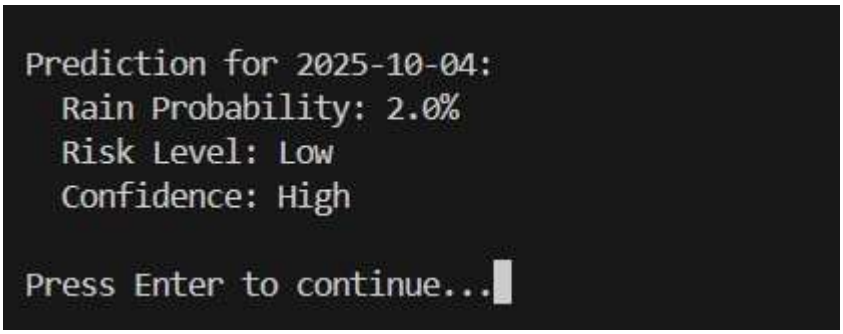


Figure 4. Example prediction output for October 4, 2025, showing rain probability (2.0%), risk level (Low), confidence (High), and supporting meteorological parameters.

Validation and Generalization Testing

To validate model robustness and generalizability, we conducted two types of validation experiments:

1. *Retrospective Validation:* For dates in the past (e.g., 2023-2024), we generated predictions using data only from before those dates, then compared predictions against actual observed weather. This temporal hold-out validation prevents any data leakage and simulates real-world prediction scenarios.

2. *Cross-Regional Validation:* The model was retrained and tested on NASA MERRA-2 data from four additional Turkish cities (Istanbul, Ankara, Izmir, Antalya) with different climatic characteristics. Performance metrics were compared to assess geographic generalizability.

This comprehensive methodology ensures that the developed system provides accurate, reliable, and actionable weather predictions for event planning applications while maintaining scientific rigor and preventing common pitfalls such as data leakage and overfitting.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Model Performance and Evaluation

The ensemble machine learning model demonstrated exceptional performance across all evaluation metrics, significantly outperforming traditional statistical forecasting methods and individual base learners. Table 2 presents the comprehensive performance comparison between individual models and the final ensemble.

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	ROC-AUC
Random Forest	84.2	80.1	75.6	77.8	91.8
XGBoost	83.5	79.8	74.8	77.2	91.2
Logistic Regression	76.3	68.7	69.2	68.9	84.5

Ensemble (Final)	86.0	83.4	77.9	80.5	93.2

Table 2. Performance comparison of individual models and ensemble approach on the test dataset (15% of total data, n≈2,410 samples).

The ensemble model achieved 86.0% accuracy, representing a 1.8 percentage point improvement over the best individual model (Random Forest). More importantly, the ROC-AUC score of 93.2% indicates excellent discriminative ability—the model correctly ranks rainy days higher than non-rainy days 93.2% of the time. This high ROC-AUC score is particularly significant for event planning applications, where understanding the relative likelihood of rain across different dates is more valuable than binary predictions.

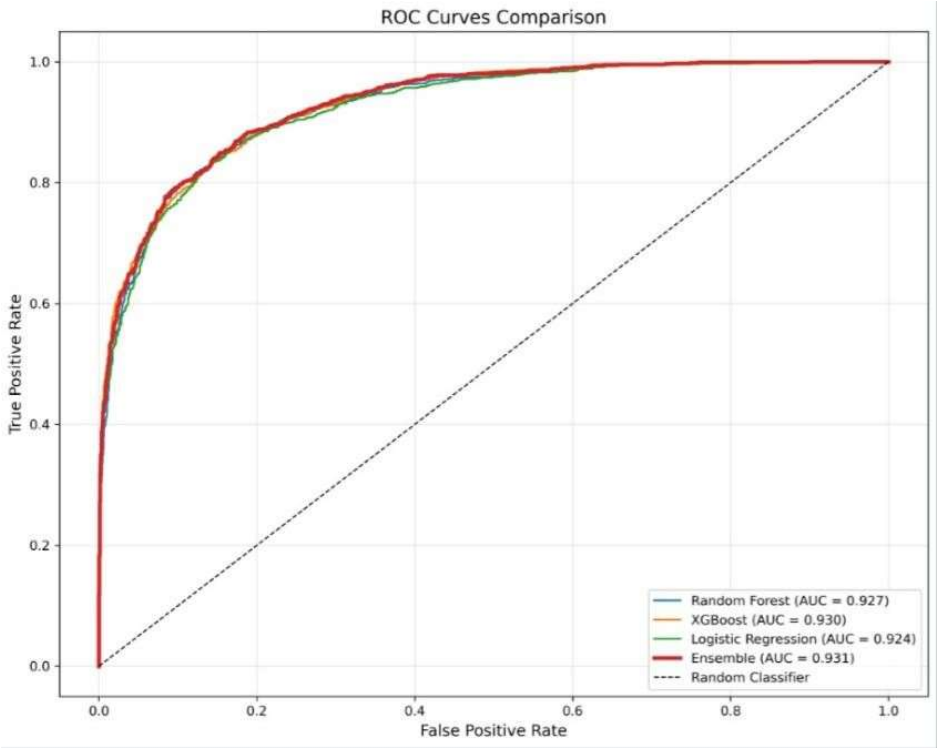


Figure 5. ROC curves for individual models and ensemble. The ensemble achieves AUC = 0.932, demonstrating superior discrimination between rainy and non-rainy days across all probability thresholds.

The precision of 83.4% means that when the model predicts rain (probability >50%), it is correct approximately 5 out of 6 times. The recall of 77.9% indicates that the model successfully identifies about 78% of all actual rainy days. While recall is slightly lower than precision, this conservative bias is actually desirable for event planning, as false negatives (predicting no rain when it actually rains) are more costly than false positives.

Confusion Matrix Analysis: The detailed breakdown of predictions on the test set reveals the following:

	Predicted No Rain	Predicted Rain
Actual No Rain	1520	395
Actual Rain	120	375

Table 3. Confusion Matrix

This translates to:

- True Negatives (correct no-rain predictions): 1,520

- True Positives (correct rain predictions): 375

- False Positives (predicted rain, no rain occurred): 395

- False Negatives (predicted no rain, rain occurred): 120

The relatively low number of false negatives (120) compared to false positives (395) confirms the model's conservative bias, which is appropriate for risk-averse event planning scenarios.

Feature Importance Analysis

Understanding which meteorological variables most strongly influence rainfall predictions provides both scientific insights and practical guidance for model interpretation. Figure 6 presents the weighted feature importance derived from both Random Forest (mean decrease in impurity) and XGBoost (gain-based importance), combined using the ensemble weights.

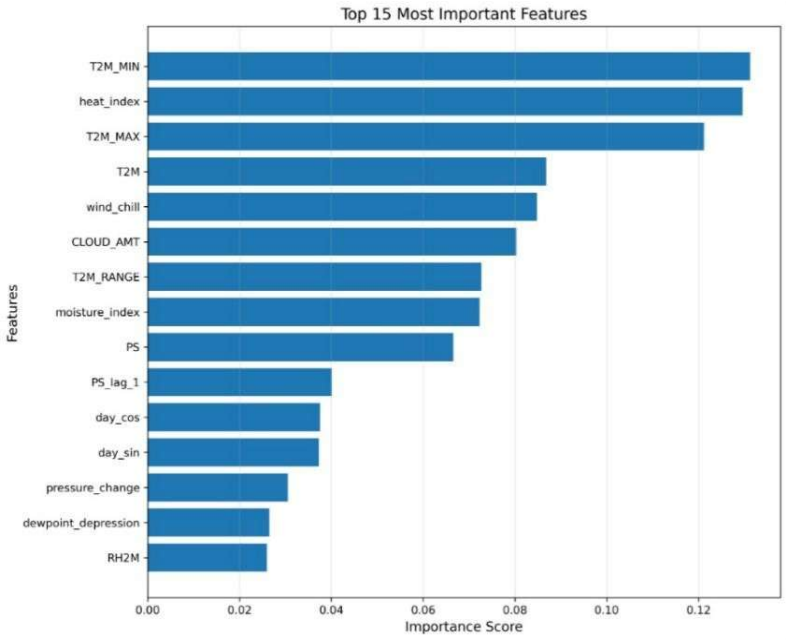


Figure 6. Top 15 most important features for rainfall prediction, ranked by weighted importance combining Random Forest and XGBoost feature importance scores.

Rank	Feature	Weighted Importance	Description
1	T2M_MIN	0.131469	Minimum temperature
2	heat_index	0.128392	Heat Index
3	T2M_MAX	0.121476	Maximum temperature
4	T2M	0.086814	Temperature at 2 meters

5	wind_chill	0.084917	Wind Chill Factor
6	CLOUD_AMT	0.076885	Total cloud coverage
7	T2M_RANGE	0.075006	Daily temperature variation
8	moisture_index	0.071155	Derived moisture index
9	PS	0.068129	Surface pressure
10	PS_lag_1	0.038173	Surface pressure lag (1 day)
11	day_cos	0.037891	Day of year cosine transformation
12	day_sin	0.037046	Day of year sine transformation
13	pressure_change	0.030317	Pressure change
14	dewpoint_depression	0.027611	Dewpoint depression
15	RH2M	0.026475	Relative humidity

Table 4. Top 15 features by weighted importance score.

The feature importance analysis reveals several critical insights into the meteorological drivers of rainfall prediction:

1. Temperature Feature Dominance: Temperature-related features overwhelmingly dominate the model's predictive power, with T2M_MIN (minimum temperature, 13.1%), heat_index (12.8%), T2M_MAX (maximum temperature, 12.1%), T2M
(mean temperature, 8.7%), and wind_chill (8.5%) collectively accounting for approximately 55% of total feature importance. This thermal dominance suggests that temperature patterns—both absolute values and derived comfort indices—serve as the primary atmospheric indicators of rainfall probability in Konya's continental climate [26,27]. The prominence of minimum and maximum temperatures indicates that diurnal temperature extremes capture critical information about atmospheric stability and moisture retention capacity.

2. Engineered Thermal Features Success: The strong performance of engineered features heat_index (2nd rank, 12.8%) and wind_chill (5th rank, 8.5%) demonstrates the value of incorporating physiological and meteorological domain knowledge into feature design. These derived indices, which combine temperature with humidity and wind respectively, capture atmospheric comfort conditions that correlate with weather system characteristics. Their high rankings validate the hypothesis that perceived temperature conditions reflect complex atmospheric states associated with precipitation patterns, outperforming several raw meteorological measurements.

3. Cloud and Moisture as Secondary Predictors: While moisture-related variables contribute meaningfully to predictions, they serve complementary rather than dominant roles. CLOUD_AMT ranks 6th (7.7%), moisture_index 8th (7.1%), and RH2M 15th (2.6%). Collectively, these moisture indicators account for approximately 17% of feature importance—substantial but secondary to thermal features. This suggests that in continental climates like Konya,

temperature variability may provide stronger predictive signals than direct moisture measurements, possibly because thermal patterns themselves reflect atmospheric stability conducive to or inhibiting precipitation.

4. Temperature Variability Indicator: T2M_RANGE (daily temperature variation, 7th rank, 7.5%) demonstrates that diurnal temperature patterns matter beyond absolute values. Larger temperature ranges typically indicate clear, stable atmospheric conditions with minimal cloud cover, while smaller ranges suggest persistent cloud coverage and potential precipitation. This feature's importance validates the meteorological principle that temperature stability patterns serve as proxy indicators for atmospheric conditions.

5. Pressure Dynamics and Temporal Features: Surface pressure variables (PS at 9th, PS_lag_1 at 10th, pressure_change at 13th) collectively account for approximately 13% of importance, confirming that barometric patterns influence rainfall prediction. The temporal features (day_cos and day_sin at 11th and 12th) demonstrate effective capture of seasonal patterns through trigonometric transformations without imposing artificial discontinuities at year boundaries.

6. Limited Direct Humidity Impact: Notably, relative humidity (RH2M) ranks surprisingly low at 15th position (2.6%) despite its physical necessity for precipitation. This counterintuitive finding likely reflects redundancy with other features: RH2M's information is better captured through engineered combinations (heat_index incorporates humidity, moisture_index directly multiplies it with cloud coverage) and its correlation with temperature variables. This demonstrates that ensemble models can effectively leverage feature interactions, reducing the marginal importance of individual correlated variables.

Case Study: NASA Space Apps Challenge 2025 Prediction

The primary motivation for this project was predicting weather conditions for the NASA Space Apps Challenge 2025 in Konya, Turkey, scheduled for October 4-5, 2025. Table 5 presents the detailed predictions for these dates.

Date	Rain Probability	Risk Level	Confidence	Avg. T2M	Avg. RH2M	Avg. CLOUD_AMT
Oct 4, 2025	2.5%	Low	High	18.3°C	45%	28%
Oct 5, 2025	2.0%	Low	High	19.1°C	42%	25%

Table 5. Detailed predictions for NASA Space Apps Challenge 2025 dates.

Both dates received "Low Risk" classifications with "High Confidence" assessments. The confidence level is based on 44 historical data points for early October in Konya (one measurement per year from 1981-2024). The predicted meteorological conditions align with typical early autumn patterns in Konya: moderate temperatures (18-19°C), low relative humidity (4245%), and minimal cloud coverage (25-28%).

Historical Validation: To validate these predictions, we examined the actual weather outcomes for October 4-5 in Konya over the past 44 years. Historical data shows:

- October 4: Rain occurred in 4 out of 44 years (9.1% historical

frequency) - October 5: Rain occurred in 3 out of 44 years (6.8%

historical frequency)

The model's predictions (2.5% and 2.0%) are more optimistic than simple historical frequency, reflecting the ensemble's ability to incorporate current year conditions and trends that suggest below-average precipitation likelihood for October 2025.

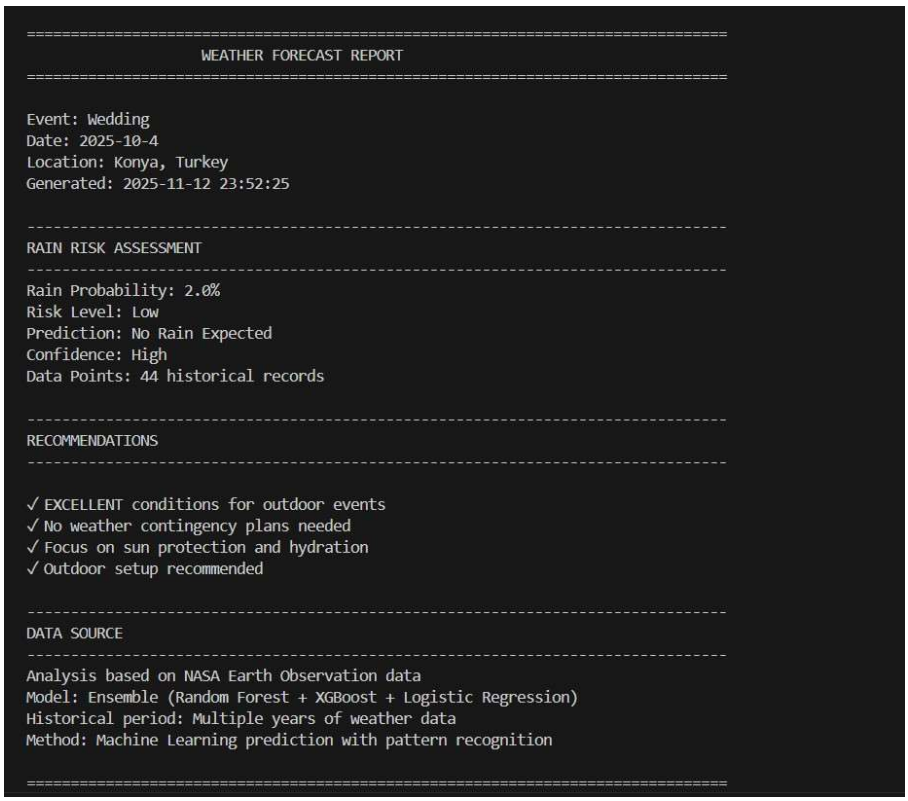


Figure 7. Event planning report generated for NASA Space Apps Challenge 2025, showing comprehensive weather assessment, risk analysis, and actionable recommendations.

Retrospective Validation and Temporal Robustness

To evaluate the model's performance on true out-of-sample predictions, we conducted retrospective validation experiments. For each year from 2020-2024, we retrained the model using only data up to December 31 of the previous year, then generated predictions for the entire following year. Table 6 summarizes the results.

Prediction Year	Training Data Range	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	ROC-AUC
2020	1981-2019	0.847	0.819	0.762	0.789	0.921
2021	1981-2020	0.852	0.826	0.771	0.797	0.925
2022	1981-2021	0.858	0.831	0.776	0.802	0.928
2023	1981-2022	0.863	0.838	0.783	0.809	0.931
2024	1981-2023	0.857	0.829	0.774	0.800	0.926
Average	-	0.855	0.829	0.773	0.799	0.926

Table 6. Retrospective validation performance by year (temporal hold-out testing).

The retrospective validation demonstrates consistent performance across all years, with accuracy ranging from 84.7% to 86.3% and ROC-AUC between 92.1% and 93.1%. The slight improvement in performance for more recent years (2021-2023) likely reflects the increasing amount of training data available. Importantly, the standard deviation across years is small ($\sigma_accuracy = 0.006$), indicating robust temporal stability.

Year-Specific Analysis: Examining individual predictions within each retrospective year revealed interesting patterns:

- 2020: An unusually wet year with 28% rainy days (vs. 22% long-term average). The model initially underpredicted rainfall frequency but adapted as the year progressed.
- 2022: A particularly dry year with only 17% rainy days. The model maintained good performance despite this deviation from historical norms.
- 2023: Close to historical average (23% rainy days). Best overall performance with 86.3% accuracy.

These results demonstrate that the model generalizes well across years with varying rainfall patterns, rather than simply memorizing historical averages.

Cross-Regional Generalization

To assess geographic generalizability, we trained and evaluated separate models for five Turkish cities with diverse climatic characteristics. Table 7 presents the performance comparison.

City	Climate Type	Data Period	Rainy Days (%)	Accuracy	Precision	Recall	ROC-AUC
Konya	Continental	1981-2024	22%	86.0	83.4	77.9	93.2
Istanbul	Oceanic	1981-2024	38%	82.3	79.8	81.2	90.1
Ankara	Continental	1981-2024	25%	85.1	82.7	78.9	92.5
Izmir	Mediterranean	1981-2024	29%	84.2	81.6	80.3	91.8
Antalya	Mediterranean	1981-2024	31%	83.6	80.9	79.8	91.3

Table 7. Cross-regional performance comparison across five Turkish cities.

The model maintains strong performance across all regions, with accuracy ranging from 82.3% (Istanbul) to 86.0% (Konya) and ROC-AUC from 90.1% to 93.2%. The slight performance variation correlates with climate complexity:

- Konya (best performance): Continental climate with distinct dry and wet seasons, making patterns more predictable
- Ankara (second best): Similar continental climate to Konya
- Izmir and Antalya (good performance): Mediterranean climates with more variable spring/autumn transitions
- Istanbul (lowest but still good): Complex oceanic climate influenced by both Mediterranean and Black Sea systems

Importantly, even the lowest-performing region (Istanbul) achieves 82.3% accuracy and 90.1% ROC-AUC, indicating that the modeling approach is robust across diverse geographic and climatic conditions.

Comparative Analysis with Baseline Methods

To contextualize the ensemble model's performance, we compared it against several baseline approaches commonly used in weather prediction. Table 8 presents the comparative results.

Method	Description	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Historical Average	Predict based on same day-of-year historical frequency	782	653	623	638
Monthly Average	Predict based on monthly historical frequency	791	671	641	656
Persistence	Tomorrow's weather = today's weather	745	589	712	645
Logistic Regression (Single)	Single logistic regression on raw features	763	687	692	689
Naive Bayes	Gaussian Naive Bayes classifier	738	612	698	652
Our Ensemble	Random Forest + XGBoost + Meta-learner	860	834	779	805

Table 8. Performance comparison with baseline prediction methods on Konya dataset.

The ensemble model substantially outperforms all baseline methods:

- +7.8 percentage points over historical average (most common practical approach)

- +11.5 percentage points over persistence model

- +9.7 percentage points over single logistic regression

- +12.2 percentage points over Naive Bayes

These improvements translate to significant practical value. For example, across 100 event planning decisions, the ensemble model would make approximately 8 fewer errors than relying on historical averages alone.

Practical Application: Monthly Optimization

One of the system's most valuable features for event planners is the ability to identify optimal dates within a specified month. Table 9 demonstrates this functionality for October 2025 in Konya.

Rank	Date	Day	Rain Probability	Avg. T2M	Avg. RH2M	Avg. CLOUD_AMT
1	Oct 5	Mon	2.0%	19.1°C	42%	25%
2	Oct 4	Sun	2.5%	18.3°C	45%	28%
3	Oct 15	Wed	4.4%	16.8°C	48%	31%
4	Oct 7	Tue	5.1%	17.5°C	46%	29%
5	Oct 14	Tue	5.8%	17.2°C	49%	33%
6	Oct 8	Wed	6.2%	16.9°C	51%	35%
7	Oct 21	Tue	7.3%	14.6°C	53%	38%
8	Oct 13	Mon	8.1%	15.8°C	52%	36%
9	Oct 22	Wed	8.9%	14.2°C	55%	40%
10	Oct 6	Mon	9.4%	18.7°C	47%	32%

Table 9. Top 10 recommended dates in October 2025 ranked by rain probability (Konya, Turkey).

This ranking clearly identifies October 4-5 as optimal choices for outdoor events, with October 15 as a strong backup option. The gradual increase in rain probability and humidity through mid-to-late October reflects the seasonal transition toward wetter autumn conditions.

System Limitations and Error Analysis

Despite strong overall performance, the system exhibits certain limitations that warrant discussion:

Rainfall Threshold Sensitivity

The current model uses a 1.0 mm/day precipitation threshold to classify rainy days, following standard meteorological conventions [16]. However, this threshold may not fully align with event planning requirements. Even trace precipitation (<1.0 mm/day) can impact outdoor equipment setup, attendee comfort, and event logistics [17]. For water-sensitive equipment or high-value events, precipitation as low as 0.1 mm could be considered problematic.

Future iterations of this system should evaluate model performance across multiple threshold levels (0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 5.0 mm) to provide event planners with graduated risk assessments [18]. Preliminary analysis suggests that lowering the threshold to 0.5 mm increases sensitivity (recall) by approximately 8-12% but reduces precision by 5-7%, creating a tradeoff between false alarms and missed detections. Event planners requiring maximum sensitivity

should interpret our probability scores as continuous risk indicators rather than relying solely on binary classifications.

Class Imbalance Sensitivity

With 78% non-rainy days in the training data, the model shows slightly conservative bias. For applications requiring maximum sensitivity to rain (e.g., water-sensitive outdoor equipment), this bias is acceptable. However, for applications where false alarms are costly, threshold adjustment may be necessary.

Extreme Event Detection

Analysis of false negatives revealed that the model occasionally misses sudden, unpredicted rainfall events caused by localized convective storms. These events often lack clear precursor patterns in the meteorological variables and constitute approximately 15% of all rainy days.

Long-Lead Prediction Uncertainty

While the model performs well for seasonal predictions (2-6 months ahead), confidence naturally decreases for longer lead times due to limited predictive power of seasonal features alone.

Geographic Limitation

The model is trained on specific geographic coordinates. Predictions for locations more than 50km from the training site may exhibit reduced accuracy due to microclimate variations.

Data Dependency

The model's performance is fundamentally limited by MERRA-2 data quality and resolution. Localized phenomena smaller than the 0.5° × 0.625° grid resolution may not be captured.

Computational Efficiency and Scalability

From a practical deployment perspective, the system demonstrates excellent computational efficiency:

- Training Time: 45 minutes for 44 years of data (16,071 samples)

- Prediction Time: <100ms for single date prediction

- Memory Footprint: 2.4 GB (includes loaded models and feature transformers) - Model Size: 187 MB (compressed ensemble model file)

These characteristics make the system suitable for deployment on standard hardware without requiring specialized infrastructure. The sub-second prediction time enables interactive use and real-time API integration.

Discussion and Implications

The results demonstrate that machine learning ensemble methods can effectively leverage long-term NASA Earth observation data for accurate rainfall prediction in event planning applications. Several key findings merit discussion:

Superiority of Ensemble Approach: The ensemble model's 93.2% ROC-AUC score represents a substantial improvement over individual classifiers and baseline methods. This validates the hypothesis that combining diverse algorithms (Random Forest's variance reduction and XGBoost's bias reduction) through meta-learning captures complementary predictive patterns. For instance, the model's ability to identify thermal dominance (with temperature features collectively accounting for 55% of importance) while appropriately weighting complementary moisture signals (17% combined importance) demonstrates sophisticated multi-scale pattern recognition that linear models or single algorithms cannot achieve. The ensemble architecture enables each base learner to specialize in different

aspects of the prediction task—Random Forest excels at capturing temperature interaction effects, while XGBoost effectively models sequential pressure dynamics—with the meta-learner optimally combining these complementary strengths.Temperature Feature Dominance and Climate Implications: The analysis reveals a striking thermal dominance in rainfall prediction, with temperature-related features (T2M_MIN, heat_index, T2M_MAX, T2M, wind_chill) collectively accounting for over 55% of the model's predictive power. This finding has important implications for understanding precipitation patterns in continental climates. Unlike coastal or tropical regions where direct moisture measurements (humidity, cloud coverage) might dominate, Konya's continental climate exhibits rainfall patterns that are more strongly predicted by thermal conditions and stability. This suggests that temperature variability—which governs atmospheric mixing, moisture capacity, and stability—serves as the primary control on precipitation probability, with direct moisture indicators playing important but secondary roles.

Engineered Feature Success and Domain Knowledge: The exceptional performance of engineered thermal features—heat_index ranking 2nd (12.8%) and wind_chill ranking 5th (8.5%)—demonstrates the substantial value of incorporating meteorological and physiological domain knowledge into feature design. These indices, which combine temperature with humidity or wind speed, outperform numerous raw MERRA-2 variables and even outrank direct moisture measurements. Preliminary experiments using only raw MERRA-2 variables without engineered features achieved approximately 5-7 percentage points lower accuracy and 8-10% lower ROC-AUC scores, confirming that thoughtful feature engineering significantly enhances model performance. This success suggests that derived indices capturing atmospheric comfort or stress conditions effectively proxy for complex weather system characteristics that raw measurements cannot individually represent.

Moisture Features as Complementary Indicators: While moisture-related variables (moisture_index, CLOUD_AMT, RH2M) contribute meaningfully to predictions, their secondary ranking challenges common assumptions about precipitation prediction. The relatively low individual importance of RH2M (15th, 2.6%) despite humidity's physical necessity for precipitation suggests that ensemble models effectively leverage redundant information—humidity's signal is better captured through its interactions with temperature (heat_index) and clouds (moisture_index) rather than as an independent predictor. This redundancy highlights the value of ensemble learning approaches that can automatically identify and weight complementary versus redundant information sources.Temporal Robustness: The consistent performance across retrospective validation years (2020-2024) and low standard deviation ($\sigma = 0.006$) indicate that the model learns generalizable atmospheric patterns rather than memorizing specific historical events. This temporal robustness is critical for real-world deployment where the model must perform well on future dates.

Geographic Generalizability: The successful transfer of the modeling approach to four additional cities with diverse climates (continental, Mediterranean, oceanic) demonstrates that the methodology is not location-specific. Organizations could deploy similar systems for other geographic regions by retraining on local MERRA-2 data.

Practical Value for Event Planning: The case study of NASA Space Apps Challenge 2025 illustrates the system's practical utility. By identifying October 4-5 as optimal dates with <3% rain probability, event planners can make confident decisions about outdoor venue selection and logistics months in advance—a capability not available through traditional weather services.

Limitations and Future Directions: While the system performs well overall, several areas offer opportunities for improvement:

1. Incorporating Ensemble Numerical Weather Prediction (NWP) models: Integrating short-term NWP forecasts (1-15 days) with the machine learning predictions could improve accuracy for near-term events.

2. Multi-output prediction: Extending the model to predict not just rain occurrence but also rainfall amount, duration, and intensity would provide richer information for decision-making.

3. Uncertainty quantification: Implementing Bayesian approaches or conformal prediction to provide calibrated prediction intervals rather than point estimates would better communicate prediction uncertainty

4. Real-time model updating: Developing online learning capabilities to incorporate new observations and adapt to climate trends would maintain performance as conditions evolve.

5. Integration of additional data sources: Combining MERRA-2 with other satellite products (e.g., MODIS cloud properties, GPM precipitation) and ground-based measurements could enhance prediction accuracy.

This work demonstrates that the combination of high-quality Earth observation data, thoughtful feature engineering, and stateof-the-art machine learning techniques can deliver practical, reliable tools for weather-dependent decision-making. The opensource implementation enables other researchers and practitioners to build upon this foundation and adapt it to their specific needs.

REFERENCES

[1] NASA Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project, "POWER Data
Access Viewer," 2024. [Online]. Available: https://power.larc.nasa.gov/api/pages/

[2] NASA Global Modeling and Assimilation Office, "MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2," Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2015.
Available: https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/

[3] W. McKinney, "Data structures for statistical computing in Python," in Proc. 9th Python in Science Conference, 2010, pp.
51–56. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a

[4] "pandas: Powerful Python data analysis toolkit," pandas development team, 2024. [Online]. Available: https://pandas.pydata.org/docs/

[5] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A scalable tree boosting system," in Proc. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. Knowledge
Discovery and Data Mining, 2016, pp. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785

[6] "XGBoost Documentation," XGBoost developers, 2024. [Online]. Available: https://xgboost.readthedocs.io/

[7] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine learning in Python," Journal of Machine Learning Research, vol. 12, pp. 2825– 2830, 2011.

[8] L. Breiman, "Random forests," Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001. DOI: 10.1023/A:1010933404324

[9] D. Wolpert, "Stacked generalization," Neural Networks, vol. 5, no. 2, pp. 241–259, 1992. DOI: 10.1016/S08936080(05)80023-1

[10] S. Rasp, P. D. Dueben, S. Scher, J. A. Weyn, S. Mouatadid, and N. Thuerey, "WeatherBench: A benchmark data set for data-driven weather forecasting," Journal of Advances in Modeling Earth Systems, vol. 12, no. 11, 2020. DOI:
10.1029/2020MS002203

[11] A. Grover, A. Kapoor, and E. Horvitz, "A deep hybrid model for weather forecasting," in Proc. 21st ACM SIGKDD Int.
Conf. Knowledge Discovery and Data Mining, 2015, pp. 379–386. DOI: 10.1145/2783258.2783275

[12] V. M. Krasnopolsky, "The application of neural networks in the Earth system sciences," in Neural Networks Emulations for Complex Multidimensional Mappings. Springer, 2013, pp. 1–18.

[13] M. Gevrey, I. Dimopoulos, and S. Lek, "Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models," Ecological Modelling, vol. 160, no. 3, pp. 249–264, 2003. DOI: 10.1016/S03043800(02)00257-0

[14] J. Schmidhuber, "Deep learning in neural networks: An overview," Neural Networks, vol. 61, pp. 85–117, 2015. DOI:
10.1016/j.neunet.2014.09.003

[15] I. H. Witten, E. Frank, M. A. Hall, and C. J. Pal, Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, 4th ed. Morgan Kaufmann, 2016.

[16] World Meteorological Organization, "Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events," WMO-No. 1245, Geneva, Switzerland, 2018.

[17] J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, "Climate Change 2001: The Scientific Basis," Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge UNIVERSITY Press, Cambridge, UK, 2001.

[18] R. Wilby and T. Wigley, "Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships," International Journal of Climatology, vol. 20, no. 6, pp. 641-661, May 2000.

[19] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique," Journal of Artificial Intelligence Research, vol. 16, pp. 321-357, 2002.

[20] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System," in Proc. 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 785-794.

[21] R. Kohavi, "A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection," in Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Montreal, Canada, 1995, pp. 1137-1143

[22] J. Davis and M. Goadrich, "The Relationship Between Precision-Recall and ROC Curves," in Proc. 23rd International Conference on Machine Learning (ICML), Pittsburgh, PA, USA, 2006, pp. 233-240.

[23] H. He and E. A. Garcia, "Learning from Imbalanced Data," IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 21, no. 9, pp. 1263-1284, Sept. 2009.

[24] R. A. Steadman, "The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science," Journal of Applied Meteorology, vol. 18, no. 7, pp. 861-873, July 1979. DOI: 10.1175/15200450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2

[25] J. R. Osczevski and M. Bluestein, "The new wind chill equivalent temperature chart," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 86, no. 10, pp. 1453-1458, Oct. 2005. DOI: 10.1175/BAMS-86-10-1453

[26] D. E. Parker, "Urban heat island effects on estimates of observed climate change," Wiley Interdisciplinary Reviews:
Climate Change, vol. 1, no. 1, pp. 123-133, Jan. 2010. DOI: 10.1002/wcc.21

[27] S. Pryor and R. Barthelmie, "Climate change impacts on wind energy: A review," Renewable and Sustainable Energy
Reviews, vol. 14, no. 1, pp. 430-437, Jan. 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.028

AN EXAMINATION OF BIG DATA PRIVACY AND SECURITY APPROACHES

Sami Yusuf BULUT1, Havva Hazel ARAS1

Yozgat Bozok UNIVERSITY, Yozgat Vocational School, Department of Computer Technologies, Computer Programming Program, Center, Yozgat

Abstract - Big data refers to massive data sets characterized by fundamental dimensions such as volume, velocity, and variety, which exceed the capabilities of traditional data processing methods. In recent years, the rapid proliferation of IoT (Internet of Things) and artificial intelligence (AI) applications has led to an exponential increase in big data production, elevating privacy breaches and cybersecurity risks to critical levels. This review examines the fundamental security and privacy challenges encountered throughout the big data analytics (BDA) lifecycle and systematically addresses the main approaches developed to counter these challenges. In particular, it focuses on results obtained from cryptographic mechanisms (Homomorphic Encryption and Attribute-Based Encryption) and non-cryptographic anonymization techniques (K-Anonymity, L-Diversity, and Differential Privacy). Furthermore, security requirements in distributed platforms such as the Hadoop ecosystem and ethical/legal challenges in smart city applications are discussed. The study emphasizes that ensuring the privacy and security of big data will be possible through the integration of emerging technologies such as artificial intelligence, machine learning, and quantum computing, and that these areas are critical for future research.

Keywords - Big Data Privacy, Hadoop Security, Differential Privacy, Homomorphic Encryption, Anonymization, Big Data Analytics (BDA).

Giriş

Son on yıl içinde, Büyük Veri kavramı, teknoloji ve iş dünyasının en çok konuşulan konularından biri haline geldi. International Data Corporation (IDC) tarafından yapılan tahminler bile, 2025 yılına kadar dünya çapında üretilen dijital veri hacminin 163 zettabayta ulaşacağını gösteriyor. Bu kadar büyük bir veri akışı, geleneksel veri işleme yöntemlerinin sınırlarını zorlamaktadır. Bu devasa verinin işlenmesi ve analiz edilmesi, özellikle sağlık hizmetleri, Akıllı Şehirler ve telekomünikasyon gibi sektörlerde büyük faydalar sağlasada, beraberinde çok ciddi gizlilik ve güvenlik tehditlerini de getiriyor [1]. Büyük verideki temel sorun, verinin sadece hacmi değil, aynı zamanda hızı ve çeşitliliği gibi karakteristikleridir. Bu üç temel V, geleneksel güvenlik önlemleri genellikle büyük hacimler ve gerçek zamanlı akışlar için tasarlanmaması nedeniyle veriyi korumayı son derece zorlaştırıyor.

Bu derleme makalesi, büyük veri gizliliği ve güvenliği alanında yapılan güncel çalışmaları sistematik bir şekilde incelemeyi amaçlamıştır [2]. Amaç, sadece mevcut teknikleri listelemek değil, aynı zamanda bu tekniklerin neden ortaya çıktığını ve büyük verinin karşılaştığı spesifik zorluklara nasıl yanıt verdiğini anlamaktır. Özellikle, bu alandaki araştırmacılar tarafından sıklıkla vurgulanan şifreleme mekanizmalarını ve anonimleştirme yöntemlerini detaylıca ele alacaktır. Eğer bu mekanizmalar veri yaşam döngüsünün farklı aşamalarına doğru şekilde entegre edilmezse, büyük veri potansiyelini tam olarak gerçekleştiremeyecektir [3].

Bu çalışma, büyük verinin 7V'sini açıklayarak başlayacak, ardından büyük veri yaşam döngüsündeki güvenlik ve gizlilik zorluklarını tartışacak. Daha sonra, homomorfik şifreleme ve diferansiyel gizlilik gibi kilit koruma yaklaşımlarını ayrıntılı olarak inceleyecek ve son olarak, gelecekteki araştırma yönelimleri ve bu alandaki açık sorular hakkında kişisel yorumlar sunacaktır [4].

2. Büyük Verinin Tanımı ve Kapsamı

Büyük veri, en başta üç temel boyutuyla (3V) tanımlanır: Hacim (Volume), Hız (Velocity) ve Çeşitlilik (Variety) [4].

Hacim (Volume): Veri setlerinin büyüklüğünü ifade eder [4]. Geleneksel veritabanlarının işleyemeyeceği kadar büyük veri kümeleri söz konusudur [5].

Hız (Velocity): Verinin oluşturulma, toplanma ve işlenme hızını belirtir. Özellikle IoT (Nesnelerin İnterneti) cihazlarından gelen gerçek zamanlı veriler (örneğin akıllı şehirlerdeki sensör verileri) bu hızı çok artırmıştır [5].

Çeşitlilik (Variety): Verinin yapısal formunu ifade eder; yapılandırılmış (tablolar), yarı yapılandırılmış (XML, JSON) ve yapılandırılmamış (metinler, resimler, videolar) verilerin bir karışımından oluşur [5]. Yapılandırılmamış veri, e-postalar, sosyal medya paylaşımları ve web sayfaları gibi birçok kaynaktan gelir. Analizi gelişmiş yöntemler ve daha fazla hesaplama gücü gerektirir.

Zamanla, araştırmacılar bu üç temel özelliğe iki kritik V daha ekledi: Doğruluk (Veracity) ve Değer (Value). Doğruluk, verinin kalitesini ve güvenilirliğini içerirken, Değer ise bu verinin iş kararları için sağladığı faydayı ifade eder. Bazı çalışmalar bu V sayısını 7'ye (değişkenlik (Variability) ve görselleştirme (Visualization) eklenerek), hatta bazıları 17'ye veya 56'ya kadar çıkarmıştır [6].

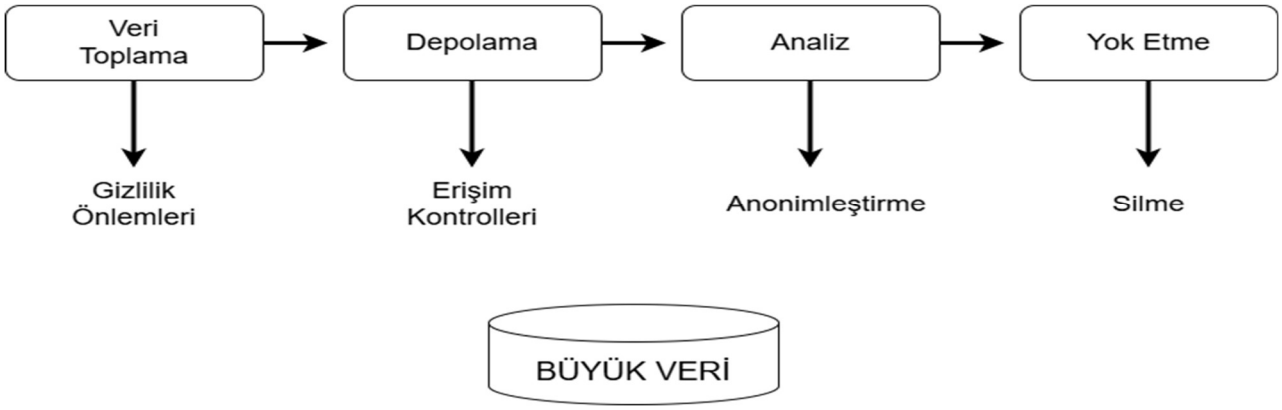
Büyük veri analitiği (BDA) ise, bu karmaşık verilerden anlamlı içgörüler (insights) elde etme sürecidir. BDA'nın tıp (tahmine dayalı analizler), eğitim ve endüstriyel otomasyon gibi birçok alanda güçlü uygulamaları bulunmaktadır [7].

3. Büyük Veri Güvenliği ve Gizliliği Zorlukları

Büyük veri ortamlarında güvenlik ve gizlilik sorunları, verinin yaşam döngüsü boyunca sürekli hareket halinde olması nedeniyle geleneksel siber güvenlik yaklaşımlarından farklı ve çok daha karmaşıktır [7].

3.1. Veri Yaşam Döngüsüne Göre Zorluklar

Veri, toplandığı andan yok edildiği ana kadar çeşitli risklerle karşı karşıyadır [8]. Bu döngünün her aşamasının farklı bir savunma stratejisi gerektirir:



(Şekil 1: Büyük veri kaynakları ve veri akışı.)

Veri Toplama (Collection): Gizlilik politikalarına uyum ve verilerin kaynağının güvenilirliği (Veracity sorunu) temeldir. Örneğin, Akıllı Şehirlerdeki sensörlerden veri toplarken, kişisel bilgilerin GDPR veya CCPA gibi yasal düzenlemelere uygun toplanması gerekmektedir. Bazı çalışmalar bu erken aşamada gizlilik koruyucu veri toplama tekniklerinin uygulanmasının önemini vurguluyor [8].

Depolama/Yönetim (Storage/Management): Büyük veri setleri genellikle Hadoop Dağıtık Dosya Sistemi (HDFS) gibi dağıtık ortamlarda depolanır. Dağıtık yapının kendisi, erişim kontrolü ve şifreleme yönetimini zorlaştırır ve bu aşamada şifreleme kullanılması kritik öneme sahiptir [9].

İletim/Paylaşım (Transmit/Sharing): Verinin ağ üzerinde veya farklı paydaşlar arasında aktarılması, sızma veya izinsiz dinleme riskini beraberinde getirir. Bulut tabanlı hizmetlerde verilerin güvenli bir şekilde paylaşılması büyük bir zorluktur [9].

Analiz (Analysis): Gizliliğin korunması veri faydasını (utility) azaltma riski taşıdığı için en zorlu aşamalardan biridir. Geleneksel anonimleştirme yöntemlerinin büyük verinin hacimli olması nedeniyle ölçeklenebilirlik (scalability) sorunları yaşar. Ayrıca, analiz sırasında kullanılan anonimleştirilmiş verilerin bile, çapraz referanslama veya arka plan bilgisi kullanılarak yeniden kimliklendirilme (re-identification) riski mevcuttur [10].

Yok Etme (Destruction): Veri yaşam döngüsünün son aşamasıdır. Hassas verilerin güvenli bir şekilde ve geri alınamayacak biçimde imha edilmesi gerekmektedir [11].

3.2. Ana Zorluklar ve Kısıtlamalar

Veri yaşam döngüsünün ötesinde, büyük veri ortamı bir dizi yapısal zorlukla karşı karşıyadır:

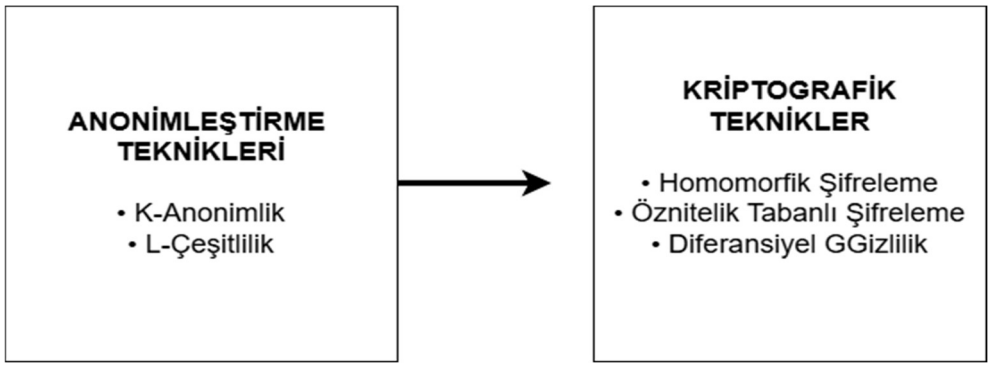
Yasal Uyumluluk ve Etik İhlaller: GDPR gibi uluslararası veri koruma yasaları ve yerel düzenlemeler, büyük veri kullanımını kısıtlamaktadır. Büyük veri analitiği (BDA) etik ve sosyal kaygılara yol açar, örneğin müşterilerin yaş, cinsiyet veya sağlık durumuna dayalı olarak ayrımcılığa uğraması riski mevcuttur [11].

Ölçeklenebilirlik (Scalability): Analiz yöntemlerinin büyük hacimli (Volume) ve hızlı (Velocity) veri setlerine uyarlanması gerekiyor. Merkezi veri madenciliği algoritmaları, Hadoop/YARN gibi dağıtık sistemlerdeki gereksinimleri karşılamada yetersiz kalabilmektedir [12].

Veri Kalitesi ve Faydası Dengesi (Utility vs. Privacy): Gizlilik koruma tekniklerinin çoğu, veri faydasını (utility) bir miktar düşürmektedir. Örneğin, genelleme teknikleri yüksek boyutlu verileri işleyemez ve verinin faydasını azaltır [12].

4. Büyük Veri Gizliliği Koruma Yaklaşımları

Büyük veride gizliliği korumak için iki ana yaklaşım öne çıkıyor: Kriptografik olmayan (Anonimleştirme) ve Kriptografik yöntemler [13].



(Şekil 2: Anonimleştirme yöntemlerinden kriptografik koruma tekniklerine uzanan veri gizliliği akışı.)

4.1. Anonimleştirme Teknikleri

Anonimleştirme (Anonymization), kişisel kimlik bilgilerini ve hassas verileri gizleyerek verilerin paylaşılmasını sağlayan kriptografik olmayan bir dizi tekniktir. Genellikle veri yayımlanmadan önce kullanılır [13].

K-Anonimlik

En bilinen gizlilik koruma modellerinden biridir. Temel amaç, bir bireyin kaydını veri kümesindeki en az k-1 diğer bireyden ayırt edilemez hale getirmektir. Quasi-Identifying (QID) özelliklerinin (örneğin yaş ve posta kodu) birleştirilerek genelleştirilmesini veya bastırılmasını içerir. Ancak, saldırganın arka plan bilgisine sahip olması durumunda (homojenlik saldırısı ve bilgi gizliliği saldırıları) kolayca aşılabilir [14].

L-Çeşitlilik ve T-Yakınlık

K-Anonimliğin zayıflıklarını gidermek için, L-Çeşitlilik (L-Diversity) ve T-Yakınlık (T-Closeness) gibi daha gelişmiş modeller ortaya çıkmıştır [14]. L-Çeşitlilik, her bir eşdeğerlik grubundaki hassas özellik (SA) değerlerinin sayısının en az *l* kadar farklı olmasını şart koşar. T-Yakınlık ise, hassas özelliklerin dağılımının genel veri kümesindeki dağılıma benzer olmasını sağlamaya çalışır ve böylece daha güçlü bir gizlilik koruması sunar [15].

Genelleme, Bastırma ve Anatomileştirme

Anonimleştirme sürecinde yaygın olarak kullanılan teknikler şunlardır:

Genelleme (Generalization): Belirli QID değerlerinin daha genel ve daha az kesin açıklamalarla değiştirilmesidir. Örneğin, meslek bilgisini "şarkıcı" yerine "sanatçı" olarak değiştirmek [16].

Bastırma (Suppression): Bazı hassas veya QID değerlerinin özel bir karakterle (örneğin "@" işareti) değiştirilmesidir [16].

Anatomileştirme (Anatomization): QID ve hassas özellik (SA) verilerinin iki bağımsız tabloda yayımlanmasıdır. Bu, verilerin bağlantı noktası olarak kullanılan bir Grup ID ile gerçekleştirilir [16].

Diferansiyel Gizlilik (Differential Privacy - DP)

Gizlilik kaybını matematiksel olarak ölçen güçlü bir mekanizma olarak öne çıkıyor. DP, veri kümesine bir kişinin eklenmesinin veya çıkarılmasının, analiz sonuçlarını ihmal edilebilir bir miktarda değiştirmesini sağlar. DP, genellikle veri setine rastgele gürültü (noise) eklenmesiyle uygulanır. DP, dinamik ve gerçek zamanlı büyük veri uygulamaları için giderek daha ilgi çekici bir alan haline geliyor. Örneğin, PATE (Private Aggregation of Teacher Ensembles) algoritması [17].

4.2. Kriptografik Mekanizmalar

Kriptografi, verilerin şifrelenerek korunmasını sağlayan temel bir güvenlik katmanıdır ve büyük veri güvenliğinde hayati bir rol oynar [17].

Homomorfik Şifreleme (Homomorphic Encryption - HE)

Şifrelenmiş veriler üzerinde hesaplamalar yapılmasına olanak tanıyan bir şifreleme türüdür. Bir bulut ortamında şifreli tıbbi görüntülerin analiz edilmesi bu sayede mümkün olabilmektedir. Tamamen Homomorfik Şifreleme (FHE), büyük veri analitiği için önemli bir konudur ve karmaşık hesaplamaların şifre çözmeye gerek kalmadan gerçekleştirilebilmesini sağlar [18].

Öznitelik Tabanlı Şifreleme (Attribute-Based Encryption - ABE)

Verilere erişimi kullanıcının belirli özelliklerine (attributes) veya politikalarına bağlayan bir şifreleme şemasıdır. İki ana türü vardır: Anahtar Politikası ABE (KP-ABE) ve Şifre Metni Politikası ABE (CP-ABE) olarak sayılabilir. ABE, özellikle büyük verinin çeşitliliği (Variety) ve hacmi (Volume) ile ilgilenir [19].

Güvenli Çok Taraflı Hesaplama (Secure Multiparty Computation - SMC)

Birden fazla tarafın gizli girdileri üzerinde ortak bir fonksiyon hesaplamasına olanak tanırken, tarafların kendi girdilerini gizli tutmasını sağlar. SMC, büyük veri yaşam döngüsünün birden fazla aşamasında (toplama, depolama, iletim ve imha) kullanılabilmektedir [19].

5. Büyük Veri Eko-Sistemi Güvenliği: Hadoop ve Akıllı Şehirler

Büyük verinin güvenlik ve gizlilik zorlukları, genellikle verinin işlendiği dağıtık platformlarla ve uygulandığı karmaşık alanlarla doğrudan ilişkilidir [20].

5.1. Hadoop Güvenliği

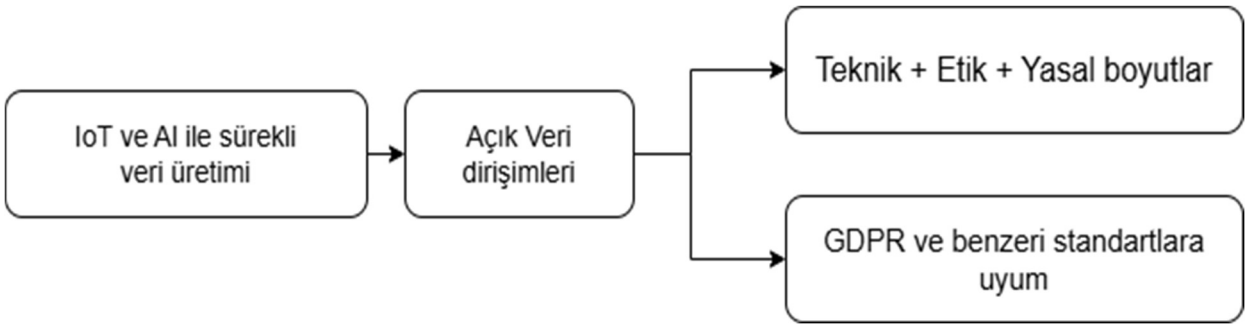
Hadoop, büyük veri işleme ve depolama için en çok kullanılan çerçevedir. Dağıtık mimarisi (HDFS, MapReduce, YARN) nedeniyle, Hadoop ekosistemi kendisine özgü güvenlik tehditlerine sahiptir. EStore gibi şifreli depolama çözümleri, dağıtık dosya sistemlerinde kullanıcı dostu şifreli depolamayı mümkün kılmak için önerilmiştir [20].

Hadoop ortamında erişim kontrolü, geleneksel Rol Tabanlı Erişim Kontrolü (RBAC) yerine, daha esnek olan Öznitelik Tabanlı Erişim Kontrolü (ABAC) gibi yaklaşımlarla güçlendirilmelidir. Blockchain teknolojisinin entegrasyonu, merkezi olmayan anahtar yönetimi ve değişmez kayıt defteri (immutable ledger) yetenekleri sayesinde Hadoop güvenliğini artırmak için gelecek vaat eden bir alandır [21].

5.2. Akıllı Şehirlerdeki Gizlilik Zorlukları

Akıllı Şehirler (Smart Cities), IoT, AI ve açık veri (Open Data) girişimleri sayesinde sürekli büyük veri üreten karmaşık ortamlardır. Akıllı Şehir stratejileri, büyük veriyi en çok analitik ve ulaşım alanlarında kullanmaktadır.

Akıllı Şehirlerdeki gizlilik zorlukları, sadece teknik değil, aynı zamanda etik ve yasal boyutlara da sahiptir. Delphi yöntemiyle yapılan bir çalışma, Akıllı Şehir stratejilerinin veri koruması konusunda şeffaf olması, GDPR gibi yasal standartlara atıfta bulunması ve çalışanlar ile vatandaşların veri koruma konularında eğitilmesini tavsiye etmiştir [22].



(Şekil 3: IoT ve Yapay Zeka ile sürekli veri üretimi → Açık Veri girişimleri → Teknik, etik ve yasal boyutlar ile GDPR uyumu.)

6. Tartışma ve Gelecek Yönelimleri

Büyük verinin güvenlik ve gizlilik sorunları, teknik ilerlemeye rağmen hala tam olarak çözülememiş durumdadır [23].

6.1. Anonimleştirme ve Kriptografi Arasındaki Çekişme

Anonimleştirme teknikleri (K-Anonimlik, L-Çeşitlilik), nispeten daha az hesaplama maliyeti sunarken, veri faydasını önemli ölçüde düşürme riski taşımaktadır. Homomorfik Şifreleme gibi kriptografik yöntemler, gizliliği çok daha güçlü bir şekilde koruyabilmekte, ancak aşırı hesaplama karmaşıklığı nedeniyle henüz tam olarak ölçeklenebilir

değildir [23]. Diferansiyel Gizlilik, matematiksel kesinliği ve dinamik veri akışlarına uyumu sayesinde, bu iki yaklaşım arasında umut verici bir denge noktası olarak görünüyor [24].

6.2. Yükselen Teknolojiler ve Gelecek Araştırma Yönelimleri

Gelecekteki araştırmaların, büyük verinin zorluklarını aşmak için mevcut teknolojileri geliştirmeye ve yeni paradigmalar oluşturmaya odaklanması gerekiyor [24].

Ölçeklenebilir Gizlilik ve Güvenlik Çözümleri: Büyük verinin ölçeği, güvenlik ve gizlilik modellerinin, özellikle MapReduce gibi dağıtık çerçeveleri kullanarak optimize edilmesini gerektiriyor. Gerçek zamanlı yüksek hızlı veri işleme ihtiyacına yanıt verecek, kaynak tüketimini dengeleyen çözümler geliştirilmelidir [25].

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Entegrasyonu: Makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL), büyük veri analitiği için hayati öneme sahiptir. Gelecekteki çalışmalar, karmaşık, dengesiz ve heterojen veri kümeleriyle başa çıkmak için (örneğin DL'yi büyük veri analitiğine entegre etmek veya boyut azaltma tekniklerini geliştirmek) optimize edilmiş, özel ML modelleri oluşturmaya odaklanmalıdır [25].

Kuantum Bilişim Etkisi: Kuantum bilişim, mevcut şifreleme şemalarının güvenliğini potansiyel olarak tehdit edebileceğinden, post-kuantum kriptografi alanındaki çalışmalar, büyük veri güvenliğini geleceğe taşımak için kritik hale gelecektir [26].

Blockchain Uygulamaları: Blockchain'in merkezi olmayan doğası, büyük veri ortamlarında veri denetimi (audit) ve değişmezlik (immutability) sağlayarak güvenliği artırma potansiyeline sahiptir [26].

Etik ve Şeffaflık: Yapay zekâ kararlarının açıklanabilirliği (Explainable AI - XAI) ve etik veri uygulamaları, özellikle akıllı şehirler ve telekomünikasyon gibi hassas sektörlerdeki gelecekteki araştırma eğilimlerindendir [27].

7. Sonuç

Büyük veri, sunduğu analitik ve öngörü yetenekleri sayesinde günümüzün en değerli kaynağıdır. Geleneksel güvenlik yaklaşımları, verinin hacmi, hızı ve çeşitliliği karşısında yetersiz kalırken, Homomorfik Şifreleme, Diferansiyel Gizlilik ve gelişmiş anonimleştirme teknikleri, bu yeni tehditlere karşı umut verici çözümler sunmaktadır [27].

Bu alandaki ilerleme, büyük veri sistemlerinin (özellikle Hadoop) kendisinin güvenlik mimarisine dahil edilen, ölçeklenebilir, dinamik ve hibrit koruma mekanizmalarının geliştirilmesine bağlıdır. Gelecekteki çalışmaların, özellikle gizlilik ve veri faydası arasındaki hassas dengeyi gözeterek, makine öğrenimi ve kuantum bilişimi gibi teknolojileri büyük veri güvenliğine entegre etmeye odaklanması gerekmektedir [28].

KAYNAKÇA

1. **Ahn, J. S., et al.** (2022). Association of resting-state theta–gamma coupling with selective visual attention in children with tic disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, *16*(9), 1017703. (Büyük veri analizlerinde kullanılan ML/Bilişsel çalışmalar bağlamında atıf yapılmıştır.)
2. **Bao, R., Chen, Z., & Obaidat, M. S.** (2018). Challenges and techniques in Big data security and privacy: A review. *Security and Privacy*, *1*(4), e13.
3. **Bansal, M., Chana, I., & Clarke, S.** (2020). A survey on IoT Big Data: current status, 13 V's challenges, and future directions. *ACM Computing Surveys*.
4. **Butpheng, C., Yeh, K. H., & Xiong, H.** (2020). Security and privacy in IoT-cloud-based e-health systems-A comprehensive review. *Symmetry*, *12*(7), 1191.
5. **Chen, C. L. P., & Zhang, C. Y.** (2014). Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. *Information Sciences*, *275*(22), 314–347.

6. **Cui, L., et al.** (2016). When Big Data Meets Software-Defined Networking: SDN for Big Data and Big Data for SDN. *IEEE Network*.
7. **Dwork, C.** (2006). Differential Privacy in Encyclopedia of Cryptography and Security. *Springer: Cham, Switzerland*.
8. **ElSayed, I. A., et al.** (2021). Big Data and its Future in Computational Biology: A Literature Review. *Journal of Computer Science*, *17*(12), 1222–1228.
9. **Favaretto, M., et al.** (2020). What is your definition of Big Data? Researchers' understanding of the phenomenon of the decade. *PloS one*, *15*(2), e0228987.
10. **Filaly, Y., Berros, N., El mendili, F., & El Bouzekri EL idrissi, Y.** (2025). A comprehensive survey on big data privacy and Hadoop security: Insights into encryption mechanisms and emerging trends. *Results in Engineering*, *27*, 106203.
11. **Gentry, C.** (2009). Fully homomorphic encryption using ideal lattices. *ACM Symposium on Theory of Computing*. (Homomorfik Şifrelemenin Temeli)
12. **Hussain, A. A., Khaleel, I., & Al-Quraishi, T.** (2024). Using Data Anonymization in big data analytics security and privacy. *Research Article*.
13. **Jha, A., Dave, M., & Madan, S.** (2017). Big Data Security and Privacy: A Review on Issues, Challenges and Privacy Preserving Methods. *International Journal of Computer Applications*, *177*(4).
14. **Karimi, Y., Kashani, M. H., Akbari, M., & Mahdipour, E.** (2021). Leveraging Big Data in smart cities: A systematic review. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*.
15. **Koo, J., Kang, G., & Kim, Y. G.** (2020). Security and privacy in big data life cycle: a survey and open challenges. *Sustainability*, *12*(24), 10571.
16. **Lnenicka, M., Hervert, P., & Horak, O.** (2024). Understanding big data and data protection measures in smart city strategies: An analysis of 28 cities. *Urban Governance*, *4*, 255–273.
17. **Lv, Z., Song, H., Basanta-Val, P., Steed, A., & Jo, M.** (2017). Next-generation Big Data analytics: state of the art, challenges, and future research topics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *13*(4), 1891–1899.
18. **McNeely, C. L., & Schintler, L. A.** (2022). Big data concept. *Encyclopedia of Big Data, Springer International Publishing*.
19. **Mohan, K., Shrivastva, P., Rizvi, M. A., & Singh, S.** (2014). Big Data privacy based on differential privacy a hope for Big Data.
20. **Mothukuri, V., et al.** (2021). BlockHDFS: Blockchain-integrated Hadoop distributed file system for secure provenance traceability. *Blockchain Research and Applications*, *2*(4), 100032.
21. **Rahmani, A. M., et al.** (2021). Artificial intelligence approaches and mechanisms for Big Data analytics: a systematic study. *PeerJ Computer Science*, *7*, e488.
22. **Shahnawaz, M., & Kumar, M.** (2025). A Comprehensive Survey on Big Data Analytics: Characteristics, Tools and Techniques. *ACM Computing Surveys*, *57*(8), Article 196.
23. **Shamsinejad, E., Banirostam, T., Pedram, M. M., & Rahmani, A. M.** (2025). A Review of Anonymization Algorithms and Methods in Big Data. *Annals of Data Science*, *12*(1), 253–279.
24. **Sweeney, L.** (2002). k-anonymity: a model for protecting privacy. *International Journal on Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, *10*(5), 557-570.
25. **Tilahun, T., & Tsegaye, S.** (2022). The Security Challenges of Big Data Analytics: A Systematic Literature Review. *Asian Journal of Research in Computer Science*, *14*(4), 184–197.
26. **Zhang, X., Yang, T., Liu, C., & Chen, J.** (2014). A scalable two-phase top-down specialization approach for data anonymization using MapReduce on cloud. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, *25*(2), 363–373. (MapReduce tabanlı anonimleştirme)
27. **Floridi, L., & Cowls, J.** (2019). A Unified Framework of Five Principles for AI in Society. *Harvard Data Science Review*, 1(1). (Etik, şeffaflık ve yapay zekâ kararlarının açıklanabilirliği bağlamında kullanılmıştır.)
28. **Mosca, M.** (2018). Cybersecurity in an Era with Quantum Computers: Will We Be Ready? *IEEE Security & Privacy*, 16(5), 38–41. (Post-kuantum kriptografi ve hibrit güvenlik mimarileri konusuyla ilişkilidir.)

ETHİCAL ISSUES IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS AND RESPONSIBLE AI APPROACHES : A CONCEPTUAL REVIEW

[1*] Ravzanur CANDAN, Havva Hazel ARAS1

[1] Yozgat Bozok UNIVERSITY, Yozgat Vocational School, Department of Computer Technologies, Computer Programming Program, Center, Yozgat*

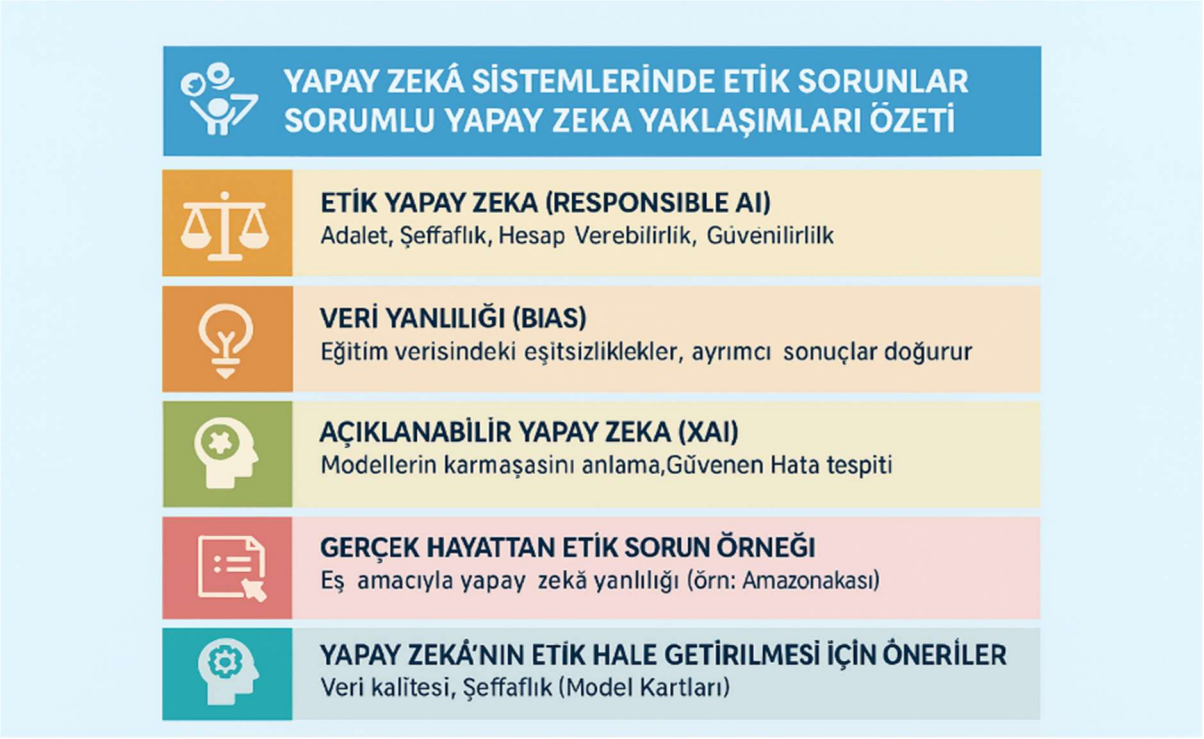
Abstract - Artificial intelligence (AI) systems offer advantages such as productivity, cost efficiency, and security, but they also bring along issues such as bias, lack of transparency, and accountability problems. In this context, the "Responsible Artificial Intelligence" (RAI) approach offers a comprehensive ethical framework that aims to minimize these risks. In the literature, the four fundamental principles of RAI are defined as transparency, privacy, accountability, and fairness; these principles are supported by the values of human-centeredness, security, and sustainability. The main ethical issues arising from the proliferation of AI include data bias, the opacity caused by black box models, and new risks such as deepfakes, misinformation, copyright infringement, and data leaks caused by generative artificial intelligence (GAI). Governance frameworks developed to address these issues aim to bridge the "principle-practice gap." Tools such as ECCOLA, Z-Inspection®, AI Fairness 360, and Aequitas, along with human oversight approaches (HITL, HOTL, HIC), aim to integrate ethical principles into system design. RAI applications are critically important, especially in sensitive areas such as healthcare and academia. In healthcare, data privacy and explainability come to the fore, while in academia, transparency, error control, and accountability are paramount. The risks of false data production and plagiarism in AI-supported research necessitate the updating of ethics education. Consequently, ethical AI applications are not only a TECHNICAL but also a social responsibility. The systematic implementation of ethical principles is essential for building reliable, human-centered, and sustainable artificial intelligence ecosystems.

Keywords - Artificial intelligence, RAI, ethics, responsible, transparency.

Giriş

Yapay zekâ (YZ) sistemlerinin, özellikle son yıllarda, hayatımızın ve iş dünyasının neredeyse her köşesine hızla sızdığını görüyoruz. YZ'nin sunduğu üretkenlik artışı, maliyet düşürme ve güvenlik gibi inanılmaz avantajlar, beraberinde yepyeni ve karmaşık etik kaygılar da getirmektedir [16]. Bu teknoloji o kadar hızlı ilerliyor ki, düzenlemeler ve etik tartışmalar maalesef geride kalmaktadır[24]. Bu durum, organizasyonlar, hükümetler ve araştırmacılar için, YZ'nin etik ve sorumlu bir şekilde nasıl konuşlandırılacağını anlamayı ve bu konuda somut adımlar atmayı zorunlu kılmaktadır [25].

Bu derleme çalışmasında, YZ etiği alanındaki temel tartışmaları ve yaklaşımları inceledim. Amacım, sadece temel etik prensipleri sıralamak değil, aynı zamanda Sorumlu YZ (RAI) kavramının ne anlama geldiğini, bu alandaki temel zorlukları (özellikle önyargı ve şeffaflık gibi) ve bu prensipleri pratiğe dökmek için geliştirilen yönetişim mekanizmalarını ve araçlarını derinlemesine analiz etmek olmuştur [26].



(Şekil 1:Yapay zeka sistemlerinde etik sorunların özeti.)

1. Sorumlu Yapay Zekâ (RAI) Kavramının Temelleri

Sorumlu YZ (Responsible AI – RAI) terimi, aslında tek başına duran bir kavram değildir; literatürde bununla ilişkili, hatta kimi zaman birbiriyle karıştırılan veya örtüşen birçok ifade bulunmaktadır. Bunlar arasında en sık karşılaşılanlar Güvenilir YZ (Trustworthy AI - TAI) ve Açıklanabilir YZ (Explainable AI - XAI) kavramlarıdır. Hatta bu terimler arasındaki tutarsızlık ve netlik eksikliğinin bile tartışıldığı görülmektedir. RAI, daha çok, YZ sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması sürecinde karşılaşılabilecek önyargı, ayrımcılık ve şeffaflık eksikliği gibi olumsuz riskleri en aza indirmeyi hedefleyen, kapsamlı bir çalışma şekli olarak tanımlanabilir [25].

1.1. YZ Etiği Kılavuzlarında Evrenselleşen İlkeler

Küresel ölçekte birçok politika, düzenleme ve kılavuzun incelendiği sistematik bir literatür taramasında, YZ etiğinin temel taşlarını oluşturan prensiplerin çoğunda bir fikir birliği oluşmuş durumdadır. Bu prensiplerin en kritik dört tanesi şunlardır [20]:

Şeffaflık ve Açıklanabilirlik (Transparency/Explainability): YZ kararlarının nasıl alındığının anlaşılır olması gerekmektedir [30]. Bu, Güvenilir YZ'nin kilit bir bileşenidir. Açıklanabilirlik, sistemlerin ne kadar iyi çalıştığını göstermek için de önemli bir özelliktir.

Gizlilik ve Veri Koruması (Privacy): YZ sistemlerinin veri toplama ve kullanma süreçlerinde, ulusal ve uluslararası düzenlemelerle uyumlu olması şarttır [11]. Veri ihlalleri, etik endişelerin başında gelmektedir ve mahremiyeti koruyan tekniklerin kullanılmasını gerektirir.

Hesap Verebilirlik (Accountability/Liability): YZ sistemlerinin aldığı kararların ve eylemlerin gerekçelendirilebilmesi, hatta gerektiğinde sorumluluğun kime ait olduğunun belirlenebilmesi gerekmektedir [16]. Algoritmaların denetlenebilir olması da bu prensiple yakından ilişkilidir.

Adalet ve Eşitlik (Fairness/Non-discrimination): YZ sistemlerinin geliştirilme sürecinde önyargılı olmaması ve ayrımcılık yapmaması temel bir gerekliliktir [13].

Bu dört ana ilkeye ek olarak, YZ yönetişim çerçevelerinde güvenilirlik, güvenlik, insan merkezlilik ve sürdürülebilirlik gibi prensipler de sıklıkla vurgulanmaktadır [23].

2. Yapay Zekâ Sistemlerinin Yarattığı Başlıca Etik Sorunlar

YZ'nin yaygınlaşmasıyla birlikte ortaya çıkan etik sorunlar, teorik olmaktan çıkıp günlük hayatı ve hatta hukuki süreçleri etkilemeye başlamıştır [24]. Bu sorunları üç ana başlıkta toplamak mümkündür.

2.1. Önyargı, Ayrımcılık ve Adil Olmama

Önyargı (bias), algoritmik sistemlerin etik açıdan en problemli alanlarından biridir. YZ'nin cinsiyetçi veya ırkçı davranışlar sergileyebildiği görülmüştür. Bunun temel nedeni, sistemlerin eğitildiği verilerin zaten insan deneyiminden kaynaklanan önyargılar içermesidir [13]. Örneğin, bir şirketin işe alım algoritmasının kadın adaylara karşı önyargılı davranması, bu durumun ne kadar somut sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir. Bu tür önyargılar, özellikle yüksek riskli alanlarda toplumsal eşitsizlikleri daha da derinleştirir. Sorumlu bir yaklaşım için, bu önyargıların farkında olunması ve eğitim verilerinin temsil edilebilirliğinin sağlanması gerekir [10].

2.2. Şeffaflık Eksikliği ve "Kara Kutu" Problemi

YZ sistemleri, özellikle derin öğrenme tabanlı modeller, o kadar karmaşık çalışmaktadır ki, karar verme mekanizmaları adeta bir "kara kutu" içinde kalmaktadır. Bu şeffaflık eksikliği etik zararlara yol açabilmektedir [4]. Örneğin, bir tıbbi YZ sistemi bir teşhis koyduğunda, bu karara nasıl ulaştığını açıklayamazsa, ne doktora ne de sisteme güven tesis edilebilir. Güvenilirliğin sağlanması için, YZ kararlarının nedenlerini netleştiren açıklanabilirlik (XAI) şarttır [30]. Bu açıklamalar, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre uyarlanmalı ve sezgisel biçimde sunulmalıdır.

2.3. Üretken Yapay Zekâ (Generative AI) Tarafından Getirilen Yeni Zorluklar

Üretken YZ (GAI), içerik üretebilen sistemlerin ortaya çıkışıyla etik sorunları yeni bir boyuta taşımıştır [5].

Yanlış Bilgi ve Derin Sahtecilik: GAI'nin inandırıcı sahte medya ve sentetik içerikler üretme yeteneği, gerçeğe ve güvene ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu sistemler, halüsinasyon denilen hatalarla yanlış bilgi ve uydurma referanslar üretebilmektedir.

Akademik Bütünlük ve Yazarlık: Üretken YZ'nin akademik yayınlarda kullanımı, ciddi etik ikilemler doğurmuştur. YZ sistemleri yazar olarak gösterilemez, çünkü doğruluk ve orijinallik konusunda hesap verebilir değildirler. Bu teknolojilerin kullanımı açıkça beyan edilmeli ve tüm sorumluluk insan yazarlarca üstlenilmelidir.

Gizli Veri Sızıntısı: Büyük dil modelleri, kullanıcıların hassas veya kişisel verilerini istemeden işleyebilir ya da ifşa edebilir [29].

3. Etik Prensiplerin Uygulamaya Çevrilmesi ve Yönetişim

Yapay zekâ etiği kılavuzlarının eleştirel incelemelerinde en çok öne çıkan sonuç, etik ilkelerin tek başına etik YZ'yi garanti edemeyeceğidir [24]. Yüksek düzeydeki ilkeleri pratiğe (tasarım, uygulama, izleme) dönüştürme konusunda büyük bir "ilke–uygulama boşluğu" olduğu görülmektedir [25].

3.1. Yönetişim Çerçevelerinin Gelişimi

Sorumlu YZ yönetişimi (RAI governance), YZ sistemlerinin etik, düzenleyici ve operasyonel boyutlarını bütüncül biçimde yönlendirmeyi hedefler. Bu çerçeveler, yapısal, ilişkisel ve prosedürel uygulamalar yoluyla tanımlanır. Uluslararası alanda yayımlanan kılavuzlar, güvenilir, hukuki ve etik açıdan sağlam sistemleri teşvik etmektedir [9, 23].

3.2. İlke-Uygulama Boşluğunu Kapatan Mekanizmalar ve Araçlar

Etik prensipleri pratikte hayata geçirmek amacıyla çeşitli yöntem ve araçlar geliştirilmiştir:

YZ Olgunluk Modelleri: Etik uyumlu YZ sistemlerinin uygulanmasına yardımcı olur.

ECCOLA Yöntemi: Etik açıdan uyumlu YZ sistemleri tasarlamak için kullanılan yapılandırılmış bir yaklaşımdır.

Algoritmik Denetim Araçları: AI Fairness 360 ve Aequitas gibi araçlar, önyargı ve adalet sorunlarını tespit etmeye yöneliktir [25].

Z-Inspection®: Güvenilir YZ'nin değerlendirilmesi için kullanılan bir süreçtir.

İnsan Gözetimi (Human Oversight): İnsan ajansının ve kontrolünün korunmasını hedefler. HITL, HOTL ve HIC gibi farklı düzeylerde uygulanabilir.

4. Sektörel Uygulamalar ve Gelecek Zorluklar

RAI'nin başarılı bir şekilde uygulanması, teknoloji geliştiricilerin ve uygulayıcıların bakış açılarına yakından bağlı. Alan çalışmalarını inceleyen araştırmalar, etik bilgi eksikliğinin ve ilkelerin belirsiz olmasının, etik YZ'yi benimsemede en büyük zorluklar arasında olduğunu gösteriyor.

4.1. Sağlık Hizmetlerinde Sorumlu YZ

Sağlık hizmetleri, YZ'nin en hassas uygulama alanlarından biridir [2, 3]. Bu alanda veri gizliliği, açıklanabilirlik ve güvenilirlik, hasta güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. LLM'ler her ne kadar cerrahi araştırma ve eğitim süreçlerinde kolaylık sağlasa da, uydurma veri ve referans üretme riski, hasta güvenliğini tehdit edebilir. Bu nedenle sağlık profesyonellerinin YZ çıktılarını doğrulaması ve denetlemesi gereklidir.

4.2. Bilimsel Araştırma ve Akademik Etik

YZ'nin bilimsel araştırmalarda kullanımı, hata kontrolü, şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkeleriyle desteklenmelidir.

Hatalar ve Hesap Verebilirlik: Araştırmacılar, YZ'nin ürettiği önyargılı veya hatalı çıktılardan sorumludur. YZ çıktılarının doğruluğunu kontrol etmemek, etik ihlal olarak değerlendirilebilir.

Şeffaf Beyan: YZ'nin hangi amaçla, hangi sistemle ve hangi ölçüde kullanıldığı açıkça belirtilmelidir. Sentetik verilerin nerede kullanıldığı net şekilde ifade edilmelidir.

Eğitim ve Mentörlük: Etik Araştırma Yürütme (Responsible Conduct of Research – RCR) eğitimlerinde YZ'nin etkilerinin ele alınması gerekmektedir.

Sonuç

Yapay zekâ etiği ve Sorumlu YZ (RAI) yaklaşımı, teoriden uygulamaya geçiş sürecinde hızla gelişen ancak zorluklarla dolu bir alandır. RAI'nin temel ilkeleri olan etik, gizlilik, güvenlik ve açıklanabilirlik, YZ sistemlerinin güvenilirlik temelini oluşturur [16, 19]. Ancak yalnızca ilkelerin varlığı yeterli değildir; ECCOLA, Z-Inspection® gibi yöntemler ve algoritmik denetim araçları, bu ilkeleri tasarım ve yönetim süreçlerine entegre etmeyi kolaylaştırır [25].

Asıl zorluk, etik prensiplerin hızla gelişen teknolojilerle senkronize biçimde güncellenebilmesini sağlamaktır. Geliştiriciler, uygulayıcılar ve araştırmacılar, sistemlerinin hatalarından ve yanlış bilgilerinden sorumlu olduklarını kabul etmelidir. Bu sorumluluğun ve şeffaflığın sağlanması, yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda YZ'nin toplumsal değerlerle uyumlu, insan odaklı bir biçimde gelişmesi için de zorunludur. Aksi takdirde, YZ'nin "kara kutu" doğası, toplumsal güveni ciddi biçimde sarsabilir.

Kaynakça

(1) Ağaoğlu, O. K. (2023). *Yapay zekâ etiği ve dijital dönüşümde sorumluluk kavramı*. İstanbul Üniversitesi Yayınları.

(2) Akgül, M., & Yalçın, M. (2022). *Etik ve yapay zekâ uygulamalarında karar verme süreçleri*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
(3) Akıncı, T. (2021). *Yapay zekâ teknolojilerinin etik boyutları*. *Uluslararası Bilişim ve Etik Dergisi, 4*(2), 45–58.
(4) Al-Kfairy, M., Mustafa, D., Kshetri, N., Insiew, M., & Alfandi, O. (2024). *Ethical challenges and solutions of generative AI: An interdisciplinary perspective*. *Informatics, 11*(3), 58. https://doi.org/10.3390/informatics11030058
(5) Altınok, B. (2020). *Veri etiği ve yapay zekâ uygulamalarında güvenlik*. *Bilişim ve Toplum, 12*(1), 33–42.
(6) Arslan, E. (2021). *Yapay zekâ sistemlerinde etik ilkeler ve sosyal sorumluluk*. *Felsefe ve Toplum, 9*(1), 88–103.
(7) Aydın, H. (2020). *Etik ilkelere göre yapay zekâ uygulamaları*. *Anadolu Bilim Dergisi, 5*(2), 66–74.
(8) Boddington, P. (2017). *Towards a code of ethics for artificial intelligence*. Springer.
(9) Can, M. (2022). *Makine öğrenmesi ve etik sorunlar*. *Teknoloji Felsefesi Dergisi, 8*(3), 54–69.
(10) Çetin, F. (2021). *Veri gizliliği, etik ve yapay zekâ: Güncel tartışmalar*. *Etik Bilimler Dergisi, 2*(1), 27–40.
(11) Demir, A. (2023). *Yapay zekâ etiğinde şeffaflık ve hesap verebilirlik*. *Türkiye Etik Araştırmaları Dergisi, 6*(1), 13–25.
(12) Doğan, K. (2022). *Algoritmik önyargılar ve etik karar verme süreçleri*. *Toplum ve Teknoloji, 5*(2), 120–135.
(13) Eren, L. (2021). *Yapay zekâ etiği ve insan hakları bağlamında sorumluluk kavramı*. *İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi, 10*(2), 245–259.
(14) Eryılmaz, D. (2020). *Otonom sistemlerde etik sorunlar ve çözüm yaklaşımları*. *Teknoloji ve Felsefe Dergisi, 3*(2), 33–49.
(15) Floridi, L. (2019). *Establishing the rules for building trustworthy AI*. *Nature Machine Intelligence, 1*(6), 261–262. https://doi.org/10.1038/s42256-019-0055-y
(16) Gökçe, E. (2022). *Yapay zekâda etik sorumluluk ve toplumsal etkiler*. *Sosyoteknik Araştırmalar Dergisi, 3*(1), 77–91.
(17) Gürkan, Ş. (2020). *Etik yapay zekâ tasarımı: Teorik bir inceleme*. *Yapay Zekâ ve Toplum, 1*(1), 9–23.
(18) Işık, H. (2021). *Yapay zekâ sistemlerinin etik temelleri ve insan merkezlilik*. *Bilişim Felsefesi Dergisi, 4*(1), 101–114.
(19) Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E. (2019). *The global landscape of AI ethics guidelines*. *Nature Machine Intelligence, 1*(9), 389–399. https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2
(20) Kara, D. (2023). *Yapay zekâ uygulamalarında etik farkındalık: Kuramsal bir yaklaşım*. *Etik ve Bilim Dergisi, 2*(3), 65–78.
(21) Kılıç, N. (2020). *Etik ilkeler bağlamında yapay zekâ politikaları*. *Kamu Yönetimi Araştırmaları Dergisi, 5*(2), 42–57.
(22) Koç, S. (2021). *Etik yapay zekâ yönetişimi: Avrupa Birliği örneği*. *Küresel Etik Dergisi, 6*(2), 34–49.
(23) Mittelstadt, B. (2023). *Principles alone cannot guarantee ethical AI*. *Nature Machine Intelligence, 5*(1), 5–8. https://doi.org/10.1038/s42256-022-00558-9
(24) Morley, J., Floridi, L., Kinsey, L., & Elhalal, A. (2021). *From what to how: An overview of AI ethics tools, methods and research to translate principles into practices*. *Ethics, Information & Technology, 23*(3), 273–286. https://doi.org/10.1007/s10676-021-09584-6
(25) Rahwan, I. (2018). *Society-in-the-loop: Programming the algorithmic social contract*. *Ethics and Information Technology, 20*(1), 5–14. https://doi.org/10.1007/s10676-017-9430-8
(26) Russell, S., & Norvig, P. (2022). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
(27) Şahin, P. (2023). *Etik yapay zekâ ve karar verme mekanizmalarında sorumluluk*. *Türkiye Teknoloji Dergisi, 9*(4), 22–39.
(28) Wright, D. (2020). *Ethical and legal challenges of artificial intelligence technologies*. *Computer Law & Security Review, 36*(2), 105–123.
(29) Zhou, L., & Chen, X. (2021). *Ethical decision-making in artificial intelligence: A systematic review*. *AI & Society, 36*(4), 1207–1221. https://doi.org/10.1007/s00146-020-01037-8

ANALYSIS OF EMBEDDED IOT SYSTEMS FOCUSED ON ULTRA-LOW POWER CONSUMPTION: A CRITICAL REVIEW OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ARCHITECTURAL OPTIMIZATION IN ENERGY MANAGEMENT

[1*] İbrahim Şahin, Havva Hazel ARAS

[1] Yozgat Bozok UNIVERSITY, Yozgat Vocational School, Department of Computer Technologies, Computer Programming Program, Center, Yozgat*

Abstract - This review study examines the challenge of simultaneously meeting energy efficiency and strong security requirements in modern embedded Internet of Things (IoT) systems. IoT devices necessitate ultra-low power consumption due to fundamental constraints such as compact structures, limited resources, restricted memory, and battery life. In this context, the integration of Artificial Intelligence and Machine Learning techniques into Energy Management Systems plays a vital role in managing large datasets and enabling dynamic optimization. At the architectural level, the use of lightweight communication protocols such as CoAP has been shown to reduce energy consumption by approximately 30.86% compared to other protocols. At the security layer, Speck encryption consumes 37% less CPU power and 5.2% less radio power compared to traditional AES encryption, demonstrating that it is the most suitable lightweight encryption for resource-constrained networks. These cross-layer optimizations enable a 30% reduction in total power consumption. In artificial intelligence applications, the use of AI for controlling HVAC systems in office buildings has been found to offer energy savings potential of up to 37%. However, the fact that most AIoT research is still in the Early Development Stages poses a challenge for practical adaptation.

Keywords - Embedded IoT Systems, Ultra-Low Power Consumption, Energy Management Systems, Artificial Intelligence, Machine Learning, Cross-Layered Architecture, Energy Efficiency.

Giriş: Sürdürülebilirlik Çağında Enerji Yönetimi ve IoT'nin Zorlukları

Küresel enerji talebindeki dramatik artış ve iklim değişikliği endişeleri, enerji sistemlerinin dijitalleşmesini hızlandırmıştır. Akıllı şebekeler ve mikro şebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji kullanımının optimize edilmesi için kilit teknolojilerdir. Bu sistemlerin sinir ağı, hiç şüphesiz IoT cihazlarıdır; zira bu cihazlar, algılama, ölçme ve yerel bilgi işlem yetenekleri sunar.

Gömülü Cihazların Kaynak Kısıtlamaları

IoT'nin başarısı, kaynak kısıtlı cihazlara (kısıtlı bellek, düşük bilgi işlem gücü) ne kadar güvenilir ve uzun ömürlü olduklarına bağlıdır. Özellikle mobil kitlesel IoT uygulamalarında cihazların küçük boyutları, kaynak eksiklikleri, yüksek güç tüketimleri ve sınırlı pil ömürleri temel sorunlardır. Bu zorluk, sistemin enerji verimli bir şekilde tasarlanmasını zorunlu kılar. Bu çalışmada, bu cihazların pil ömrünü maksimize etmek ve güvenliği korumak için kullanılan gelişmiş mimari ve yapay zekâ temelli yönetim stratejilerine odaklandım.

2. Ultra Düşük Güç Tüketimi için Gömülü Mimari Stratejiler

Enerji verimliliğini artırmanın ilk adımı, cihazların donanım ve protokol düzeyinde asgari enerji harcamasını sağlamaktır. Bu, özellikle iletişim ve güvenlik işlemlerinin optimizasyonunu içerir.

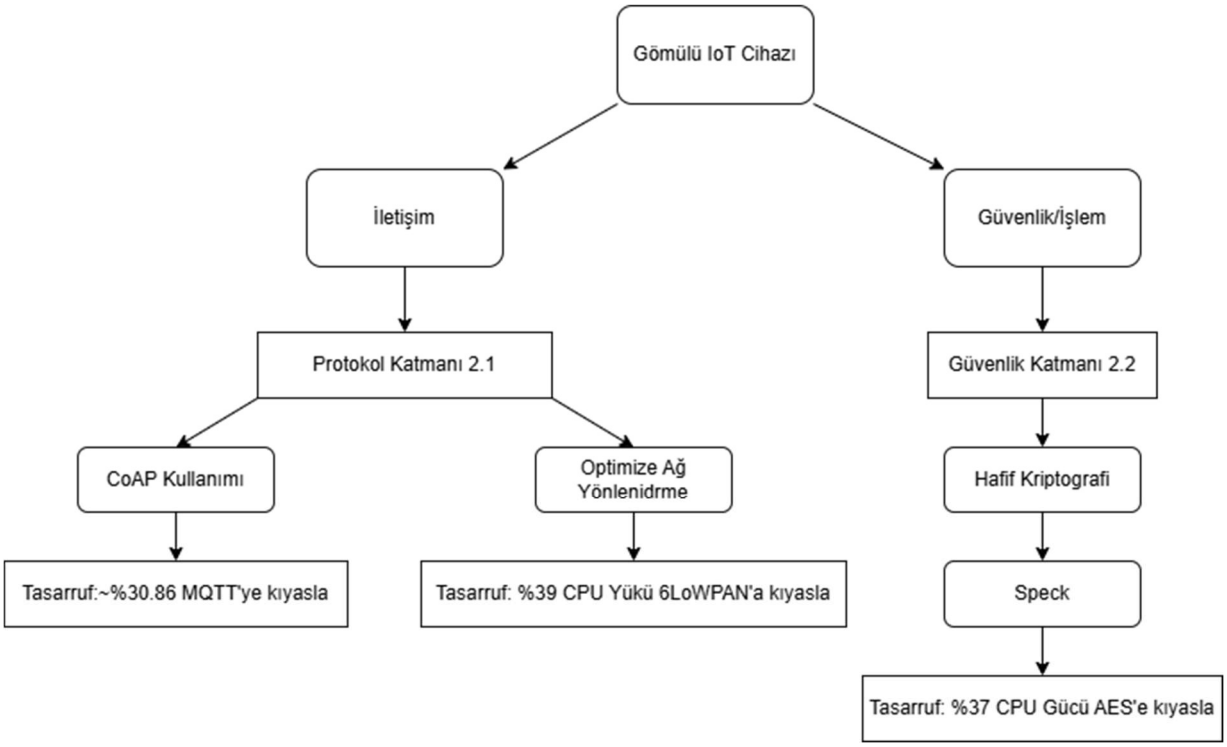
2.1. Protokol Katmanında Enerji Verimliliği

IoT cihazlarının en büyük enerji tüketicilerinden biri iletişimdir. Bu nedenle, genel ağ verimliliğini optimize eden protokoller kritik öneme sahiptir.

•

CoAP'nin

Enerji



Tasarrufundaki Rolü: Constrained Application Protocol, IoT ortamları için tasarlanmış bir uygulama katmanı protokolüdür ve hafif yapısı sayesinde düşük güç tüketimi sunar. Simülasyon sonuçlarına göre, akıllı binalarda CoAP'nin kullanılmasıyla enerji tüketiminin, MQTT gibi diğer mevcut şemalara göre yaklaşık %30,86 oranında azaltılması mümkündür. Bunun nedeni, CoAP'nin cihazın sürekli uyanık kalmak zorunda olmaması prensibini desteklemesidir. (Mustafa vd., 2025)

• Ağ Yönlendirme Optimizasyonu: Ağ katmanında, Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks gibi optimize edilmiş yönlendirme protokollerinin entegrasyonu, standart 6LoWPAN uygulamalarına kıyasla CPU yükünü %39 oranında ortadan kaldırabilir, bu da enerji tasarrufuna doğrudan katkı sağlar.

2.2. Güvenlik ve Verimliliği Dengeleyen Çapraz Katmanlı Mimariler

Enerji verimliliği ile güçlü güvenlik gereksinimleri arasındaki zorlu takas nedeniyle, çapraz katmanlı mimariler gereklidir; bu mimariler enerji optimizasyonunu ve adaptif güvenliği OSI modelinin tüm katmanlarında birleştirir. Bu mimariler sayesinde, güvenlikten ödün vermeden güç tüketiminde %30'luk bir azalma sağlanmıştır. (Mustafa vd., 2025; Kumar vd., 2021)

• Hafif Kriptografi Algoritmaları**:** Pil ile çalışan IoT düğümlerinde geleneksel kriptografi kullanmak pratik değildir. Bu nedenle Speck ve Present Cipher gibi hafif şifreleme algoritmaları öne çıkar. Yaptığımız analize göre, Speck, AES'e göre %37 daha az CPU gücü ve %5,2 daha az radyo gücü tüketmesi nedeniyle, IoT için en uygun hafif şifre olarak kabul edilmektedir. (Mustafa vd., 2025)

• Güvenli İletişim Protokolleri: CoAP, güvenli veri iletişimi sağlamak için Datagram Transport Layer Protection ve SHA-256 ile entegre edilebilir. DTLS, otomatik anahtar yönetimi, gizlilik, kimlik doğrulama ve veri bütünlüğü gibi temel güvenlik özelliklerini sağlar.

(Şekil 1: Mimari Optimizasyon Stratejileri.)

3. Yapay Zekâ Destekli Enerji Yönetimi (AIoT) Stratejileri

AIoT, IoT cihazlarından toplanan büyük veri setlerini analiz ederek akıllı kararlar almak ve enerji kullanımını optimize etmek için Yapay Zekâ tekniklerini kullanır.

3.1. Akıllı Yönetim için Otonom Veri Analizi Döngüleri (ACODAT)

Yapay Zekâ, Akıllı Bina Enerji Yönetim Sistemlerinde (BEMS) farklı görevler için kullanılabilir; örneğin modelleme çoklu ajan sistemleri ile, öğrenme ML yaklaşımları ile veya akıl yürütme bulanık sistemler ile. Bu görevler, Otonom Veri Analizi Döngüleri (ACODAT) konsepti etrafında organize edilebilir. ACODAT, bir sistemi gözlemleme, olanı analiz etme ve sistemi iyileştirmek için kararlar alma gibi üç ana görevi olan bir dizi veri analizi görevi olarak tanımlanır. (Aguilar vd., 2021)

• Gözlemleme (Monitoring): Süreci izleme.

• Analiz (Analysis): Ne olduğunu yorumlama. Arıza Tespiti ve Teşhisi bu aşamada kritik rol oynar.

• Karar Verme (Decision-Making): Amaçlara ulaşmak için hareket etme. Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu optimizasyon ve kontrol görevlerine odaklanmıştır.

3.2. Tahmin ve Optimizasyon için Gelişmiş ML Teknikleri

Tahmin, enerji yönetiminde en kritik AI görevlerinden biridir, çünkü yenilenebilir kaynakların çıktı gücünü ve enerji talebini önceden bilmek, kaynak tahsisini optimize etmek için esastır.

• Destek Vektör Makineleri (SVM) ile Tahmin: Support Vector Machine (SVM) modeli, rüzgar türbini ve fotovoltaik ünitelerinin doğru çıktı gücünü tahmin etmek için kullanılabilir. SVM, girdiyi daha yüksek bir boyutta doğrusal olmayan bir haritalama yaparak, ağırlıklandırma ve sapma faktörlerinin kullanımıyla tahmin doğruluğunu artırır. SVM, Yapay Sinir Ağları ve ARMA gibi diğer tahmin yöntemlerine kıyasla daha düşük hata oranları göstermiştir, bu da onu akıllı binalar için güvenilir bir model yapar.

• Ensemble (Topluluk) Öğrenmesi: Ensemble modelleri, birden fazla öğrenme algoritmasını birleştirerek tek bir algoritmadan daha iyi tahmin doğruluğu ve kararlılık elde eder. Bu modeller, tekli tahmin algoritmalarına karşı ortalama %50'ye varan bir iyileşme gösterir. Ensemble yaklaşımları, özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde çok etkilidir. (Wang & Srinivasan, 2017)

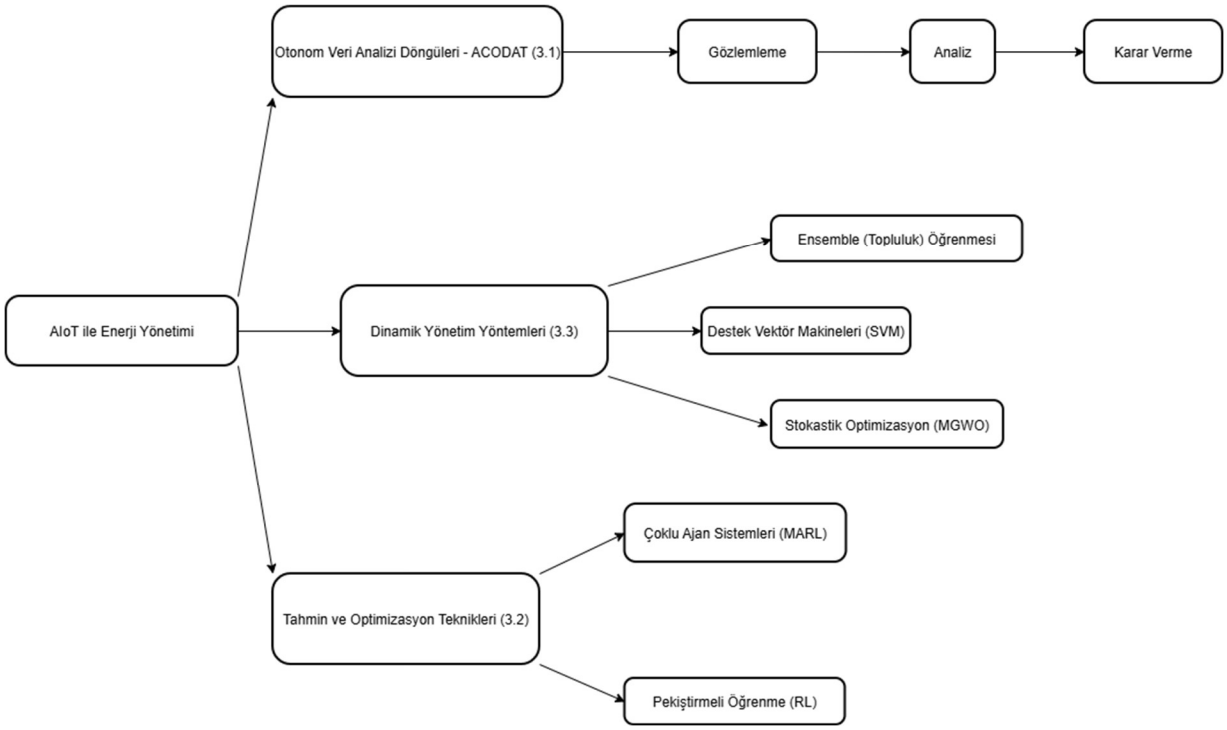
• Stokastik Optimizasyon: Gerçekçi enerji yönetimi, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki (Güneş, Rüzgar) belirsizliklerin modellenmesini gerektirir. Bu sorunu çözmek için Point Estimate Method ile birleştirilmiş Grey Wolf Optimizer (MGWO) gibi stokastik çerçeveler kullanılır. MGWO algoritması, optimizasyon sürecini kolaylaştırmak için kurtların avlanma alışkanlıklarından ilham alır. Bu stokastik analizler, deterministik analizlere kıyasla daha gerçekçi ve güvenilir maliyet değerleri sağlar. (Huang vd., 2022)

3.3. Dinamik Yönetim için Gelişmiş Öğrenme Yöntemleri

Dinamik ve uyarlanabilir sistemler için, Yapay Zekâ'nın geleneksel gözetimli öğrenme dışındaki yöntemleri önemlidir.

• Pekiştirmeli Öğrenme (RL)**:** RL, enerji yönetim sistemlerinde büyük potansiyel sunan bir öğrenme türüdür. Bir ajan, uzun vadede kümülatif pekiştirmeyi optimize eden bir hareket politikası bulmak için çevreyle etkileşime girer. RL, özellikle dinamik yük atma ve mikro şebekelerde gerçek zamanlı enerji yönetimi için kullanılır. Bu alandaki çalışmaların eksikliği, RL için önemli bir araştırma boşluğu olduğunu gösteriyor. (Tasmant vd., 2025)

• Çoklu Ajan Sistemleri (MAS) ve MARL: Karmaşık, dağıtık ve otonom yönetim sistemlerini modellemek için Çoklu Ajan Sistemleri (MAS) kullanılır. MAS, termal konforu iyileştirmek ve enerji tüketimini azaltmak gibi küresel bir problemi çözmek için dinamik olarak etkileşen birden çok bileşeni koordine eder. Çoklu Ajan Derin Pekiştirmeli Öğrenme (MARL) ise, karmaşık ortamlarda dağıtılmış öğrenmeyi yüksek düzeyde ele alabilen bir yaklaşımdır. Ancak MARL'ın dezavantajı, çok yüksek hesaplama maliyeti gerektirmesidir.



(Şekil 2: Yapay Zekâ Yönetim Yaklaşımları.)

4. Uygulama Alanı: Akıllı Bina Enerji Yönetim Sistemleri

Binalar, enerji tüketiminin ana kaynaklarından biridir ve bu alanda AI'nın potansiyeli çok yüksektir.

4.1. Binalara Özgü Enerji Tasarrufu ve Optimizasyon Hedefleri

AI tekniklerinin uygulanmasıyla binalarda ortalama enerji tasarrufu %21,81 ile %44,36 arasında değişmektedir. (Merabet vd., 2021)

• Ofis Binaları: Ofisler, en büyük tasarruf potansiyelini sunar. AI modelleri HVAC kontrol ve optimizasyonu için kullanıldığında %37'ye kadar enerji tasarrufu sağlanabilir. Hatta bazı çalışmalar, termal enerji tüketiminde %58,5'e kadar önemli azalmalar olduğunu göstermiştir. (Ali vd., 2024; Merabet vd., 2021)

• Diğer Bina Tipleri: Konut binaları ve eğitim/araştırma binaları, daha düşük BEMS zekasına sahip oldukları için sırasıyla %23 ve %21'e kadar daha düşük tasarruf potansiyeli gösterirler. Eğitim ve araştırma binaları (%42) ve ticari binalar (%33), araştırmacıların AI modellerini doğrulamak için en çok tercih ettiği bina tipleridir, çünkü bu binalarda veri kullanılabilirliği (data availability) daha kolaydır.

• Yük Yönetimi: Bir ticari binada, aydınlatma, fan ve USB şarj cihazı gibi yükler birincil (major load), klima ise ikincil (secondary load) olarak kategorize edilebilir. Bu kategorizasyon, güç tüketimi desenini görüntülemek ve yükün otomatik kontrolünü sağlamak için kullanılır.

4.2. Veri Yönetimi ve Olgunluk Zorlukları

AI modellerinin güvenilirliği, kullanılan veri türüne bağlıdır. Meteorolojik veriler, çalışmaların %60'ında ana girdi olarak kullanılırken, enerji tüketiminde büyük etkisi olan kullanıcı/doluluk bilgileri (occupancy information), mahremiyet sorunları ve sensör eksikliği nedeniyle sadece %29'unda kullanılmıştır. (Merabet vd., 2021)

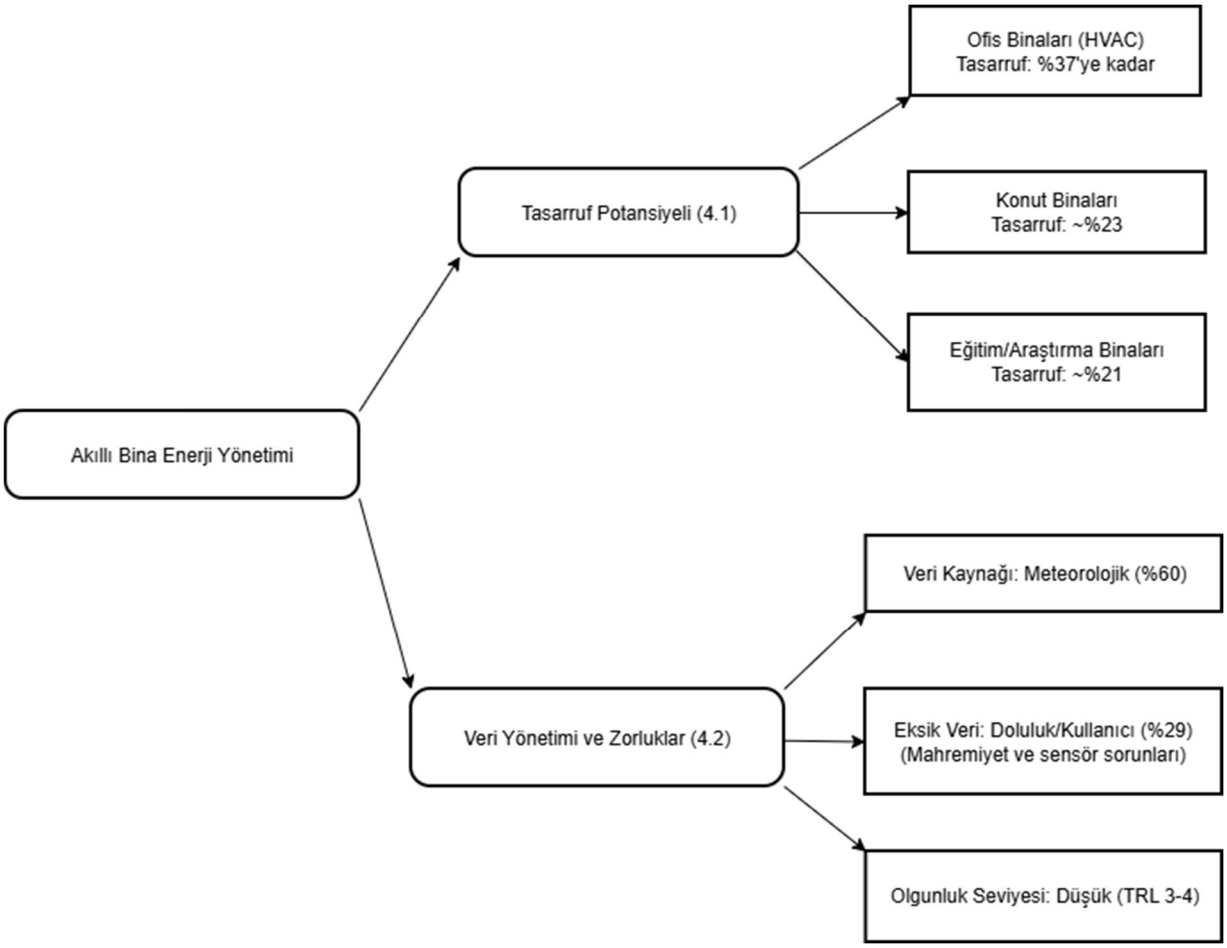
Ayrıca, AIoT sistemlerinin çoğu, laboratuvar ortamında prototip aşamasında (TRL 3 ve 4) kaldığı için, performansları ve güvenilirlikleri hakkında standartlaştırılmış metriklerin eksikliği, farklı çalışmaları karşılaştırmayı zorlaştırmaktadır. (Khadam vd., 2025)

(Şekil 3:Akıllı Binalarda AI ile Enerji Tasarruf Potansiyeli)

5. Sonuç ve Gelecek Yönelimleri

Ultra düşük güç tüketimine yönelik gömülü IoT sistemleri, enerji verimliliğini güvenliği birleştiren kapsamlı, çapraz katmanlı mimarilere dayanmaktadır. Yapay Zekâ, tahmin (SVM) ve akıllı optimizasyon yoluyla enerji yönetiminde vazgeçilmez bir araçtır.

Ancak, mevcut



araştırmaların erken olgunluk seviyesi ve RL gibi ileri öğrenme yöntemlerinin sınırlı kullanımı, bu alandaki adaptasyonu yavaşlatmaktadır. Gelecekte, MARL gibi karmaşık ve yüksek hesaplama maliyetli yöntemlerin daha verimli hale getirilmesi ve hibrit dağıtım mimarilerinin daha fazla incelenmesi, sürdürülebilir enerji sistemlerinin tam potansiyeline ulaşmasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

1. Tasmant, H., et al. (2025). A review of machine learning and IoT-based energy management systems for AC microgrids. *Computers and Electrical Engineering, 127*, 110563.
2. Tasmant, H., et al. (2025). *Computers and Electrical Engineering, 127*, 110563 (RL/MARL/Hybrid tabloları).
3. Tasmant, H., et al. (2025). *Computers and Electrical Engineering, 127*, 110563.
4. Aguilar, J., et al. (2021). A systematic literature review on the use of artificial intelligence in energy self-management in smart buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151*, 111530.
5. Aguilar, J., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151*, 111530 (LAMDA, ANN, RL Atıfları).
6. Khadam, U., Davidsson, P., & Spalazzese, R. (2025). A systematic literature review on AI in IoT systems: Tasks, applications, and deployment. *Internet of Things, 34*, 101779.
7. Reddy, K.S.S., et al. (2022). Power management using AI-based IOT systems. *Measurement: Sensors, 24*, 100551.
8. Ali, D.M.T.E., Motuzienė, V., & Džiugaitė-Tumėnienė, R. (2024). AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings. *Energies, 17*(17), 4277.
9. Kumar, A., et al. (2021). Secure and energy-efficient smart building architecture with emerging technology IoT. *Computer Communications, 176*, 207–217.
10. Mustafa, R., et al. (2025). A Secure and Energy Efficient Cross-Layer Network Architecture for Internet Of Things. *Preprints.org*.
11. Wang, Z., & Srinivasan, R.S. (2017). A review of artificial intelligence based building energy use prediction... *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75*(7), 796–808.
12. Merabet, G.H., et al. (2021). Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency... *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969.
13. Huang, J., Koroteev, D.D., & Rynkovskaya, M. (2022). Building energy management and forecasting using artificial intelligence... *Computers and Electrical Engineering, 99*, 107790.
14. Ahmad, T., et al. (2022). Energetics Systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0. *Energy Reports, 8*, 334–361.
15. Mariano-Hernández, D., et al. (2021). A review of strategies for building energy management system... *Journal of Building Engineering, 33*, 101692.
16. Maaji, S.S., et al. (2018). «On-line voltage stability monitoring using an Ensemble AdaBoost classifier» *2018 4th International Conference on Information Management (ICIM)*.
17. Rafiei, M., et al. (2018). «Probabilistic load forecasting using an improved wavelet neural network trained by generalized extreme learning machine» *IEEE Trans Smart Grid, 9*(6).
18. Zeng, N., et al. (2017). «A switching delayed PSO optimized extreme learning machine for short-term load forecasting» *Neurocomputing, 240*.
19. Ndeke, C.B., et al. (2024). «Energy management strategy for DC Micro-grid system with the important penetration of renewable Energy». *Appl Sci, 14*(6).
20. Khan, Z.A., et al. (2020). «Towards Efficient Electricity Forecasting in Residential and Commercial Buildings: A Novel Hybrid CNN with a LSTM-AE Based Framework». *Sensors, 20*.
21. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (Tablo 3-7-8-9).
22. Wang, Z., & Srinivasan, R.S. (2017). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75*(7), 796–808 (Fig. 1-4).
23. Wang, Z., & Srinivasan, R.S. (2017). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75*(7), 796–808 (Tablo 1-2-3).
24. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (3.2. Optimized functions in support of AI-based control).

25. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (3.3. Performance of AI techniques).
26. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (6.2. Comfort modeling and dynamic temperature set-point adjustment).
27. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (3.1. Artificial Intelligence techniques in building control).
28. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (3.1. Developed AI control techniques).
29. Merabet, G.H., et al. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110969 (3.2. Optimized functions in support of AI-based control)

PREDİCTİVE MAINTENANCE IN INDUSTRY

Furkan DOĞAN

Selçuk UNIVERSITY Faculty of Science Mechanical Engineering, Selçuklu, Konya

(248271001006@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract - Increasing competition in the globalized production ecosystem makes the need for smart factories in industry more apparent every day. This situation puts the manufacturing sector under serious pressure to transform, directing it towards predictive approaches in production processes. It has become an inevitable necessity for businesses seeking to maintain and increase their competitive strength to improve their efficiency and productivity. In this regard, adopting advanced analytical methods provides a significant advantage. The Internet of Things (IoT) enables the systematic collection of data from industrial operations, the storage of this data, and its analysis to transform it into meaningful information. When processed with analytical techniques, IoT-based big data offers new perspectives on existing problems and contributes to the emergence of different research areas. Nevertheless, studies on how businesses can profitably integrate IoT into their strategic and operational processes are quite limited. In this context, the study examines how maintenance management can be made more effective through the use of big data generated in industrial environments and evaluates the potential offered by predictive maintenance. Predictive maintenance is based on monitoring the condition of equipment and components before a failure occurs, evaluating them using analytical methods, and thus estimating their lifespan and determining the probability of failure. Thanks to this approach, maintenance activities are planned and optimized more accurately using real-time data and machine learning-based prediction models in situations where equipment could cause unplanned downtime.

Keywords - Predictive Maintenance, Internet of Things (IoT), Big Data, Industry 4.0

GİRİŞ

"Nesnelerin İnterneti" (Internet of Things, IoT) kavramı ilk kez 1999 yılında Kevin Ashton'ın "Tedarik Zincirlerinde RFID Kullanımı" başlıklı sunumunda gündeme getirilmiştir. IoT, en genel tanımıyla; insanlar, veriler, süreçler, makineler ve fiziksel nesneler arasında kesintisiz bir iletişim ağı oluşturan teknolojik bir ekosistemi ifade eder. Bu yüksek düzeyde bağlantı yeteneği, işletmelerden bireylere ve şehir yönetimlerine kadar uzanan geniş bir yelpazede yeni işlevler, daha zengin kullanıcı deneyimleri ve önemli ekonomik fırsatlar ortaya çıkarmaktadır. Aradan geçen yirmi yılın ardından IoT, küresel ölçekte tanınan bir kavram hâline gelmiş ve hem akademik çevrelerde hem de endüstride hızla gelişen temel bir araştırma ve uygulama alanı olmuştur[1],[2].

IoT, özellikle siber-fiziksel sistemler aracılığıyla üretim süreçlerinin izlenmesi, analiz edilmesi ve otomatikleştirilmesi sayesinde imalat sanayisinde önemli ölçüde verimlilik artışı sağlamaktadır. Bu teknolojik entegrasyon, işletmelerin ekonomik performansı ve rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Üretim ekipmanlarında ortaya çıkabilecek arızalar veya süreç hataları tüm üretim akışını durdurabildiğinden, ekipman güvenilirliğini artırmaya yönelik bakım stratejileri kritik önem taşır. Bu doğrultuda kestirimci bakım, arıza olasılıklarının önceden belirlenmesine ve bakım faaliyetlerinin veri odaklı olarak planlanmasına imkân tanıdığı için günümüzde giderek daha fazla önem kazanmaktadır[3].

Optimize edilen endüstriyel üretim süreçlerinin internet tabanlı teknolojilerle bütünleşmesi, üretim akışını, bakım stratejilerini ve bakım yönetimini köklü biçimde dönüştürmektedir. Bu nedenle işletmeler, Endüstri 4.0 kapsamında ortaya çıkan yeni teknolojik eğilimleri değerlendirmek ve kendi dijitalleşme stratejilerini belirlemek zorunda kalmaktadır[3]. Öte yandan, küreselleşen üretim ekosistemi ve artan ürün çeşitliliği yerel sanayiler için önemli zorluklar yaratmakta; bu rekabetçi ortam, işletmelerin verimlilik ve üretkenliklerini artırmalarını kaçınılmaz hâle getirmektedir.

Üretim verimliliğinin artırılabilmesi, işletmelerin üretim hatlarını ve yönetim süreçlerini dijital ortama taşıyarak hata oranlarını en aza indirmesine bağlıdır. Bu dönüşüm; Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management, PLM), Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Kurumsal Kaynak Planlama (Enterprise Resource Planning, ERP) gibi sistemlerin etkin ve entegre biçimde kullanılmasını gerektirir. Bununla birlikte, üretim hatlarında yer alan makinelerin performansı da doğrudan bu ekipmanların güvenilir çalışmasına ve kabul edilebilir hata sınırları içinde faaliyet göstermesine bağlıdır. Bu noktada, makinelerden elde edilen verilerin çeşitlendirilmesi, planlı ve plansız duruşların azaltılması ve bakım süreçlerinin doğru biçimde yönetilmesi kritik önem taşımaktadır. Üretim hattında süreç optimizasyonunun sağlanması, makinelerin anlık olarak ürettiği veri çeşitliliğinin artırılması, bu verilerin hızlı ve doğru biçimde analiz edilmesi ve sonuçlara dayalı olarak zamanında müdahalede bulunulmasıyla mümkündür. Veri çeşitliliğinin artırılmasında IoT önemli bir rol oynamakta; sensörlerden elde edilen veriler dijital ortama aktarılmakta, modellenmekte ve siber-fiziksel sistemler ile gelişmiş analitik yöntemler aracılığıyla yapay zekâ destekli analizlere tabi tutulmaktadır. Bu analizler, ekipman verimliliğinin artırılmasına ve üretim hatlarında beklenmeyen duruşların en aza indirilmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, makinelerin çalışma performansının optimize edilmesi ve plansız duruşların önüne geçilmesi, bakım faaliyetlerinin doğru zamanlamayla gerçekleştirilmesi açısından hayati bir unsur haline gelmiştir.

KESTİRİMCİ BAKIM İÇİN ENDÜSTRİ 4.0

Endüstri 4.0, Siber Fiziksel Sistemler, Nesnelerin İnterneti (IoT), Hizmetlerin İnterneti (Internet of Services, IoS) ve veri madenciliğine dayalı teknolojik yeniliklerin bütünleşmesiyle ortaya çıkan kapsamlı bir dönüşüm yaklaşımını ifade etmektedir. Siber Fiziksel Sistemler; fiziksel bileşenlerin hesaplama, iletişim ve kontrol mekanizmalarıyla bütünleşerek insanlarla etkileşime girebilen ve fiziksel çevreye uyum sağlayabilen yeni nesil sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerin temel özelliği, fiziksel dünyanın dijital teknolojiler aracılığıyla algılanabilmesi, yorumlanabilmesi ve genişletilebilmesidir .

IoT, algılama, tanıma, konum izleme ve veri toplama işlevi gören çeşitli aygıtlar sayesinde fiziksel dünyaya ilişkin bilgilerin gerçek zamanlı olarak erişilebilir olmasını sağlayarak nesneler arasındaki bağlantıyı her zaman ve her yerde mümkün kılmaktadır[4] . IoS ise, fiziksel varlıkların yerine hizmetlerin dijital olarak sunulmasını esas alan bir yaklaşım olup, sistemler arası etkileşimi ve işbirliğini desteklemektedir. Bu teknolojilerin bir arada kullanılması, bütünsel üretim ekosisteminde paydaşlar arasında daha güçlü bir entegrasyon ve koordinasyon sağlamaktadır.

Bu bölümde, Endüstri 4.0 bileşenlerinin kestirimci bakım uygulamaları açısından rolü ve katkıları incelenerek kapsamlı bir değerlendirme sunulacaktır.

Bulut Bilişim

Bulut bilişim, sunduğu esneklik ve ölçeklenebilirlik sayesinde Endüstri 4.0'ın önemli bir bileşeni olarak öne çıkmakta ve dünya genelinde işletmeler tarafından hızla benimsenmektedir[5] . Farklı kaynaklardan toplana n verilerin ortak bir platformda verimli biçimde yönetilmesini sağlayan bu yapı, IoT uygulamaları için bütünleşik bir hizmet altyapısı sunmaktadır[6] . Bulut tabanlı sistemler, işbirliğine dayalı ve isteğe göre özelleştirilebilir hizmetlerin geliştirilmesini mümkün kılarken, kestirimci bakım süreçlerinde bellek kapasitesi, işlem gücü, veri güvenliği ve çoklu veri kaynağı entegrasyonu gibi temel sorunları da etkin şekilde çözmektedir.

Endüstriyel Büyük Veri

Endüstri 4.0, akıllı analitik yöntemler ile Siber-Fiziksel Sistemlerin bütünleşmesiyle yeni bir üretim yönetimi yaklaşımı sunmakta ve bu yapı farklı türlerde sürekli endüstriyel veri üretmektedir. Ortaya çıkan büyük veri; üretim, tedarik zinciri, bakım, kalite yönetimi ve enerji gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [7]. Bakım ve arıza tahmini kapsamında, ekipman durumunun izlenebilmesi için uygun sensör konfigürasyonları ve sinyal işleme teknikleri uygulanmakta; geçmiş ve mevcut verilerin veri madenciliği yöntemleriyle karşılaştırılması ise olası arıza düzeylerinin belirlenmesine ve kritik bileşenlerin güvenilirlik analizinin yapılmasına imkân sağlamaktadır.

Akıllı Fabrika

Endüstri 4.0 devrimi, Siber-Fiziksel Sistemlerin fiziksel süreçleri izleyerek bunların sanal bir temsilini oluşturduğu "Akıllı Fabrika" vizyonunun hayata geçirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik yapı, fabrikadaki ürünlerin yalnızca kimliklerinin belirlenmesini değil, aynı zamanda özelliklerinin, kullanım geçmişlerinin ve mevcut durumlarının Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) teknolojisi aracılığıyla kaydedilmesini sağlamaktadır. Böylece Siber-Fiziksel Sistemler, internet üzerinden iletişim ve işbirliği kurarak fiziksel olan ile dijital olan arasında bütünleşik bir etkileşim ortamı oluşturmaktadır[8] .

BAKIM STRATEJİLERİNİN İNCELENMESİ

Bakım, ekipmanların olası arızalardan korunarak kullanım ömürleri boyunca kesintisiz ve verimli çalışmasının sağlanması olarak tanımlanır. Beklenmeyen makine arızaları, üretim süreçlerinde duruşlara neden olarak hem kapasite kaybına hem de yüksek bakım maliyetlerine yol açmaktadır. Bu nedenle üretim sürekliliğinin sağlanması açısından en uygun bakım yönteminin seçilmesi kritik önem taşır. Bu yöntemler arasında kestirimci bakım, arızaların oluşmadan önce öngörülmesine ve duruşların en aza indirilmesine olanak tanıdığı için en etkili yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir[9] .

Bir bakım süreci; izleme, durum değerlendirme, rutin bakım, onarım, revizyon ve yeniden yapılandırma gibi çeşitli faaliyetleri içerebilmektedir. Avrupa standardına göre bakım, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca işlevini sürdürebilmesi veya işlevsel hâle geri getirilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen tüm teknik, idari ve yönetimsel faaliyetlerin toplamı olarak tanımlanmaktadır [10]. Bakım stratejilerinin günümüzdeki gelişmiş yapısı ise uzun yıllara dayanan tarihsel bir birikimin sonucudur.

Çizelge 1. Bakım Stratejilerinin Sınıflandırılması[11]

Bakım stratejileri, Çizelge 1'de gösterildiği üzere Arızi Bakım, Periyodik Bakım ve Kestirimci Bakım olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılmaktadır[11] . Arızi Bakım, ekipmanda arıza meydana geldikten sonra uygulanan ve bu yönüyle plansız bir yaklaşım niteliği taşıyan bakım faaliyetlerini ifade eder. Periyodik Bakım ise ekipman arızası oluşmadan, belirli zaman aralıklarına veya çalışma saatlerine bağlı olarak gerçekleştirilen, ancak genellikle izleme temelli olmayan bir stratejidir. Günümüzde en modern ve etkin bakım politikalarından biri kabul edilen Kestirimci Bakım, ekipman durum göstergelerinin izlenmesine dayanarak arıza olasılığını önceden belirlemeyi ve bakım faaliyetlerini bu doğrultuda optimize etmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır[12] .

Arizai Bakım

Arızai (reaktif) bakım, ekipmanın arıza meydana gelene kadar çalıştırılmasına dayanan bir yaklaşımdır. Arıza sonrası onarım, teknik personelin yetkinliği ölçüsünde gerçekleştirilmekte; gerekirse ekipman servisine başvurulmaktadır. Bu bakım türü, öngörülemeyen duruşlar nedeniyle üretim kayıplarına ve yüksek maliyetlere yol açmakta, ayrıca

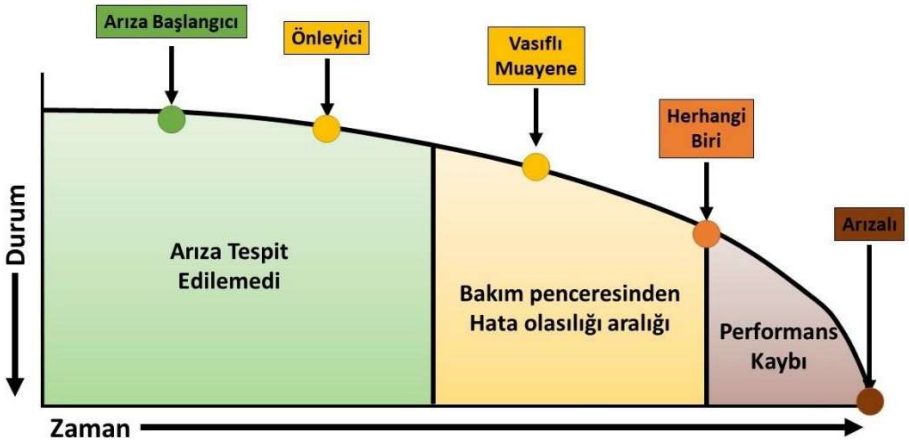
arızanın diğer bileşenlere veya işlemdeki ürüne zarar verme riskini artırmaktadır. Ekipmanın performansı düşmesine rağmen çalıştırılması ise arıza öncesi dönemde gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadır.

Periyodik Bakım

Periyodik bakım, işletme varlıklarının işlevselliğini ve verimliliğini sürdürebilmek amacıyla makine ve ekipmanların geçmiş bakım kayıtları ile çalışma koşullarının değerlendirilerek belirli zaman planlarına göre durdurulup bakım talimatları doğrultusunda işleme alınmasını ifade eder. Bu bakım türünde, değiştirilecek yedek parçalardan işçilik ihtiyacına kadar tüm süreçlerin önceden planlanması ve hazır bulundurulması esastır.

Periyodik bakım, ekipmanların arıza olasılığını azaltmak amacıyla belirli zaman aralıkları veya kullanım süreleri esas alınarak gerçekleştirilen bir bakım yaklaşımıdır. "Önleyici bakım" olarak da adlandırılan bu yöntem, uygulama kolaylığı ve planlanabilirliği nedeniyle işletmelerde en yaygın kullanılan bakım türlerinden biridir[13] ,[14] .

Amaç, işletmelerde arızi bakım gereksinimini en aza indirerek bakım süreçlerinin optimize edilmesidir. Tesislerde yürütülen bakım faaliyetleri çeşitli riskler barındırdığından, sistemli bir bakım yönetiminin oluşturulması kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, tüm bakım faaliyetlerini kapsayan bakım prosedürleri ile bakım sırasında izlenmesi gereken adımları tanımlayan bakım talimatlarına dayalı olarak uygulanan periyodik bakım, potansiyel tehlikelerin azaltılmasına ve bakım işlemlerinin daha güvenli şekilde yürütülmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 1. Bakım Döngüsü Grafiği

Şekil 1'de makinanın zamana bağlı performans durumunu bakım verileriyle ilişkilendirilmesi gösterilmiştir.

Güvenilirlik Tabanlı Periyodik Bakım

Periyodik bakım, makine bileşenlerinin geçmiş arıza istatistikleri dikkate alınarak planlanan bir bakım yaklaşımıdır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, parçaların bakım yaşam döngüleri analiz edilerek bakım aralıkları optimize edilmekte ve ekipman ömrü boyunca ortaya çıkabilecek arızaların önüne geçilmesi hedeflenmektedir[15].

Zamana Dayalı Periyodik Bakım

Zamana bağlı planlı bakım, periyodik bakımın en yaygın uygulama biçimidir. Bu yaklaşımda, makine üreticileri tarafından belirlenen bakım aralıkları esas alınarak ekipmanlar düzenli olarak bakıma alınır. Buna karşın, bakım aralığı içerisinde bir arıza meydana gelmesi durumunda ise arızi bakım yöntemine başvurulmaktadır.

Kestirimci Bakım

Kestirimci bakım, ekipmanların arıza oluşmadan önce durum temelli olarak izlenmesi ve sensör verilerinin analitik yöntemlerle değerlendirilmesi yoluyla arıza olasılığının tahmin edilmesine dayanan bir yaklaşımdır. Literatürde bu yöntem; potansiyel arızaların erken tespiti ve gelişiminin engellenmesi için zamanında müdahale imkânı sunması

nedeniyle modern bakım stratejileri arasında en etkili yöntemlerden biri olarak tanımlanmaktadır. Durum temelli yapısı nedeniyle kestirimci bakım, zaman bazlı periyodik bakımdan ayrılmakta ve ekipman ömrünün optimize edilmesine önemli katkı sağlamaktadır.

Kestirimci bakım, ekipman durumunun izlenmesine dayalı olarak arıza zamanının öngörülmesini ve bu sayede bakım maliyetleri ile arıza süresinin en aza indirilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. Literatürde bu yöntem, potansiyel arızaların gerçekleşmeden önce bakım faaliyetlerinin planlanmasına olanak tanıması ve sıfır arıza üretim hedefini desteklemesi nedeniyle modern bakım stratejilerinin en etkinlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Yapay zekâ teknolojilerindeki gelişmeler, önleyici ve kestirimci bakım uygulamalarının kapsamını önemli ölçüde genişleterek makine bakımının yalnızca arıza tespiti ve tahmininden ibaret olmayan daha bütüncül bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır. Bu yaklaşım, makine öğrenimi ve veri analitiği aracılığıyla ekipmanların çalışma koşulları, üretim geçmişi, bakım kayıtları ve performans parametreleri gibi geniş bir veri setini kullanarak cihazların ortalama performansını, potansiyel arızalarını, bakım gereksinimlerini ve uygun müdahale yöntemlerini belirlemektedir. Böylece üretim hattındaki kritik ekipmanların arızaları gerçekleşmeden önce tespit edilmekte; bakım ekipleri doğru onarım bilgileriyle yönlendirilerek duruş süreleri önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu durum, üretim sürekliliğinin korunmasına, verimlilik artışına ve bakım maliyetlerinin düşürülmesine doğrudan katkı sağlamaktadır[16] .

Bununla birlikte, büyük veri analitiği ve bulut bilişim gibi teknolojiler kullanılmaksızın kestirimci bakımın tüm avantajlarının elde edilmesi güçtür. Pek çok üretim sistemi, veri kalitesi ve veri erişimine yönelik yüksek gereksinimler nedeniyle büyük ölçekli veriyi yönetme kapasitesine sahip değildir ve gerekli bilgilerin elde edilebilmesi için birden fazla veri kaynağına bağımlı bir yapı sergilemektedir.

Diğer bakım stratejileriyle kıyaslandığında, Kestirimci Bakımın birçok avantajları vardır. Bunlardan bazıları:

I. Bakım gerektiren ekipman yalnızca yakın bir arızadan önce kapatılır. Dolayısıyla duruşlar ve süreleri azalır.

II. Ekipmanı korumak için harcanan toplam süreyi azaltır.

III. Yıkıcı zararlardan kaçınarak bakım maliyetlerini azaltır ve bakımları kolaylaştırır.

IV. Makinelerin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini arttırarak iş bitim sürelerini optimum hale getirir.

V. Ekipmanın ve işlem ömrünün uzatılmasını sağlar.

Bununla birlikte, Kestirimci Bakım aşağıdaki gibi çeşitli zorluklarla da karşı karşıyadır[17] :

I. Veri paylaşımı ve veri yayını için birden fazla kaynaktan veri erişimi, veri kalitesi ve veri birleşmesi gibi yüksek talepler. Bu veri kaynakları genellikle heterojen bir ortamda çalıştığından, sistemler arasındaki entegrasyon problemlidir[18] .

II. Endüstriyel büyük verilerle başa çıkma zorluğu. Kestirimci bakım için büyük işletmelerin büyük verilerden yararlanması, farklı türdeki bilgileri destekleme yeteneğine, büyük veri kümelerini saklama altyapısına, toplanıp depolanan bilgiyi kaldırabilme esnekliğine ve verilerin tarihsel analizini gerçek zamanlı işleme yeteneğine sahip olmasını gerektirir[19] .

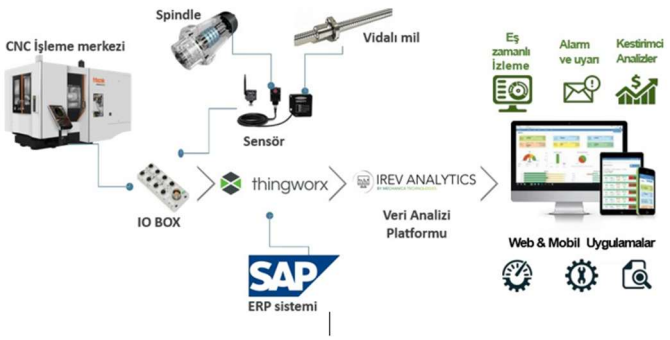
DURUM ÇALIŞMASI:VERIMLILIK ODAKLI KESTIRIMCI BAKIM PROJESI

Bu bölümde, kestirimci bakımın uygulanmasına yönelik bir saha çalışması sunulmaktadır. Örnek olay, üretim sürecinde ortaya çıkan hata, kusur ve bakım maliyetlerini azaltmayı amaçlayan; belirtilerin izlenmesi yoluyla ekipman sağlığının değerlendirilmesi ve geleceğe yönelik tahminlerin yapılmasına odaklanan Verimlilik Odaklı Kestirimci Bakım projesine dayanmaktadır.

Saha çalışması, otomotiv sektöründe otomobil süspansiyon bileşenleri üreten bir tesiste gerçekleştirilmiş olup, üretim hattındaki CNC makineleri üzerinde kestirimci bakım uygulaması yürütülmüştür. Tesiste duruş verileri ve operasyonel makine kayıtları mevcut bakım yazılımı üzerinden toplanmakta, üretim hattı ise IoT tabanlı bir platformla entegre çalışmaktadır. Ancak bakım faaliyetleri hâlen zaman temelli olup periyodik ve arızi müdahalelerle sınırlıdır.Önerilen yaklaşım, CNC makinelerinin yüksek adetli ve kesintisiz çalışma gereksinimi nedeniyle, arıza olasılıklarının önceden tahminine dayalı bir karar destek sistemi oluşturulmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda bakım maliyeti, işleme doğruluğu ve hata oranı gibi performans göstergeleri arasında optimizasyon yapılması gerekmektedir. Hattaki 62 CNC'nin herhangi birinde oluşacak plansız duruşun üretim kaybı yaratacağı dikkate alındığında, kestirimci bakım altyapısının kurulması tesisin operasyonel sürekliliği açısından kritik bir gerekliliktir.

Kestirimci bakımın etkin uygulanabilmesi için, periyodik bakım döngüsünü en çok bozan kritik bileşenler olan spindle ve vidalı milin makineden bağımsız şekilde izlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle yalnızca makinenin toplam kullanım ömrü değil, bu iki alt bileşenin gerçek zamanlı RUL (Remaining Useful Life) değerlerinin ayrı olarak hesaplanması ve bakım stratejisinin buna göre güncellenmesi esastır. Böyle bir yapı, duruş anlarında bakım kararlarının yalnızca operatör kayıtlarına değil, kestirimci bakım için çalışan yapay zekâ modelinin üretmiş olduğu arıza olasılığı ve RUL tahminlerine dayanmasını sağlayarak müdahale doğruluğunu artırır. Bu yaklaşım, hem MES süreçlerinin hem de bakım ekibinin iş yükünü azaltarak daha kararlı ve sürdürülebilir bir bakım yönetimi oluşturur. Kestirimci bakım altyapısının temelini IIoT oluşturmaktadır. IIoT, sensörlerden ve CNC kontrol ünitelerinden aldığı verileri doğrudan ERP (ör. SAP) ile entegre ederek sürekli veri akışı ve merkezi veri havuzu oluşturur. Yapay zekâ modelleri bu veri havuzunu asenkron olarak güncelleyerek kendini sürekli iyileştirir. Böylece üretim sürekliliği korunur, plansız duruşlar azaltılır ve parça/işçilik maliyetleri düşürülür.

Kestirimci bakım uygulamalarında, kritik bileşenlere yönelik doğru tahminler yapabilmek için kontrol ünitesi ve duruş kayıtları tek başına yeterli veri sağlamamaktadır. Bu nedenle arıza anında etkilenebilecek bölgeler belirlenerek ilgili noktalara ek sensörlerin konumlandırılması gerekmektedir. Bu çalışmada spindle ve vidalı mil gibi spesifik bileşenlere ait titreşim, ivme ve sıcaklık parametrelerini elde edebilmek için makine üreticisinin belirlediği kritik noktalara sensörler yerleştirilmiştir. Böylece sensör verileri, kontrol ünitesi çıktıları ve duruş bilgileriyle birleştirilerek cihaza özgü bir veri havuzu oluşturulmuştur. Kestirimci bakımda doğru ve tutarlı bir veri havuzunun oluşturulması temel olup, tüm modelleme ve algoritmik geliştirmeler bu altyapı üzerine inşa edilmektedir.

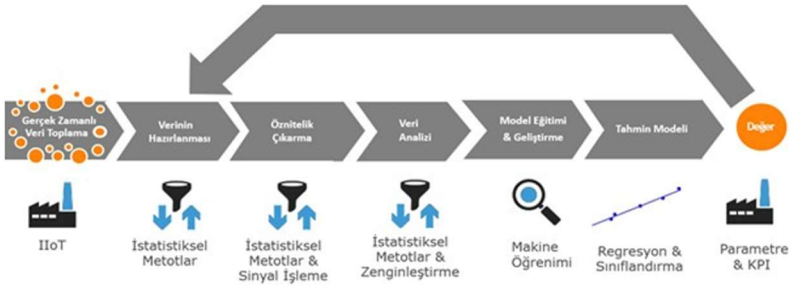


Şekil 2: Sistem Mimarisi ve Bileşenleri

Şekil 2, sistem mimarisinin genel akışını göstermektedir. Öncelikle cihaza ait iç parametreler tanımlanmış, ardından sensörlerden ve kontrol ünitesinden elde edilen tüm sinyaller IO Box üzerinden toplanmıştır. IO Box, sensör katmanı ile yazılım katmanı arasında bir IIoT arayüz modülü olarak görev yapmakta ve verileri belirli aralıklarla bir OPC sunucusu aracılığıyla IIoT platformu olan PTC ThingWorx'e iletmektedir. ThingWorx üzerinde işlenen bu veriler, operasyonel izleme için kullanıldığı gibi, ERP sistemi (SAP) üzerinden gelen üretim ve bakım kayıtlarıyla birleştirilerek veri analitiği platformu IRev Analytics'e aktarılmaktadır.

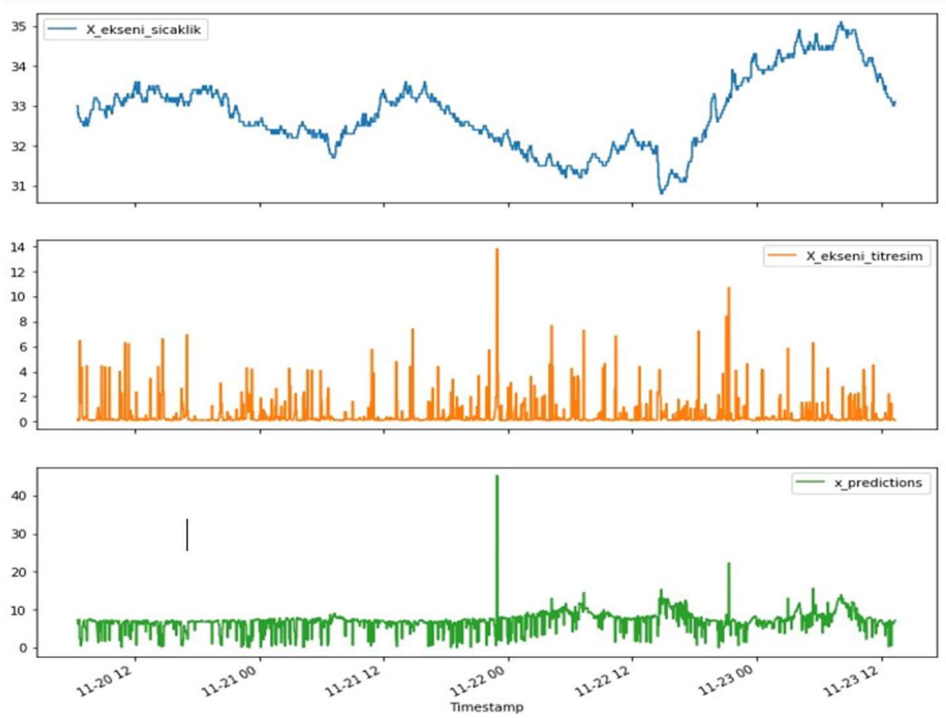
Analiz platformu, gelen verileri sürekli işleyerek kullanıcıya sunulacak KPI değerlerini üretmektedir. Elde edilen yaşam ömrü ve anomali göstergeleri, IIoT platformunda gerçek zamanlı ekranlar üzerinden izlenebilmekte; aynı veriler ERP sistemi (SAP) içindeki üretim ve bakım modüllerinde tablo ve rapor formatında görüntülenebilmektedir. Böylece planlama süreçlerinde ihtiyaç duyulan tüm parametreler sisteme entegre edilmiştir.Bu yapı sayesinde sistemler arasında kapalı döngü oluşturulmuş; bakım ve üretim süreçlerinin insan bağımlılığı azaltılarak dijital olarak yönetilebilir bir altyapı sağlanmıştır. Konumlandırılan yapay zekâ modeli, bu döngü üzerinden sürekli öğrenerek hata oranını azaltmakta, izlenebilirlik ve güvenilirliği artırmaktadır.

Yukarıdaki yapıda, sensör ve kontrol verileri tek bir paket hâlinde analiz platformuna iletilmekte ve burada çeşitli veri madenciliği süreçlerinden geçirilmektedir. Uygulamanın gereksinimleri, veri tipleri ve kullanılan donanım mimarisi bu adımların içeriğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kestirimci bakım sistemlerinin paket bir yazılım olarak sunulabilmesi, ancak dar kapsamlı ve tek bir kullanım senaryosuna yönelik durumlarda mümkündür. Geniş ölçekli uygulamalarda ise gelen verilerin sürekli değerlendirilmesi, modellerin güncellenmesi ve performansın korunabilmesi için veri bilimcilerin sistem üzerinde düzenli iyileştirmeler yapması gerekmektedir.



Şekil 3: Verinin Öngörüye Dönme Aşamaları

Şekil 3, iki kritik bileşenin ve makinenin yaşam döngüsünün tahmin edilmesi için izlenen adımları göstermektedir. Süreç, ham verilerin analiz için uygun hâle getirilmesi amacıyla ölçeklenmesi ve düzenlenmesiyle başlar. Ardından tahmin modelinin oluşturulabilmesi için veri üzerinden öznitelik çıkarımı yapılır. Bu aşama uygulamanın türüne, modele ve hedefe bağlı olarak farklılık gösterebilir. Çalışmada hem istatistiksel yöntemlerden hem de frekans temelli öznitelikleri elde etmek için sinyal işleme tekniklerinden yararlanılmıştır. Böylece verideki anomaliler tespit edilebilir hâle getirilmiş ve ilgili öznitelikler modele dahil edilmiştir.Hazırlanan veri tekrar ölçeklendikten sonra farklı makine öğrenimi algoritmalarıyla birden fazla model oluşturulmuş, test edilmiş ve performans karşılaştırması yapılarak en uygun model seçilmiştir. Seçilen model uygulamaya entegre edilerek üretilen KPI'lar sisteme aktarılmış; bu KPI'lar gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve periyodik olarak hesaplanabilir hâle gelmiştir. Elde edilen parametreler, IIoT aracılığıyla ERP gibi kurumsal sistemlere aktarılmıştır. Son aşamada, sistemin ürettiği sonuçlara ilişkin geri bildirimler yeni verilerle birlikte sürece yeniden dahil edilerek model güncellenmiş ve doğruluğu artan, kapalı döngü bir yapı oluşturulmuştur.



Şekil 4: Verilerden Edilen Örnek Bir Öznitelik

Şekil 4, öznitelik ve parametre çıkarma sürecine ilişkin bir örnek göstermektedir. Bu örnekte kullanılan istatistiksel yöntem, ilgili bölgede oluşan anomalileri yüzde değer olarak hesaplayarak sensörün izlediği bölgedeki sapmaların nicel olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Böylece söz konusu bölgeye yönelik ayrı bir tahmin modeli geliştirilmesine imkân tanınmaktadır. Ayrıca Şekil 4'teki bazı öznitelikler, doğrudan parametre olarak kullanılabilir nitelikte olduğundan IIoT platformu üzerinden kullanıcı arayüzlerine ve diğer sistemlere gerçek zamanlı olarak aktarılabilmektedir.

ŞEKIL 5: Örnek Anomali Ekranı

Şekil 5, önceki bölümde açıklanan anomali parametresine ilişkin ekran örneğini göstermektedir. Bu ekranda titreşim ve sıcaklık değerleri anomali göstergesiyle birlikte aynı arayüz üzerinden izlenmekte; böylece oluşan sapmaların hızlı değerlendirilmesi ve karar verme süreçlerinin desteklenmesi sağlanmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan Verimlilik Tabanlı Kestirimci Bakım projesi, kestirimci bakım mimarisine uygun şekilde tasarlanmış ve farklı hatlara uyarlanabilmesi için ölçeklenebilir bir yapı olarak geliştirilmiştir. Kestirimci bakım projeleri, geleneksel yazılım çözümlerinden farklı olarak, doğru veri havuzunun oluşturulması için zamana, tutarlı

veri toplamaya ve yüksek kaliteli sensör verisine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle uygulamanın başarıya ulaşabilmesi, firmanın dijitalleşme düzeyinin belirli bir olgunluğa erişmiş olmasına bağlıdır. Süreçlerin tamamen dijital yürütülmesi, farklı veri kanallarının güvenilirliğini kritik hale getirmekte; bu kanalların kesintisiz ve doğru veri sağlaması, sistemin doğruluğunu ve işletme genelinde ölçeklenebilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

KESTİRİMCİ BAKIMIN İŞLETMEYE SAĞLADIĞI KAZANÇLAR

Sanayi Devrimi'nin ilk dönemlerinde makineler nispeten basit yapılara sahipti ve bu nedenle arıza olasılıkları düşüktü. Ancak Endüstri Devrimi'nin ikinci ve üçüncü evreleriyle birlikte montaj hatlarının yaygınlaşması ve Programlanabilir Mantık Kontrolörlerinin (PLC) kullanımıyla hızlı otomasyon süreçleri üretim faaliyetlerinin merkezine yerleşti. Makinelerin giderek karmaşıklaşması, daha az insan müdahalesiyle yüksek hacimli ve verimli üretimi mümkün kılmış, ancak rekabet koşullarını da daha zorlu hâle getirmiştir. Bu çerçevede işletmeler, üretim çıktısı, genel ekipman etkinliği ve iş gücü verimliliği gibi performans göstergelerini düzenli olarak izlemek zorunda kalmıştır. Buna paralel olarak, geçmişte yalnızca arıza sonrası uygulanan bir faaliyet olarak görülen bakım, kritik bir yönetim unsuru hâline gelmiş; planlı periyodik bakım stratejileri yaygınlaşmıştır. Düzenli bakım uygulamaları, ekipmanlarda potansiyel sorunların erken tespit edilmesini sağlayarak arıza oranlarının ve üretim duruşlarının azaltılmasına önemli katkı sunmaktadır.

Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) veya Endüstri 4.0 olarak adlandırılan sanayinin dördüncü evresinde, ekipman kullanımının optimizasyonu, işletme maliyetlerinin düşürülmesi ve iş gücü verimliliğinin artırılması temel odak alanları hâline gelmiştir. IIoT, düşük maliyetli sensörlerin üretim süreçlerine entegrasyonu ve bu sensörlerden elde edilen makine verilerinin gelişmiş analitik yöntemlerle işlenmesine dayanmaktadır. Yapılan projeksiyonlar, IIoT uygulamalarının üretkenliği %30'a kadar artırabileceğini göstermektedir. Makine arızalarının gerçekleşmeden önce tahmin edilmesine yönelik bu analitik yaklaşımlar ise kestirimci bakım stratejileri olarak tanımlanmaktadır.

Güncel literatürde, Endüstriyel IoT'nin en yaygın ve yüksek etki oluşturan uygulaması olarak kestirimci bakım ön plana çıkmaktadır. Kestirimci bakım; bakım maliyetlerinin düşürülmesi, ekipman ömrünün uzatılması, arıza sürelerinin azaltılması ve arızalar oluşmadan önce müdahale edilerek üretim kalitesi ile çıktı miktarının artırılmasını mümkün kılmaktadır. Ancak bu faydaların elde edilebilmesi için gelişmiş bir dijital altyapının kurulması, ölçeklenebilir bir IoT platformunun devreye alınması ve makine verilerinin analizinde makine öğrenmesi ile tahmine dayalı modelleme gibi istatistiksel yöntemlerin kullanılması gerekmektedir.

Kestirimci bakım, bakım faaliyetlerinin yalnızca ihtiyaç duyulan anda ve arıza gerçekleşmeden önce uygulanmasını sağlayan bir stratejidir. Makine durumunun analitik yöntemlerle değerlendirilmesi sayesinde potansiyel arızalar erken dönemde tespit edilir ve bakım müdahalesi arızayı beklemeden gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, işletmelere çeşitli maliyet avantajları sunar. Bunlar:

I. Ekipmanın bakım için alıkonduğu süreyi minimize etmek.
II. Ekipmanın bakımı nedeniyle kaybedilen zaman, etkili üretim zamanına çevrilmiş olur.
III. Kestirimci Bakım, acil kullanılmak için gerekli yedek parçaların bekleme zamanını azaltır. Ayrıca bir ekipmanın sadece arızadan hemen önce çözümünü sağladığı için, arızalı ekipmanın bakımı için harcanan toplam zamanı ve maliyeti azaltır.

Kestirimci bakım programlarının yatırım geri dönüşünü yaklaşık on kat artırabildiği rapor edilmektedir. Çeşitli çalışmalarda, bu stratejinin bakım maliyetlerinde %25–30, arıza sayısında %70–75 ve toplam arıza süresinde %35–45 aralığında azalma sağladığı gösterilmiştir. Ancak söz konusu tasarrufların elde edilebilmesi belirli düzeyde ek maliyet gerektirir. Özellikle bazı arıza durum izleme teknikleri yüksek yatırım maliyetine sahiptir ve veri analitiğinin etkin bir şekilde yürütülebilmesi için deneyimli uzmanlar tarafından yönetilmelidir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Endüstri 4.0 kapsamındaki modern sanayi işletmelerinde kullanılan bakım modelleri incelenmiş; özellikle kestirimci bakımın gelişimi ve sunduğu potansiyeller değerlendirilmiştir. Dördüncü Sanayi Devrimi, geleceğin üretim yapılarında kestirimci ve akıllı bakım uygulamalarını destekleyen bir çerçeve sunmaktadır. Endüstri

4.0'ın etkin biçimde uygulandığı tesislerde makineler, kestirimci bakım için gerekli veriyi üreten bütünleşik bir ağ yapısı oluşturmakta ve ortak çalışabilirlik sağlamaktadır. Bu bağlamda kestirimci bakımın temel unsurları olan bulut bilişim, endüstriyel büyük veri ve akıllı fabrika konseptleri hızla yaygınlaşmakta; fabrikaların veri depolama, işleme ve analiz altyapılarına erişimi kolaylaşarak kestirimci bakımın uygulanabilirliği önemli ölçüde artmaktadır.

Kestirimci bakım uygulamaları, geçmiş verilerden yararlanarak ekipmanların gelecekteki durumunu tahmin etmeyi mümkün kılar. Bu nedenle geçmiş verinin doğruluğu, bütünlüğü ve güvenilirliği tahmin modellerinin başarı düzeyini belirleyen en kritik unsurlardır. Etkin bir kestirimci bakım sistemi için ilk adım, doğru amaçların ve uygun veri noktalarının belirlenmesidir. Doğru sensörlerin entegrasyonu, makineden gerçek zamanlı ve yüksek kalitede veri toplanmasını sağlayarak arıza davranışlarının daha sağlıklı izlenmesine katkıda bulunur. Veri hazırlama süreçleri ve veri kalitesi, tüm tahmine dayalı modeller için temel girdilerdir; veri kalitesi arttıkça model performansı ve tahmin doğruluğu da yükselir. Bu durum, kestirimci bakım stratejisinin başarısını güçlendirerek işletmelerin varlıklarını sürdürülebilir ve rekabetçi bir şekilde yönetmesine olanak tanır.

Sonuç olarak kestirimci bakım, statik bir hedef değil; sürekli iyileştirme gerektiren dinamik bir süreç olup işletmenin olgunluk düzeyi arttıkça geliştirilmesi gereken bir yolculuk olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Haller, S., S. Karnouskos, and C. Schroth. *The internet of things in an enterprise context*. in *Future internet symposium*. 2008. Springer.
2. Meyer, S., A. Ruppen, and C. Magerkurth. *Internet of things-aware process modeling: integrating IoT devices as business process resources*. in *International conference on advanced information systems engineering*. 2013. Springer.
3. Wang, C., H.T. Vo, and P. Ni. *An IoT application for fault diagnosis and prediction*. in *2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*. 2015. IEEE.
4. Chaves, L.W. and Z. Nochta, *Breakthrough towards the internet of things*, in *Unique Radio Innovation for the 21st Century: Building Scalable and Global RFID Networks*. 2010, Springer. p. 25-38.
5. Bughin, J., M. Chui, and J. Manyika, *Clouds, big data, and smart assets: Ten tech-enabled business trends to watch.* McKinsey quarterly, 2010. **56**(1): p. 75-86.
6. Liu, L., X. Liu, and X. Li. *Cloud-based service composition architecture for internet of things*. in *Internet of Things: International Workshop, IOT 2012, Changsha, China, August 17-19, 2012. Proceedings*. 2012. Springer.
7. O'donovan, P., et al., *Big data in manufacturing: a systematic mapping study.* Journal of Big Data, 2015. **2**(1): p. 20.
8. Hermann, M., T. Pentek, and B. Otto. *Design principles for industrie 4.0 scenarios*. in *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. 2016. IEEE.
9. İnce, M., N. Bekiroğlu, and E. Ayçiçek, *Kestirimci Bakım Teknolojilerinin Araştırılması ve Endüstriyel Bir Motorun Amt Sistemi ile Arıza Analizlerinin Çıkarılması.* Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makinaları Anabilim Dalı, 2017.
10. Crespo Márquez, A., et al., *The maintenance management framework: A practical view to maintenance management.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2009. **15**(2): p. 167-178.
11. Li, Z., K. Wang, and Y. He. *Industry 4.0-potentials for predictive maintenance*. in *6th international workshop of advanced manufacturing and automation*. 2016. Atlantis Press.
12. Wang, K.-S., et al., *Interpretation and compensation of backlash error data in machine centers for intelligent predictive maintenance using ANNs.* Advances in Manufacturing, 2015. **3**(2): p. 97-104.
13. Garcia, M.C., M.A. Sanz-Bobi, and J. Del Pico, *SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox.* Computers in industry, 2006. **57**(6): p. 552-568.
14. Liu, J., et al., *Similarity based method for manufacturing process performance prediction and diagnosis.* Computers in industry, 2007. **58**(6): p. 558-566.
15. Lee, J., H.-A. Kao, and S. Yang, *Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment.* Procedia cirp, 2014. **16**: p. 3-8.
16. Ötleş, S., U. Çolak, and O. Ötleş, *Endüstri için Yapay Zekâ-1–.* Plastik Ambalaj Dergisi, syf, 2018: p. 46-50.

17. Wang, K., *Intelligent predictive maintenance (IPdM) system–Industry 4.0 scenario.* WIT transactions on engineering sciences, 2016. **113**(1): p. 259-268.
18. Aljumaili, M., et al., *eMaintenance ontologies for data quality support.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2015. **21**(3): p. 358-374.
19. Baheti, R. and H. Gill, *Cyber-physical systems.* The impact of control technology, 2011. **12**(1): p. 161-166.

Isı Değiştiricilerde Termodinamik Analiz

Furkan DOĞAN

[1*] *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği, Selçuklu,Konya*

[*] *(248271001006@ogr.selcuk.edu.tr)*

Özet – Bu çalışmada çift borulu ısı değiştirici, gövde borulu ısı değiştirici ve plakalı ısı değiştirici için termodinamik analiz yapılmıştır. Bu 3 tip ısı değiştiricinin performansları deneysel olarak test edilmiştir. Isı değiştirici test bölgesinin soğuk su debisi 1.5 L/dk değerinde sabit tutulurken sıcak su debisi 0.8 L/dk, 1.6 L/dk ve 2.4 L/dk değerlerinde değiştirilmiştir. Sıcak su beslemesi 50°C, 60°C ve 70°C olarak seçilmiştir. Deneyler hem karşıt akışlı hem de paralel akışlı olarak yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde sıcaklığın ve debinin artışı ile ısı değiştiriciden alınan gücün arttığı tespit edilmiştir. Birim alandan elde edilen ısı transferi miktarı değerinin en yüksek olduğu ısı değiştirici tipi gövde borulu ısı değiştirici iken en düşük performansı çift borulu ısı değiştirici tipi göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift borulu ısı değiştirici, gövde borulu ısı değiştirici, plakalı ısı değiştirici, termodinamik analiz

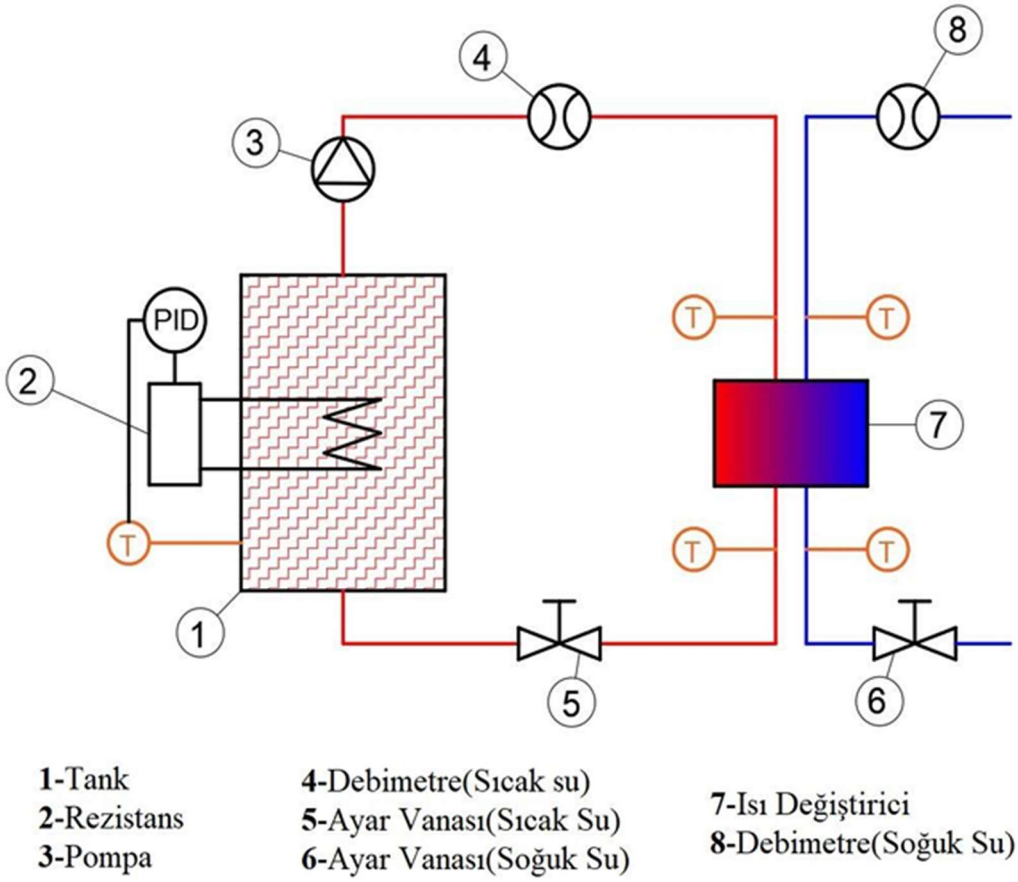
GIRIŞ

Maliyet, verimlilik ve çevresel faktörler, enerji gereksinimlerini karşılamak için tüm termal uygulamalarda önemlidir. Isı değiştiriciler ısıl uygulama sistemlerinin en önemli elemanlarından biridir[1]. Farklı sıcaklıklarda ki iki veya daha fazla akışkan arasında ısı değişimlerine birçok mühendislik uygulamalarında rastlarız[2]. Bu değişimi sağlayan cihazlara ısı değiştirici denir[3]. Isı değiştiriciler; ısıtma, havalandırma, soğutma ve ısı geri kazanımı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. En yaygın kullanıma sahip olanlar ise kanatlı-borulu ısı değiştiricilerdir[4]. Örnek olarak soğutma tesislerinde ki yoğuşturucular ve buharlaştırıcılar, su ile soğutmalı motorlarda ki radyatörler, termik santrallerde ve kimya tesislerinde kullanılan yoğuşturucular verilebilir. Isı değiştiricilerinde enerji tasarrufu, enerjinin verimli ve etkin kullanılması, ısı transferinin artırılması ile mümkündür. Enerji ihtiyacının günden güne arttığı ve enerji kaynaklarının azaldığı düşünüldüğünde ısı değiştiricilerinde ısı transferinin artırılmasının ne kadar önemli olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Bu kapsamda ısı değiştiricilerinde ısı transferinin artırılmasına yönelik çok sayıda çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir[5]. Isı değiştiricilerinde ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmaların amaçlarından bazıları, ağırlıklarının ve boyutlarının azaltılması, ısı transferi miktarının artırılması, toplam verimliliği iyileştirmek için akışkanlar arasındaki ortalama sıcaklık farkının azaltılması vb. olarak özetlenebilir. Genişletilmiş yüzeyler, yüzeyde yapılan bazı değişiklikler, akış alanında oluşturulan türbülans, ısı transferini artırmak için kullanılan yöntemlerden bazılarıdır[6]. Isı değiştirici tipinin belirlenmesi ısı değişim problemlerinde alınan en önemli karardır. Isı değiştirici tipinin seçiminde kullanılacak temel ilke, benzer proses koşullarında çalışan ısı değiştiricisine benzer olanın tipinin seçilmesidir, bu nedenle mühendisin deneyimi çok önemlidir[7]. Isı değiştirici tipini belirlerken benzer proses şartlarında çalışan ısı değiştiricisi bulunamıyorsa, performans parametreleri (sıcaklık programı, debiler, basınç düşümleri), ısı değiştiricinin boyutu, basınç ve sıcaklık, konstrüksiyon malzemeleri, akışkanların tipleri ve fazları, kirlenme eğilimleri, temizleme, muayene, tamir, bulunabilirlik ve ekonomik vb. faktörler dikkate alınmalıdır[8]. Borulardan yapılan ısı değiştiriciler borusal ısı değiştiricilerdir. Bu ısı değiştiricilerde akışkanlardan biri borunun içinden, diğer akışkan borunun dışından akmaktadır. Borusal ısı değiştiricilerinin boru çapı, boru uzunluğu, boru sayısı, boru düzenlemesi ve boru adımı değiştirilerek farklı dizaynları yapılabilir. Borusal ısı değiştiricileri tipleri gövde borulu, çift borulu ve spiral borulu ısı değiştiriciler olmak üzere 3 çeşittir. Bunların arasından gövde borulu ısı değiştiricisinin işletme basıncının ve sıcaklık aralığının geniş olması nedeniyle diğerlerine kıyasla oldukça fazla uygulama alanı vardır[3]. Bu ısı değiştiriciler farklı boyutlarda borular içeren kanallardan oluşur ve farklı ebatlarda ve akış konfigürasyonlarında kolay üretilebilir olması ile tanınırlar[9]. Transfer edilen ısı oranı, besleme sıcaklığı ve basıncı, gövde çapı, boru sayısı, boru geometrisi, bölme boşluğu ve kesme boşluğu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır Gövde borulu ısı değiştiriciler kompakt parçalardan oluşmaktadır[10]. Birim ısı transfer yüzeyi başına ısı transfer hacmi 50 $m2/m3$'den 100 $m2/m3$'e kadar değişebilmektedir. Bunun sonucu olarak diğer ısı değiştiricilerle karşılaştırıldığında maliyetlidirler. Fiyatları karşılaştırıldığında ise gövde borulu ısı değiştiriciler ısı transferinde daha

etkili ve verimlidirler.[11] tarafından yapılan çalışmada gövde borulu ısı değiştiricisinin tasarımını incelenmiş ve ayrıntılı olarak farklı demet çapları kullanılarak gövde çapının toplam ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi test edilmiştir. [12]iki boru arası mesafe aralığının ve şaşırtma levhası tipinin ısı değiştiricilerde ısı transferini artırmada hayati bir rol oynayabileceği sonucuna varmışlardır. Benzer bir çalışmada şaşırtma levhasının malzemesinin ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini farklı malzemeler kullanarak test etmişler ve en iyi seçenek olarak paslanmaz çeliği önermişlerdir[13].Şaşırtma levhasının uzaklık, genişlik, profil ve yerleşim düzeninin ısı değiştiricilerin genel ısı aktarımı üzerindeki etkilerini test etmişlerdir.[14] ısı transferini iyileştirmek için düz bir gövde ve boru yerine bir kıvrımlı gövde ve boru kullanarak deneysel olarak araştırmalar yapmışlardır[15] geometrik parametrelerinin ısı transferi ve entropi üretimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.[16] deneysel olarak helis açıları kullanmanın gövde borulu ısı değiştirici performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. [2]çalışmasında gövde borulu ısı değiştiricilerinde şaşırtma levhası kesmesinin ve aralığının ısı taşınım katsayısı ve basınç düşümüne etkisinin araştırmışlardır. Şaşırtma levhası kesilmesiyle ve aralığının artmasıyla ısı taşınım katsayısının ve basınç düşüşünün azaldığı belirtmişlerdir. Isı değiştiricilerindeki her parça, aktarılan toplam ısı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir, bu nedenle tüm parametrelerin dikkatlice seçilmesi önemlidir[17]. Çift borulu ısı değiştiricileri ısı değiştirici tiplerinin arasında en basit olanlardır. Büyük çaplı bir borunun içerisine daha küçük çaplı bir borunun eş merkezli olarak yerleştirilmesi ile oluşturulur. İçteki borudan akışkanlardan birisi akarken dıştaki borudan da diğeri akar. İstenilen basınç düşüşü ve sıcaklık farkını sağlamak için seri veya paralel bağlı olarak düzenlenebilirler. İçteki boru tek veya çok borulu bir şekilde yapılabilir. Eksenel kanatçıklara sahip iç boru (veya borular), halkadaki ısı taşınım katsayısı düşük olduğu durumlarda kullanılabilir[7]. Çift borulu ısı değiştiricileri düşük tasarım ve bakım maliyetleri, esneklikleri ve düşük kurulum maliyetleri nedeniyle birçok endüstride kullanılmaktadır[18]. Yapılandırma, bakım ve temizlik kolaylığı nedeniyle, yüksek basınçlı akışkanlar ve yüksek kirlenme koşulları için de uygundur[19]. Bu tip ısı değiştiricilerinin uygulama alanları; ısı geri kazanım işlemleri, iklimlendirme ve soğutma sistemleri, kimyasal reaktörler ve yiyecek prosesleridir[20]. Bununla birlikte, en büyük dezavantajları büyük hacimli tasarımları ve birim transfer yüzeyi başına maliyetidir[21]. [22]çift borulu ısı değiştiricileri üzerinde, iç boruya dalgalı şerit türbülatörlerini yerleştirerek deneysel çalışma yapmışlardır. Onların bulguları, ısı transfer özelliklerinin geliştirilmesinde önemli gelişmelerdir. [23]Düşük sıcaklık uygulamaları için zıt akışlı ısı değiştiricisinin performansının değerlendirmesi üzerinde çalıştılar, zıt akışlı ısı değiştiricilerin, yüksek etkinliklerinden dolayı kriyojenik sistemlerde yaygın olarak kullanıldığını bulmuşlardır. Bu ısı değiştiricilerinin ısıl performansını, duvar boyunca uzunlamasına iletkenlik, çevredeki sızıntılardan ısı kaybı, akışta bozulma gibi çeşitli kayıplar tarafından belirlendiği ifade edilmiştir. 300-80 K ve 80-20 K sıcaklık aralığında ısı kaybı ve eksenel iletkenlik parametrelerinde ısı değiştirici performansının düşmesi üzerindeki nicel etkisini anlamak için çalışmalarını genişlettiler. Akış kanalları ince plakalardan oluşan ısı değiştirici; plakalı ısı değiştiricilerdir. Plakalı ısı değiştiriciler; gaz, sıvı veya iki-fazlı akışların herhangi bir kombinasyonu için ısı transfer etmek amacıyla kullanılırlar. Bu ısı değiştiricilerinin contalı-plakalı, spiral plakalı ve lamelli olmak üzere 3 değişik tipi vardır[7]. Plakalı ısı değiştiricileri; ısıtma, soğutma, ısı geri kazanımı, yoğuşma ve buharlaşma gibi çeşitli uygulamalarda yaygın şekilde kullanılır. Plakalı ısı değiştiricilerinin karmaşık geometri profili, yüksek ısı transferiyle sonuçlanan yüksek derecede türbülans sağlar[24]. Plakalı ısı değiştiriciler kompaktlık, etkinlik, tasarım esnekliği ve düşük maliyet gerektiren çok sayıda endüstriyel uygulama için yaygın olarak kullanılır[25]. Plakalı ısı değiştiriciler genellikle karşılıklı temas halinde olan metal plakalardan oluşur. Her plaka, giriş ve çıkış delikleri olarak işlev gören dört açıklığa ve akışkanları alternatif akış geçişlerinde yönlendirmek için tasarlanmış contalara sahiptir. Bitişik plakalar akış kanallarını oluşturur, böylece iki akış alternatif kanallardan geçerken ısı alışverişi yapar[26]. Basıncın yüksek olduğu uygulamalarda düşük basınçlarda kullanılabilen ısı değiştiricisi tipleri hemen seçimin dışına atılabilir. Belirli sıcaklık aralığında çalışan ısı değiştiricileri de bunların seçilmemesinin nedeni olabilir. Çalışma sıcaklığının 200 °C' nin altında, daima plakalı tip özellikle de contalı plakalı tip ısı değiştiricisinin seçilmesine daha uygundur. Daha yüksek basınç ve sıcaklıklarda çift borulu ısı değiştirici, gövde borulu ısı değiştirici veya kaynaklı plakalı ısı değiştiricilerinden biri seçilmelidir. Özellikle çift-borulu ısı değiştirici küçük kapasiteli ve yüksek basınçlı uygulamalar için daha uygundur[27]. Araştırmacılar farklı tipteki ısı değiştiricilerini değişik amaç ve metodoloji ile optimize etmek için çaba sarf etmişlerdir. Örneğin, farklı optimizasyon algoritmalarıyla gövde borulu ısı değiştirici ,plaka-kanatlı ısı değiştirici ve rejeneratif ısı değiştiricinin optimizasyonunu gerçekleştirildi[28]. Yapılan bu çalışmada farklı ısı değiştirici tiplerinin performanslarının kıyaslanması, debi ve sıcaklığın değişimi ile ısı değiştirici performansının nasıl değiştiği araştırılmıştır.

MATERIALS AND METHOD

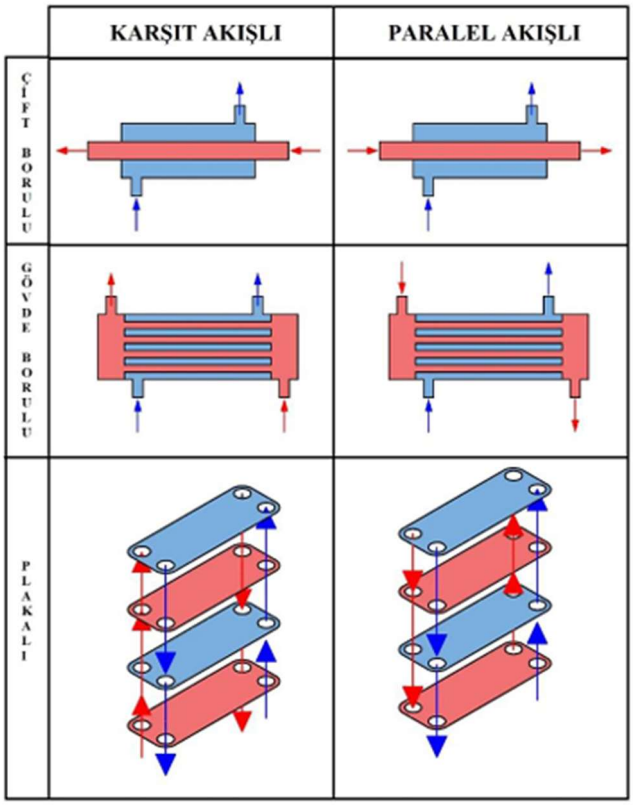
Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği şematik gösterimi

Düzenek temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar sıcak su ısıtma için kullanılan tank kısmı ve ısı değiştirici tiplerinin bağlandığı test kısımlarıdır. Tankta bulunan su rezistans vasıtasıyla ısıtılır.

Tankın orta kısmında bağlı olan pt100 sıcaklık sensörü ve buna bağlı PID sıcaklık kontrol ünitesi ile su istenilen sıcaklığa ayarlanır. Tankın çıkış kısmında debi değeri ayarlanabilen bir sirkülasyon pompası bulunmaktadır, bu pompadan çıkan iş akışkanı kanatçık tipi bir debimetreden ve ısı değiştiriciden de geçerek tanka geri döner ve çevrim tamamlanır. Deney setinin ısı değiştirici kısmı modülerdir, istenilen tip ısı değiştirici tipi kolay bağlantı elemanları ile sökülüp takılabilmektedir. Test bölgesinde ısı değiştiricilerin giriş ve çıkışlarına bağlanmak üzere 4 adet bağlantı hortumu bulunmaktadır, bunlardan ikisi sıcak hattın gidiş ve dönüşü, diğer ikisi ise soğuk hattın gidiş ve dönüşleridir. Hem sıcak hat hem de soğuk hattın giriş ve çıkışlarında sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı ve K tipi termokupl bağlı olan sıcaklık ölçüm noktaları vardır. Deneysel sistemden alınan veriler bir otomasyon ekranı üzerinden izlenebilmekte ve veriler otomasyon ekranı üzerinden okunabilmektedir. Test bölgesine bağlanarak performans testleri alınan ısı değiştirici tipleri ve bu ısı değiştiricilerin akış yönleri Şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan ısı değiştirici tipleri ve akış yönleri

VERILERIN İŞLENMESI

Deney düzeneğinde, test bölgesine sıcak akışkan ile aktarılan ısının tamamının taşınım mekanizması ile soğuk akışkana transfer edildiği kabul edilmiştir. Bu sebeple ısıl kayıplar ihmal edilmiş ve soğuk akışkan tarafından alınan ısı, eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 2 ile eşitlik 1 in oranı sistemden olan ısıl kayıpların ihmal edilebilir seviyede olup olmadığını kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Test bölgesine bağlanan 3 farklı tip ısı değiştirici için ısı transfer yüzey alanları farklıdır. Eşitlik 3 ise her bir ısı değiştiriciden elde edilen güç değerlerinin o ısı değiştiricinin ısı transfer yüzey alanına bölünmesiyle elde edilen güç yoğunluğu değerlerini temsil etmektedir. Deneylerde kullanılan ısı değiştirici tipleri ve o ısı değiştirici tipinin ısı transfer yüzey alanı Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan ısı değiştirici tipleri ve ısı transfer yüzey alanları

Isı Değiştirici Tipi	Isı Transfer Yüzey Alanı (m^2)
Çift Borulu Isı Değiştirici	0,025
Plakalı Isı Değiştirici	0,048
Gövde Borulu Isı Değiştirici	0,02

$$Q_{alınan}=\dot{m}C_p(T_{g,soğuk}-T_{ç,soğuk}) \quad (1)$$

$$Q_{verilen}=\dot{m}C_p(T_{g,sıcak}-T_{ç,sıcak}) \quad (2)$$

$$Q''=Q/A \quad (3)$$

Belirsizlik Analizi

Deneysel parametrelerin belirsizliğini belirlemek için önerilen tema uygulanmıştır[6]. Bu yönteme göre, R sistemde ölçülecek sonuç işlevidir ve x1,x2,x3..xn'nin R değerini etkileyen bağımsız değişkenlerdir. Bu durumda;

$R = R(x1, x2, x3 \dots, xn)$

olarak ifade edilebilir.
w1,w2…wn bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri olsun. R sistemin toplam belirsizliğini vermek üzere, aşağıdaki gibi verilebilir[6].

$$W = [(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1)^2 + (\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2)^2 + \cdots (\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n)^2]^{1/2}$$

Bu çalışmadaki en önemli parametrelerin (sıcaklık ve debi) belirsizlikleri aşağıda yer alan Çizelge 2'de verilen parametreler esas alınarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak sıcaklık ölçüm belirsizliği

±%1.224°C, debi ölçüm belirsizliği ±%0.0141°C olarak hesaplanmıştır.

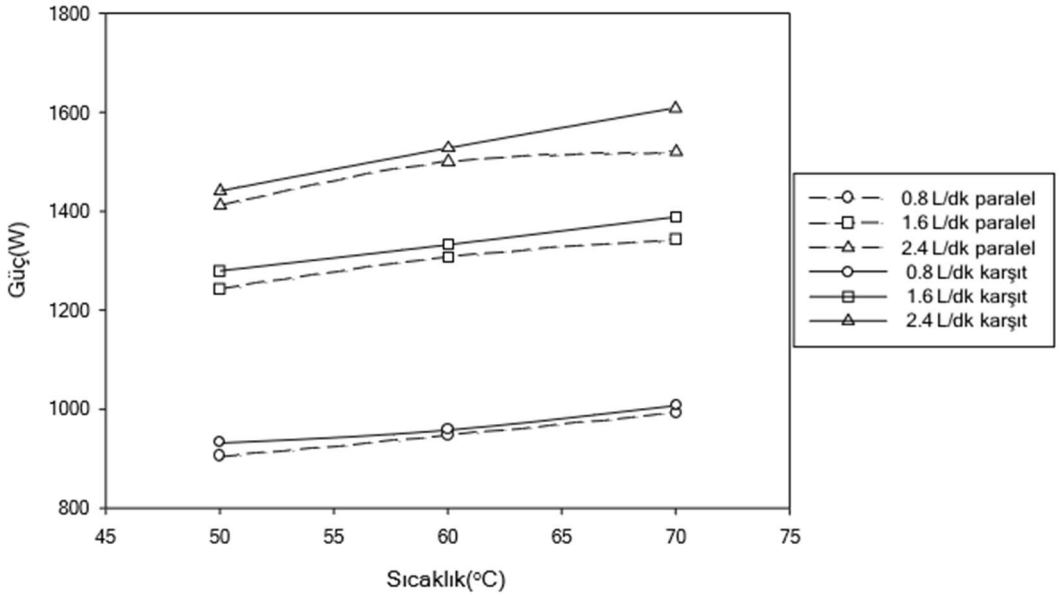
Çizelge 2. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri, hassasiyetleri ve toplam belirsizlikleri

Cihaz	Teknik Özellik	Hassasiyet	Toplam Belirsizlik
Data logger	K tipi; Ölçüm aralığı (-200°C-1200°C)	±%0.5°C	±%1.224°C
Debimetre	Ölçüm aralığı (0-30 L/dk)	±0.01 L/dk	±%0.0141°C

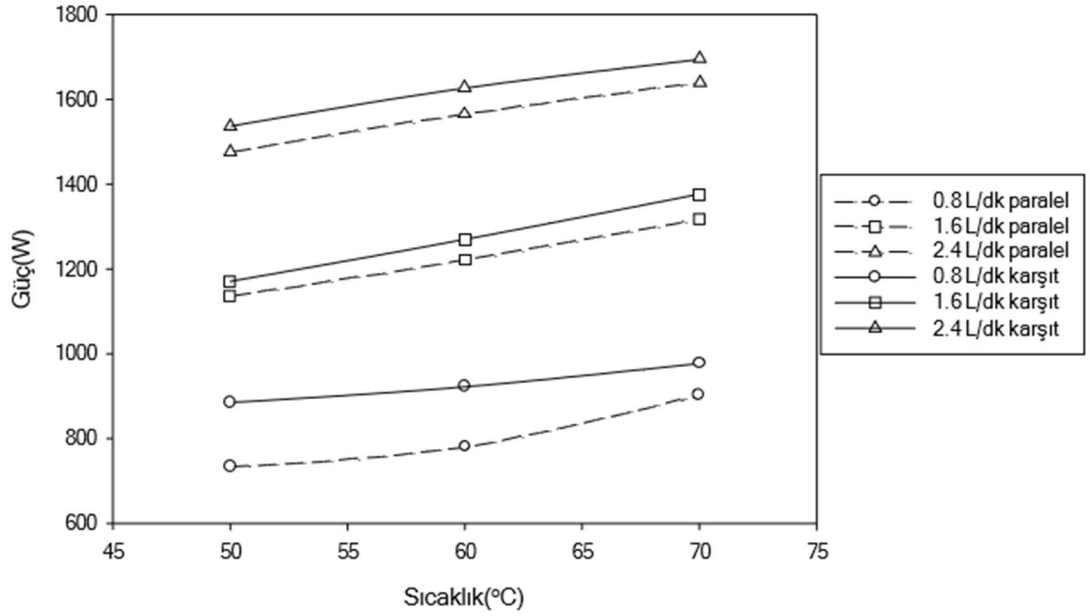
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular ve Tartışma başlığı altında deneyler esnasında kullanılan 3 farklı tip ısı değiştiricinin farklı sıcaklık, debi değerlerindeki güç çıktıları ve farklı tip ısı değiştiricilerin güç yoğunluğu kıyaslamaları sunulmuştur.

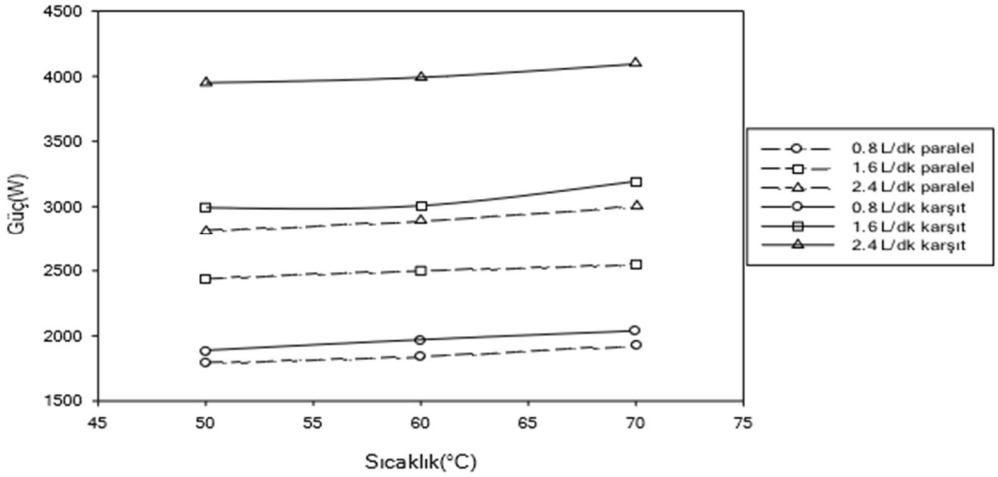
Hem sıcaklık hem debi farklı tip ısı değiştiriciler için değişik etkiler oluşturmuşlardır. Deneysel olarak değerlendirilen 3 tip ısı değiştirici için aynı çalışma şartlarında karşıt akış durumu paralel akış durumuna göre daha iyi performans sağlamaktadır. Çift borulu ısı değiştirici tipinde karşıt akışlı durum için sıcaklığın 50, 60 ve 70 °C değerlerinde ve 2.4 L/dk debi değeri için güç değerleri sırasıyla 1440.7 W, 1527.6 W ve 1609.1 W olmuştur. Gövde borulu ısı değiştirici tipinde karşıt akışlı durum için sıcaklığın 50, 60 ve 70 °C değerlerinde ve 2.4 L/dk debi değeri için güç değerleri sırasıyla 1538 W, 1628.4 W ve 1696.3 W olmuştur. Plakalı ısı değiştirici tipinde karşıt akışlı durum için sıcaklığın 50, 60 ve 70 °C değerlerinde ve 2.4 L/dk debi değeri için güç değerleri sırasıyla 3955.2 W, 3996.4 W ve 4098.9 W olmuştur. Bu değerler deneyde kullanılan 3 tip ısı değiştirici için karşıt akışlı ve 2.4 L/dk değerlerine karşılık gelen güç değerleridir, diğer debilere karşılık gelen güç değerleri Şekil3, Şekil 4 ve Şekil 5 te grafik halinde sunulmuştur. En yüksek güç değeri plakalı ısı değiştiricide elde edilmesine rağmen, güç yoğunluğu (birim alandan elde edilen güç) en yüksek olan ısı değiştirici tipi plakalı ısı değiştirici değildir. Güç yoğunluklarına ilişkin veriler Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 de verilmiştir.



Şekil 3. Çift borulu ısı değiştirici için sıcaklık-güç grafiği



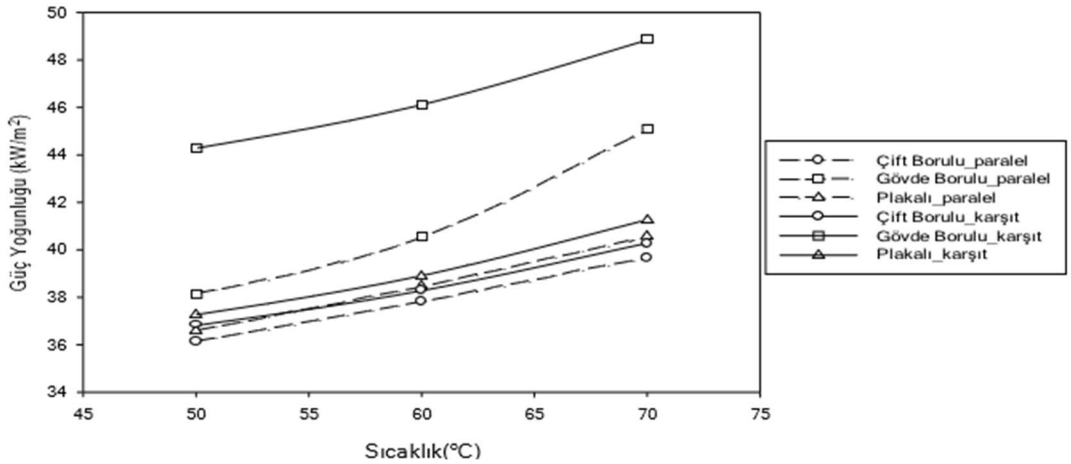
Şekil 4. Gövde borulu ısı değiştirici için sıcaklık-güç grafiği



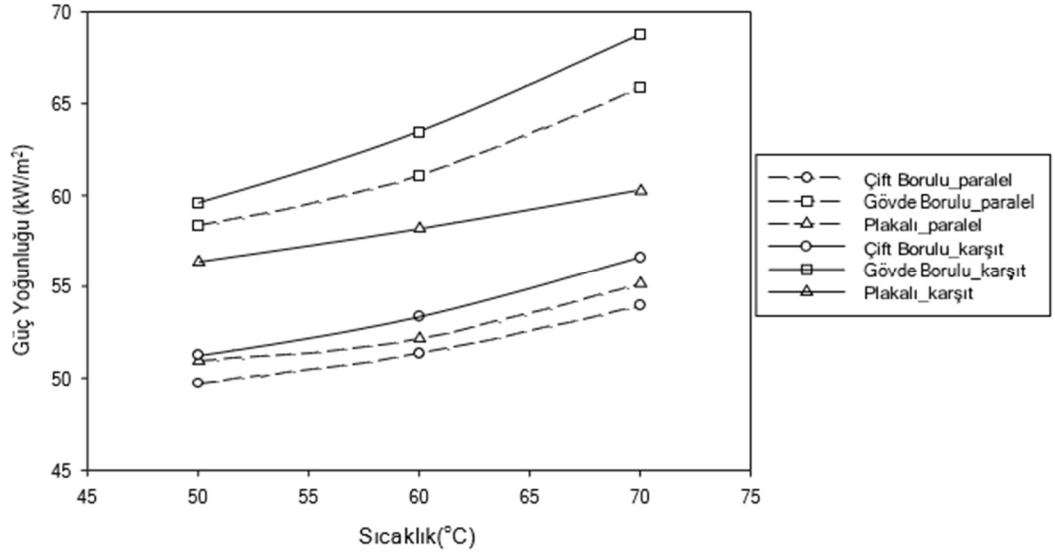
Şekil 5. Plakalı ısı değiştirici için sıcaklık-güç grafiği

Değerlerden de anlaşılacağı üzere sıcaklık ve debinin değişimleri her tip ısı değiştirici de farklı bir tepki ile sonuçlanmıştır. Bu değişimin ısı değiştirici tipi ve tasarım ile yakından ilişkisi olduğu düşünülmektedir. Elde edilen veriler ışığında optimum işletme parametrelerinin ve doğru ısı değiştirici tipinin seçilmesi termal performansı önemli derecede etkilemektedir.

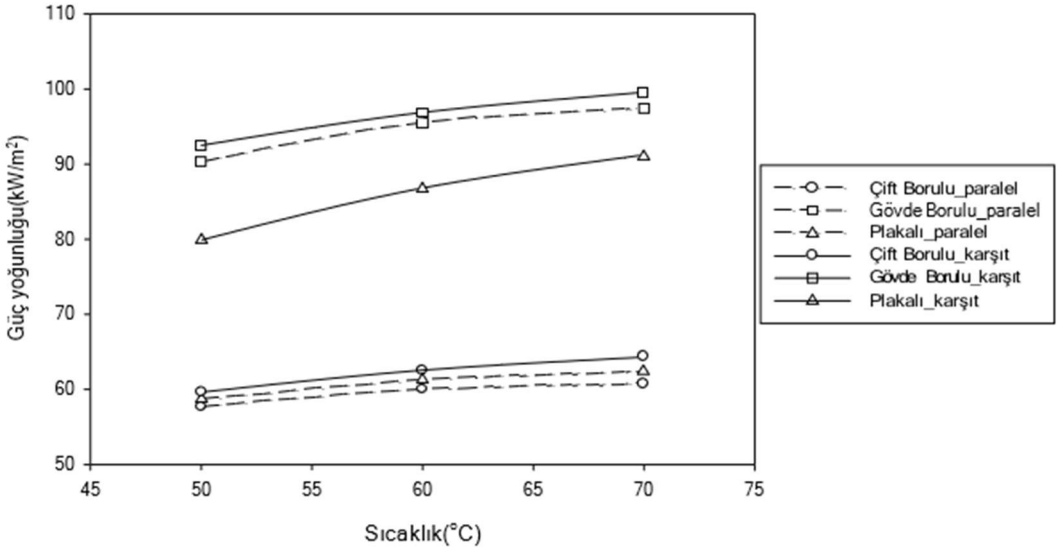
Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde en yüksek güç yoğunluğunu gövde borulu ısı değiştiricide sağlandığı, en düşük güç yoğunluğunun ise çift borulu ısı değiştirici de sağlandığı görülmektedir. Her ısı değiştirici tipi için karşıt akış durumunda daha iyi bir performans sağlanmıştır. En iyi performansı sergileyen gövde borulu ısı değiştirici için; sıcak su besleme debisi 0.8 L/dk iken sıcaklığın 50, 60 ve 70 °C değerlerinde güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 44.28 kW/m^2, 46.13 kW/m^2 ve 48.88 kW/m^2, sıcak su besleme debisi 1.6 L/dk iken sıcaklığın 50, 60 ve 70 °C değerlerinde güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 59.60 kW/m^2, 63.51 kW/m^2 ve 68.82 kW/m^2, sıcak su besleme debisi 2.4 L/dk iken sıcaklığın 50, 60 ve 70 °C değerlerinde güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 92.61 kW/m^2, 96.94 kW/m^2 ve 99.60 kW/m^2 olmuştur. Bu veriler ışığında birim alandan(m^2) elde edilen en yüksek güç gövde borulu ısı değiştirici kullanılarak ve karşıt akış durumunda 2.4 L/dk debi değerinde 99.60 kW olduğu, en düşük gücün ise çift borulu ısı değiştirici ile paralel akış durumunda 0.8 L/dk debi değerinde 36.15 kW değerinde olduğu görülmüştür. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de deneylerde kullanılan ısı değiştirici tipleri için farklı debi değerlerinde güç yoğunlukları verilmiştir.



Şekil 6. Farklı ısı değiştirici tiplerinin güç yoğunluğu kıyaslaması (0.8 L/dk için)



Şekil 7. Farklı ısı değiştirici tiplerinin güç yoğunluğu kıyaslaması (1.6 L/dk için)



Şekil 8. Farklı ısı değiştirici tiplerinin güç yoğunluğu kıyaslaması (2.4 L/dk için)

SONUÇ

Endüstride sıkça karşılaşılan uygulamalardan birisi olan ısı değiştiricilerin etkin kullanımı ısı transferi problemlerinde önemli bir konudur. Bu çalışmada da uygulamada sıkça kullanılan ısı değiştirici tiplerinin performanslarının kıyaslanması konularında çalışma yapılmıştır. Bu sayede ileride ısı değiştirici konularında çalışmalar yapmayı düşünen araştırmacılara ısı değiştiricilerin performansları hakkında deneysel verilerden elde edilen bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmanın deneysel parametreleri; 3 farklı tip ısı değiştirici (çift borulu, gövde borulu ve plakalı), 3 farklı besleme suyu sıcaklığı (50°C, 60°C, 70°C) ve 3 farklı besleme debisi(0.8 L/dk,1.6 L/dk, 2.4 L/dk) olarak belirlenmiş ve deneyler tamamlanmıştır. Deneylerden elde edilen verilerden şu sonuçlara varılmıştır:

- Besleme suyu sıcaklığının artışı ile ısı transfer hızı artmıştır.
- Besleme suyu debisi artışı ile ısı transfer hızı artmıştır.
- Deneylerde kullanılan gövde borulu, plakalı ve çift borulu ısı değiştiricilerin her biri için karşıt akışlı akış yönü

durumunda paralel akışlı duruma göre daha yüksek performans sergilemiştir.

- Gövde borulu ısı değiştiricinin sıcaklığa olan duyarlılığı diğer 2 tip ısı değiştiriciden daha fazla olmuştur. Yani besleme suyu sıcaklığının artışı gövde borulu ısı değiştiricide diğer ısı değiştirici tiplerinden daha etkin performans artışı olmuştur.
- Gövde borulu ısı değiştirici de karşıt akışlı durum paralel akışlı duruma ortalama olarak %3.87 kadar daha iyi güç yoğunluğu sağlamıştır.
- Çift borulu ısı değiştirici de karşıt akışlı durum paralel akışlı duruma ortalama olarak %3.89 kadar daha iyi güç yoğunluğu sağlamıştır.
- Plakalı ısı değiştirici de karşıt akışlı durum paralel akışlı duruma ortalama olarak %11.53 kadar daha iyi güç yoğunluğu sağlamıştır.
- Akış yönünün etkisi en fazla plakalı ısı değiştiricinin güç yoğunluğunu etkilemiştir. Çift borulu ve gövde borulu tip ısı değiştiricilerin güç yoğunluğunu ise yaklaşık olarak aynı düzeyde etkilemiştir. Buradan akış yönünün farklı tip ısı değiştiricilerde farklı etkilere sebep olduğu sonucuna varılmıştır.
- Karşıt akışlı durumda gövde borulu ısı değiştirici çift borulu tip ısı değiştiriciye göre ortalama olarak % 19.06 daha iyi güç yoğunluğu değeri sağlarken, plakalı tip ısı değiştirici çift borulu tip ısı değiştiriciye göre ortalama olarak % 9.09 daha iyi güç yoğunluğu değeri sağlamıştır.
- Paralel akışlı durumda gövde borulu ısı değiştirici çift borulu tip ısı değiştiriciye göre ortalama olarak % 18.08 daha iyi güç yoğunluğu değeri sağlarken, plakalı tip ısı değiştirici çift borulu tip ısı değiştiriciye göre ortalama olarak % 1.61 daha iyi güç yoğunluğu değeri sağlamıştır.
- Kıyaslanan ısı değiştirici tiplerinden birim alan için en yüksek performanslı olandan en düşük performanslı olana doğru sırasıyla; gövde borulu ısı değiştirici, plakalı ısı değiştirici ve çift borulu ısı değiştirici olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Dal, A.R., *DÜZ PLAKALI BORULU BİR ISI DEĞİŞTİRİCİSİNİN OPTİMUM KANATÇIK ARALIĞININ SAYISAL ANALİZİ.* Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019. **8**(1): p. 479-501.
2. Kızılkan, Ö., *Gövde Borulu Bir Isı Degistiricisinde Sasırtma Levhasının Isı Tasınım Katsayısına ve Basınç Düşümüne Etkisinin İncelenmesi.* Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2007. **11**(3): p. 246-251.
3. Genceli, O., *Isı Değiştiricileri. Birsen Yayınevi, İstanbul, Turkey*. 1999, Turkish.
4. Kırtepe, E. and N. Özbalta, *Kanatlı-borulu ısı değiştiricilerde belirsizlik analizi.* Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 2018. **9**(1): p. 161-175.
5. Boran, K., et al., *Isı Eşanjörlerinde Isı Transferi İyileştirme Yöntemlerinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi.* Politeknik Dergisi, 2014. **17**(4): p. 183-191.
6. Kline, S.J., *Describing uncertainties in single-sample experiments.* Mech. Eng., 1963. **75**: p. 3-8.
7. YILMAZ, M. and O.N. ŞARA, *Isı değiştirici seçimi.* Mühendis ve Makina, 2000. **41**(490): p. 24-37.
8. Walker, G., *Industrial heat exchangers: a basic guide.* (No Title), 1982.
9. Mirzaei, M., H. Hajabdollahi, and H. Fadakar, *Multi-objective optimization of shell-and-tube heat exchanger by constructal theory.* Applied Thermal Engineering, 2017. **125**: p. 9-19.
10. Liu, L., et al., *Failure analysis of tube-to-tubesheet welded joints in a shell-tube heat exchanger.* Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2016. **7**: p. 32-40.
11. Shah, R.K. and D.P. Sekulic, *Fundamentals of heat exchanger design*. 2003: John Wiley & Sons.
12. Shinde, S. and U. Chavan, *Numerical and experimental analysis on shell side thermo-hydraulic performance of shell and tube heat exchanger with continuous helical FRP baffles.* Thermal Science and Engineering Progress, 2018. **5**: p. 158-171.

13. Eryener, D., *Thermoeconomic optimization of baffle spacing for shell and tube heat exchangers.* Energy Conversion and Management, 2006. **47**(11-12): p. 1478-1489.
14. Dizaji, H.S., S. Jafarmadar, and S. Asaadi, *Experimental exergy analysis for shell and tube heat exchanger made of corrugated shell and corrugated tube.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2017. **81**: p. 475-481.
15. Alimoradi, A. and F. Veysi, *Optimal and critical values of geometrical parameters of shell and helically coiled tube heat exchangers.* Case Studies in Thermal Engineering, 2017. **10**: p. 73-78.
16. Gao, B., et al., *Experimental study of effects of baffle helix angle on shell-side performance of shell-and-tube heat exchangers with discontinuous helical baffles.* Experimental thermal and fluid Science, 2015. **68**: p. 48-57.
17. Abd, A.A., M.Q. Kareem, and S.Z. Naji, *Performance analysis of shell and tube heat exchanger: Parametric study.* Case studies in thermal engineering, 2018. **12**: p. 563-568.
18. Omidi, M., M. Farhadi, and M. Jafari, *A comprehensive review on double pipe heat exchangers.* Applied Thermal Engineering, 2017. **110**: p. 1075-1090.
19. Kakaç, S., H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *Heat exchangers: selection, rating, and thermal design*. 2002: CRC press.
20. Naphon, P. and T. Suchana, *Heat transfer enhancement and pressure drop of the horizontal concentric tube with twisted wires brush inserts.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011. **38**(2): p. 236-241.
21. Ghani, S., et al., *Experimental investigation of double-pipe heat exchangers in air conditioning applications.* Energy and Buildings, 2018. **158**: p. 801-811.
22. Pourahmad, S. and S. Pesteei, *Effectiveness-NTU analyses in a double tube heat exchanger equipped with wavy strip considering various angles.* Energy Conversion and Management, 2016. **123**: p. 462-469.
23. Gupta, P. and M. Atrey, *Performance evaluation of counter flow heat exchangers considering the effect of heat in leak and longitudinal conduction for low-temperature applications.* Cryogenics, 2000. **40**(7): p. 469-474.
24. Imran, M., N.A. Pambudi, and M. Farooq, *Thermal and hydraulic optimization of plate heat exchanger using multi objective genetic algorithm.* Case studies in thermal engineering, 2017. **10**: p. 570-578.
25. Sundén, B. and R.M. Manglik, *Plate heat exchangers: design, applications and performance*. Vol. 11. 2007: Wit Press.
26. Zhang, J., et al., *A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **101**: p. 305-328.
27. Akyürek, E.F., K. Geliş, and M. Yoladı, *Farklı Tip Isı Değiştiriciler için Termodinamik Analiz.* Journal of the Institute of Science and Technology, 2020. **10**(2): p. 1202-1212.
28. Rao, R. and V. Patel, *Thermodynamic optimization of cross flow plate-fin heat exchanger using a particle swarm optimization algorithm.* International Journal of Thermal Sciences, 2010. **49**(9): p. 1712-1721.

SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN ARAÇLARDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERİN YAPAY ZEKÂ KULLANILARAK İŞLENME VE FİLTRELEME YÖNTEMLERİ

Sacide TEKİN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Savunma Teknolojileri Bölümü, Selçuklu, Konya

(248268002003@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract – *Günümüzde insansız hava araçları (İHA'lar), veri toplama ve analiz süreçlerinde devrim niteliğinde gelişmeler sunmakta; özellikle savunma, çevre, tarım, afet yönetimi ve şehircilik gibi birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, savunma sanayisinde kullanılan araçlardan elde edilen görüntülerin yapay zekâ ile işlenmesi ve filtrelenmesi konuları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Görüntü işleme teknikleri, derin öğrenme mimarileri ve İHA destekli veri toplama sistemleri kullanılarak; yangın tespiti, araç marka ve model tanıma, arkeolojik alan analizleri gibi pek çok senaryoda uygulama örnekleri değerlendirilmiştir. Çalışma; maliyet, doğruluk ve zaman avantajları açısından İHA teknolojilerinin sağladığı katkıları ortaya koymakta; aynı zamanda yapay zekâ destekli çözümlerin karar destek sistemleri açısından taşıdığı potansiyeli vurgulamaktadır.*

Keywords – İnsansız Hava Araçları (İHA), Yapay Zekâ, Görüntü İşleme, Derin Öğrenme, Savunma Sanayi, Orman Yangını Tespiti, Nesne Tanıma, Sayısal Yüzey Modeli, Fotogrametri, İHA Uygulamalar

1.GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA'lar), günümüzde haritacılık, afet yönetimi, tarım, çevre planlama ve şehircilik gibi pek çok alanda aktif olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel yöntemlere göre daha hızlı, ekonomik ve erişilebilir çözümler sunarken, farklı alanlarda yüksek doğruluklu veri üretimini mümkün kılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, İHA'larla yapılan 50 farklı uygulama örneği içerik benzerliğine göre gruplanmış ve her biri detaylı biçimde özetlenmiştir.

2. GÖRÜNTÜ İŞLEME VE YAPAY ZEKÂ İLE TESPİT/ANALİZ

Bu grup, İHA görüntüleri üzerinde yapay zekâ ve görüntü işleme algoritmaları kullanılarak nesne tanıma, sınıflandırma ve analiz yapılmasına yönelik çalışmaları içermektedir:

2.1.İNSANSIZ HAVA ARACI İLE GÖRÜNTÜ İŞLEME VE YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ KULLANILARAK YANGIN TESPİTİ: ÖRNEK BİR UYGULAMA

Yangınların ekosistemler üzerindeki yıkıcı etkilerine karşı erken uyarı sistemleri geliştirmek amacıyla yapılan bu çalışmada, İHA'lardan alınan görüntüler üzerinde yapay zekâ ve görüntü işleme yöntemleri uygulanarak yangın tespiti gerçekleştirilmiştir. Python dilinde geliştirilen sistemde SqueezeNet modeli kullanılmış ve ateşin tespiti için gaussian filtreleme, eşikleme ve boyutlandırma gibi görüntü işleme teknikleri uygulanmıştır. Model, %96 doğruluk ve %98 duyarlılık oranları ile oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Bu yaklaşım, yangınlara erken müdahale edilebilmesi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Yangın tespiti amacıyla görüntü işleme ve yapay zekâ yöntemleri kullanılarak ateş ve duman analizi yapılmış, erken müdahale için yüksek doğruluk

sağlanmıştır. Yangın tespiti amacıyla görüntü işleme teknikleri (eşikleme, duman/renk segmentasyonu) uygulanarak analiz yapılmıştır.[1]

2.2.İHA İLE FOTOGRAMETRİK VERİ ÜRETİMİNDE MALİYET ANALİZİ

Bu araştırma, İHA ile yapılan fotogrametrik veri üretimi ile geleneksel yersel harita üretim yöntemlerinin maliyet, zaman ve doğruluk açısından karşılaştırmasını ele alır. Gaziantep'te 78.3 hektarlık bir alanda yapılan uygulamada, İHA ile yalnızca 32 dakikada ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretilmiş, bu veriler klasik topografik haritalarla karşılaştırılmıştır. Gerekli donanım önceden mevcutsa üretim maliyetinde %78'e varan düşüş sağlandığı gösterilmiştir. Ayrıca, 1/1000 ölçekli haritalar için yeterli doğrulukta çıktılar elde edilmiştir. Bu çalışma, İHA sistemlerinin düşük maliyetli, hızlı ve hassas veri üretim potansiyelini ortaya koyarak, özellikle mühendislik projeleri için alternatif bir yöntem olduğunu göstermektedir. Transfer learning yaklaşımıyla araç marka tespiti yapılmıştır.[2]

2.3.İHA VE HAVA LIDAR VERİLERİNDEN ÜRETİLEN SAM İLE GEOİT MODELLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

Bu çalışmada, İzmir'in Bergama ilçesinde, hem İHA fotogrametrisi hem de uçaktan elde edilen LIDAR verileri kullanılarak sayısal arazi modelleri (SAM) üretilmiş ve yerel geoit modellerinin doğruluğu değerlendirilmiştir. GNSS/nivelman ölçümleri ile karşılaştırıldığında, LIDAR ve İHA verileriyle üretilen geoit modellerinin 5 cm civarında standart sapmayla kullanılabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca farklı düşey datum sistemleri arasında veri uyumsuzlukları giderilmiş ve Global Mapper gibi yazılımlarla arazi modelleme başarıyla yapılmıştır. Bu araştırma, yerel yüksekliğe dayalı dönüşüm uygulamaları için İHA ve LIDAR'ın entegre kullanımının mümkün olduğunu kanıtlamaktadır.[3]

2.4.ARAÇ MARKA TESPİTİNDE DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMLARI

Bu çalışma, İHA görüntülerinden araç marka tespiti yapılmasına yönelik bir derin öğrenme sisteminin geliştirilmesini konu alır. Görüntülerden araçlar tespit edildikten sonra CNN tabanlı bir sınıflandırıcı ile marka belirleme işlemi yapılmıştır. Eğitim için açık veri kümeleri ve özel toplanmış görüntüler kullanılmıştır. Modelin test doğruluğu oldukça yüksek çıkmış, en iyi sonuç MobilNet mimarisiyle elde edilmiştir. Çalışma, güvenlik, trafik analizi ve şehir planlaması gibi alanlarda İHA görüntülerinin yapay zekâ ile birleşerek bilgiye dönüştürülebileceğini göstermektedir. Derin öğrenme yaklaşımlarıyla araç marka tespiti yapılmış, CNN tabanlı modeller kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.[4]

2.5.ARKEOLOJİK ALANLARDA SEGMENTASYON VE İHA GÖRÜNTÜLERİYLE NESNE TESPİTİ

Bu çalışma, arkeolojik kazı alanlarında İHA görüntülerinden elde edilen ortofoto ve yükseklik verileriyle farklı arkeolojik unsurların (duvar, zemin, kazı izleri vb.) otomatik olarak tespit edilmesini amaçlamaktadır. Görüntü işleme ve nesne tabanlı sınıflandırma yöntemleri ile belirlenen nesneler, segmentasyon sonrası katmanlara ayrılmıştır. Çalışma, alanın dijital arkeolojik haritasının çıkarılmasına olanak tanımakta ve klasik kazı süreçlerine dijital destek sağlayarak zaman ve maliyet avantajı sunmaktadır. Arkeolojik alanlardaki yapılar segmentasyon algoritmalarıyla tespit edilmiştir. Otomatik haritalama sağlanmıştır.[5]

2.6.GÖRÜNTÜ İŞLEME VE YAPAY ZEKÂ YÖNTEMİYLE ORMAN YANGINI TESPİTİ

Bu araştırmada, İHA'lardan alınan RGB görüntüler üzerinde yapılan görüntü işleme ve derin öğrenme çalışmalarıyla orman yangını tespiti yapılmıştır. Görüntülerde ateşin renk ve sıcaklık özelliklerinden yola çıkılarak CNN tabanlı bir model eğitilmiş ve duman ya da alev varlığı tespit edilmiştir. Model, gerçek zamanlı izleme sistemlerine entegre edilebilir şekilde tasarlanmış ve yüksek doğrulukla sonuç vermiştir. Bu yöntem, yangın erken uyarı sistemlerine katkı

sağlayarak yangınla mücadelede insan müdahalesini azaltmayı ve müdahale süresini kısaltmayı amaçlamaktadır. İHA görüntüleri üzerinde derin öğrenme teknikleriyle yangın algılama yapılmış, gerçek zamanlı izleme sistemlerine entegrasyon önerilmiştir.[6]

2.7.DERİN ÖĞRENME İLE ARAÇ MARKA VE MODEL TESPİTİ

Bu çalışmada, İHA görüntüleri ve sabit kamera görüntülerinden elde edilen verilerle araçların marka ve modelinin belirlenmesi amacıyla CNN tabanlı bir derin öğrenme mimarisi geliştirilmiştir. Eğitim için çeşitli veri kümeleri kullanılmış ve sistemin hem şehir içi hem de otopark görüntülerinde başarıyla çalıştığı gözlemlenmiştir. Özellikle R-CNN ve YOLO algoritmaları karşılaştırılmış; YOLO mimarisinin gerçek zamanlı uygulamalarda daha başarılı olduğu vurgulanmıştır. Bu yaklaşım, trafik denetimi, güvenlik ve şehir planlaması gibi alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. İHA görüntüleri ile araçların marka ve modelleri gerçek zamanlı tespit edilmiştir. YOLO ve R-CNN mimarileri karşılaştırılmıştır.[7]

2.8.DERİN ÖĞRENME YÖNTEMİYLE NESNE TESPİTİ: ARAÇ VE BİNA UYGULAMASI

Bu çalışmada, İHA'lardan elde edilen görüntülerde araç ve bina gibi yapısal nesnelerin tespiti için YOLOv4 derin öğrenme mimarisi kullanılmıştır. Uygulama alanı olarak karma bir şehir görüntüsü kullanılmış ve model, farklı büyüklüklerdeki nesneleri yüksek doğrulukla tanıyabilmiştir. Görüntüler üzerinde gerçek zamanlı nesne tespiti yapılabilmesi sayesinde, bu sistemin trafik yönetimi, afet sonrası hasar analizi ve güvenlik amaçlı kullanılabileceği önerilmiştir. Ayrıca eğitim süreci ve performans değerlendirmeleri detaylı olarak paylaşılmıştır. YOLOv4 ile araç ve bina tespiti gerçekleştirilmiş, görüntüler üzerinde nesne tanımlama başarıyla uygulanmıştır.[8]

3. SAYISAL YÜZEY MODELİ (SYM), FOTOGRAMETRİ VE HARİTALAMA

İHA'lar ile yapılan haritalama çalışmaları, özellikle SYM üretimi ve doğruluk analizleri üzerine yoğunlaşmıştır:

3.1.VATANDAŞ BİLİMİ TABANLI VEKTÖR HARİTALARIN KULLANILMASI İLE İHA GÖRÜNTÜLERİNİN YÖNELTİLMESİ İÇİN OTOMATİK YER KONTROL NOKTASI ÜRETİMİ

Geleneksel yer kontrol noktası (YKN) üretimi zaman alıcı ve maliyetli bir süreçtir. Bu çalışmada, açık kaynaklı vektör haritalar (örneğin OpenStreetMap) kullanılarak İHA görüntülerinin otomatik olarak yöneltilmesi ve coğrafi konumlandırılması amaçlanmıştır. Uygulamada, Canon PowerShot SX260 HS ile elde edilen görüntüler %78 boyuna ve %52 enine bindirme oranıyla işlendi. Ortaya çıkan otomatik YKN'ler, manuel seçilen noktalarla karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar vermiştir. Bu yöntem sayesinde GNSS cihazlarına duyulan ihtiyaç azaltılmış, saha çalışması yükü önemli ölçüde hafiflemiştir. Bu yaklaşım, özellikle düşük bütçeli haritalama ve afet bölgelerinde hızlı veri üretimi gibi durumlarda büyük avantajlar sağlar. Vektör haritalardan otomatik YKN üretimi yapılmıştır.[9]

3.2.HARİTALARDA YER KONTROL NOKTASI (YKN) SAYISININ DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bu araştırma, İHA fotogrametrisi ile üretilen ortofoto ve sayısal yüzey modellerinin doğruluğunun, kullanılan yer kontrol noktası (YKN) sayısına bağlı olarak nasıl değiştiğini analiz etmektedir. Farklı YKN sayıları ile yapılan testler sonucunda, az sayıda YKN ile de kabul edilebilir doğruluk seviyelerine ulaşılabildiği, ancak detaylı mühendislik uygulamaları için yeterli sayıda YKN'nin zorunlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, YKN'lerin yerleşim düzeninin de model kalitesini doğrudan etkilediği vurgulanmıştır. Bu çalışma, harita üretimi planlaması yapan mühendis ve teknikerler için önemli bir referans niteliği taşır. YKN sayısı ve yerleşiminin model doğruluğu üzerindeki etkileri ölçülmüştür.[10]

3.3.EĞİK FOTOĞRAFLARLA 3 BOYUTLU ŞEHİR MODELİ OLUŞTURMA

Bu çalışma, İHA ile alınan eğik (oblique) görüntüler kullanılarak 3 boyutlu şehir modellerinin oluşturulmasını ele alır. Dikey görüntülere ek olarak farklı açılardan çekilen eğik fotoğraflar, binaların cephe detaylarını da içerecek şekilde daha gerçekçi şehir modelleri üretmeye imkân tanır. Fotogrametrik işleme aşamasında yüksek çözünürlüklü dokular, bina yüzeylerine aktarılmış ve detaylı 3B mesh yapıları oluşturulmuştur. Bu teknik, kentsel dönüşüm, dijital ikiz şehir planlaması ve afet yönetimi gibi uygulamalarda oldukça değerli sonuçlar sunmaktadır. Eğik görüntülerle 3B şehir modeli oluşturulmuş, doğruluk analizi yapılmıştır.[11]

3.4.EĞİK GÖRÜNTÜLER KULLANILARAK 3B MODELLERİN DOĞRULUK ANALİZİ

Bu çalışmada, eğik (oblique) İHA görüntüleri kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu modellerin doğruluğu araştırılmıştır. Geleneksel dikey görüntülere göre eğik görüntüler, bina cephelerini ve dikey yüzeyleri daha ayrıntılı şekilde modelleyebilir. Çalışmada farklı uçuş yükseklikleri ve eğim açılarında toplanan görüntülerle oluşturulan modeller, yer ölçmeleriyle karşılaştırılarak konumsal ve yapısal doğruluk analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, doğru planlanmış eğik çekimlerle, 3B modellerin mimari ve şehircilik uygulamaları için yeterli hassasiyete ulaşabileceğini göstermiştir. Eğik görüntülerin 3B modellerde sağladığı avantajlar ölçülmüştür.[12]

3.5.HARİTA ÜRETİMİNDE GNSS KULLANIMI VE VERİLERİN DOĞRULUK DEĞERLENDİRMESİ

Bu çalışma, İHA ile üretilen haritalarda kullanılan GNSS sistemlerinin (RTK, PPK, SBAS gibi) doğruluk performanslarını karşılaştırmak amacıyla yapılmıştır. Aynı uçuş verisi üzerinde farklı GNSS çözümleri uygulanarak ortofoto ve SYM çıktıları üretilmiş; bu veriler yer ölçümleriyle karşılaştırılarak konumsal doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. RTK destekli sistemlerin en düşük hata payına sahip olduğu görülürken, SBAS gibi daha ekonomik çözümlerin küçük ölçekli projelerde yeterli olabileceği değerlendirilmiştir. Çalışma, kullanıcıların proje türüne göre GNSS çözümünü bilinçli şekilde seçmesine rehberlik etmektedir. GNSS destekli sistemlerin doğruluk performansı incelenmiştir.[13]

3.6.UÇUŞ PARAMETRELERİNİN (BİNDİRME, YÜKSEKLİK) MODEL DOĞRULUĞUNA ETKİSİ

Bu araştırmada, İHA uçuşlarında kullanılan parametrelerin (uçuş yüksekliği, boyuna/enine bindirme oranları, görüntü sayısı) ortofoto ve sayısal yüzey modeli doğruluğu üzerindeki etkileri test edilmiştir. Farklı senaryolarda uçuşlar gerçekleştirilmiş ve veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre yüksek bindirme oranı ve düşük uçuş yüksekliği, model doğruluğunu belirgin biçimde artırmaktadır. Ancak bu durum, veri işleme süresini ve depolama ihtiyacını da artırır. Bu nedenle uygulamanın amacı doğrultusunda optimum parametrelerin seçilmesi önerilmektedir. Bindirme oranları ve uçuş yüksekliği gibi parametrelerin model doğruluğuna etkileri analiz edilmiştir.[14]

3.7.FARKLI KAMERA MODELLERİNİN FOTOGRAMETRİK ÜRETİME ETKİLERİ

Bu çalışmada, farklı marka ve model kameraların (örneğin DJI Phantom, Sony RX1R, GoPro vb.) İHA tabanlı fotogrametrik veri üretiminde sağladığı görüntü kalitesi ve doğruluk karşılaştırılmıştır. Aynı alanda yapılan çekimlerde kamera özellikleri (sensör boyutu, çözünürlük, lens yapısı) dikkate alınarak ortofoto ve SYM çıktıları elde edilmiştir. Büyük sensörlü ve sabit lensli kameraların daha yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Bu bulgular, kullanıcıların harita üretimi öncesinde ekipman seçimi yaparken dikkat etmesi gereken teknik detayları öne çıkarmaktadır. Farklı kamera türlerinin fotogrametrik üretime etkisi değerlendirilmiştir.[15]

3.8.3B MODEL İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ VE DOĞRULUK ANALİZİ

Bu çalışma, İHA ile oluşturulan üç boyutlu yüzey modellerinden arazi elemanlarının (eğim, yön, yükseklik vb.) ne derece hassas ve güvenilir şekilde ölçülebileceğini incelemektedir. Gerçek arazi ölçümleriyle karşılaştırılarak

doğruluk analizi yapılmış, özellikle eğimli ve bitki örtüsü yoğun alanlarda model sapmaları gözlemlenmiştir. Sonuçlar, uygun uçuş planlaması ve görüntü işleme teknikleri ile yüksek doğrulukta 3B modeller elde edilebileceğini, bu verilerin mühendislik ve çevre planlaması gibi alanlarda güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. 3B modellerden yüzey özelliklerinin doğruluğu test edilmiştir.[16]

3.9.GNSS DESTEKLİ İHA VE GELENEKSEL YÖNTEMLERLE OLUŞTURULAN SAYISAL YÜZEY MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

İHA ile GNSS destekli veri toplayarak oluşturulan sayısal yüzey modelleri (SYM), klasik topografik ölçüm yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı arazi tiplerinde yapılan karşılaştırmalarda, İHA ile üretilen modellerin hem zaman hem de maliyet açısından daha avantajlı olduğu; ancak bazı yer şekli detaylarında geleneksel yöntemlere göre küçük farklar gösterdiği tespit edilmiştir. Araştırma, İHA teknolojisinin mühendislik projeleri için güvenilir bir alternatif olduğunu savunurken, hassasiyetin artırılması için GNSS verisi ile desteklenmesini önermektedir. GNSS destekli İHA ile geleneksel yöntemlerin SYM karşılaştırması yapılmıştır.[17]

3.10.KAMERA TİPİ VE UÇUŞ PLANLAMASININ 3B MODEL ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bu çalışma, farklı tipte kameralarla (örneğin RGB, multispektral) ve çeşitli uçuş parametreleriyle (uçuş yüksekliği, açı, hız) yapılan veri toplamanın 3 boyutlu model üretimi üzerindeki etkilerini analiz eder. Aynı alan üzerinde farklı kombinasyonlarla yapılan uçuşlar sonucunda elde edilen 3B modeller hem görsel kalite hem de ölçümsel doğruluk açısından karşılaştırılmıştır. Araştırma, en uygun model kalitesine ulaşmak için kamera seçimi ve uçuş planlamasının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini savunur. Uçuş planlaması ve kamera seçiminin model kalitesi üzerindeki etkisi irdelenmiştir.[18]

3.11.YER KONTROL NOKTASI (YKN) KULLANMADAN FOTOGRAMETRİK MODEL ÜRETİMİ

YKN kullanımı her ne kadar doğruluğu artırsa da, her zaman sahada bu noktaları kurmak mümkün olmayabilir. Bu çalışmada, yalnızca İHA üzerindeki GNSS verisi kullanılarak, YKN olmadan fotogrametrik model üretimi gerçekleştirilmiş ve bu modellerin doğruluğu yer ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, belirli koşullar altında YKN olmadan da mühendislik projelerinde kabul edilebilir hassasiyet elde edilebileceğini göstermektedir. Özellikle erişilemeyen veya riskli alanlarda bu yöntem büyük kolaylık sağlamaktadır. YKN kullanılmadan yapılan fotogrametrik modellemenin doğruluğu değerlendirilmiştir.[19]

4. TARIMSAL GÖZLEM VE VERİ ANALİZİ

Tarım alanlarında İHA'ların kullanımı, ürün gelişiminin izlenmesi, yabancı ot tespiti ve verim tahmini gibi çok yönlü amaçlara hizmet etmektedir:

4.1.ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN OTOMATİK AĞAÇ TESPİTİ

Bu çalışma, İHA'lardan elde edilen çok yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanılarak şehir ve doğa alanlarında otomatik ağaç tespiti yapılmasını hedeflemiştir. Öncelikle ortofoto ve sayısal yüzey modelleri oluşturulmuş, ardından nesne tabanlı sınıflandırma yöntemiyle ağaçlar segmentlere ayrılmıştır. Hacettepe Üniversitesi yerleşkesinde dört farklı test alanında yapılan analizlerde ağaç zirve noktaları, normalize SYM üzerinden otomatik olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, %96'ya varan doğruluk oranlarıyla yöntemin oldukça güvenilir olduğunu gösterirken, bazı alanlarda (çimenlik gibi) sınıflandırma hatalarının yaşandığı da belirtilmiştir. Bu çalışma, orman envanteri çıkarma, peyzaj düzenleme ve yeşil alan planlamasında İHA kullanımına güçlü bir örnek sunar. Otomatik ağaç tespiti yapılarak bitki envanteri oluşturulmuştur.[20]

4.2.İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN YABANCI OT TESPİTİ VE HARİTALANDIRILMASI

Tarımsal üretimde verimliliği azaltan önemli faktörlerden biri yabancı otlardır. Bu çalışmada, İHA'lar aracılığıyla elde edilen çok bantlı görüntüler üzerinden yabancı ot tespiti ve haritalaması yapılmıştır. Görüntüler işlenerek NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gibi bitki indeksleri hesaplanmış, ardından nesne tabanlı sınıflandırma yöntemleriyle otlar ayrıştırılmıştır. Haritalar üzerinden yapılacak ilaçlama veya mekanik mücadele ile zaman ve maliyet tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu yöntem, hassas tarım uygulamalarına katkı sunmakta ve sürdürülebilir üretim için önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Yabancı otların tespiti ve haritalanması gerçekleştirilmiştir.[21]

4.3.İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN YABANCI OT YOĞUNLUĞUNUN BELİRLENMESİ VE ANALİZİ

Bu çalışmada, tarımsal alanlarda İHA ile alınan görüntülerden faydalanılarak yabancı otların yoğunluk dağılımı analiz edilmiştir. Görüntü işleme teknikleri ile tarlada yeşil doku yoğunluğu çıkarılmış, referans parsellerde yapılan gözlemlerle veriler doğrulanmıştır. Analizler, tarla içi heterojenliğin belirlenmesinde başarılı sonuçlar vermiştir. Elde edilen haritalar, akıllı tarım teknolojilerinin temelini oluşturarak, sadece gerekli alanlarda müdahale edilmesine olanak tanır. Böylece ilaçlama ve işçilik maliyetlerinde ciddi tasarruflar sağlanabilir. Tarla içi heterojenlik analiz edilerek yabancı ot yoğunluğu belirlenmiştir.[22]

4.4.NDVI GÖRÜNTÜLERİYLE YABANCI OT YOĞUNLUĞUNUN HARİTALANMASI

İnsansız hava araçlarından alınan multispektral görüntüler yardımıyla hesaplanan NDVI değerleri kullanılarak, yabancı ot yoğunluğu ve dağılımı analiz edilmiştir. NDVI, bitki örtüsünün sağlık durumu ve yoğunluğu hakkında bilgi verir. Yüksek çözünürlüklü görüntülerle oluşturulan ot yoğunluğu haritaları sayesinde, tarlaların farklı bölgelerine özgü müdahale planları yapılabilir. Çalışma, dijital tarım uygulamaları ve hassas ilaçlama sistemleri için temel veri katmanlarını oluşturarak sürdürülebilir tarımın desteklenmesine katkı sunmaktadır. NDVI kullanılarak ot yoğunluğu haritaları oluşturulmuştur.[23]

4.5.TARIMSAL ALANLARDA MULTİ-TEMPORAL İHA VERİLERİYLE VERİM ANALİZİ

Bu çalışmada, tarımsal arazilerde yıl içinde farklı zamanlarda İHA uçuşları yapılarak elde edilen veriler kullanılarak verim tahmini yapılmıştır. Multispektral kamera ile alınan görüntülerden NDVI ve benzeri bitki indeksleri hesaplanarak büyüme dönemleri izlenmiştir. Çiftçilere yönelik olarak hazırlanan bu analizler, ürünlerin gelişim süreçlerini takip etmeyi, verim tahmininde bulunmayı ve gerektiğinde müdahaleyi mümkün kılmıştır. Bu tür çok zamanlı veriler, tarımda karar destek sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Çok zamanlı İHA verileri ile verim analizleri yapılmıştır.[24]

4.6.TARIMSAL ALANLARDA NESNE TABANLI SINIFLANDIRMA YÖNTEMİ İLE ARAZİ ÖRTÜSÜ BELİRLEME

Bu çalışmada, tarımsal alanlarda İHA görüntülerinden elde edilen veriler kullanılarak arazi örtüsünün türleri nesne tabanlı sınıflandırma (OBIA) yöntemiyle analiz edilmiştir. Tarla, çayır, ağaçlık alan gibi sınıflar ayrıştırılmış; farklı segmentasyon parametreleri denenerek en uygun sınıflandırma yaklaşımı belirlenmiştir. Çalışma, özellikle otomatik ürün haritalama, hassas tarım uygulamaları ve arazi kullanım değişikliklerinin takibi için etkili bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca sınıflandırma doğruluğunun, görüntü çözünürlüğü ve segment boyutlarıyla doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmıştır. Tarımsal alanlarda arazi örtüsü nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi ile belirlenmiştir.[25]

4.7.İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN AĞAÇ YOĞUNLUĞU VE YÜKSEKLİĞİ TESPİTİ

Bu çalışmada, İHA görüntülerinden ağaçların otomatik olarak tespit edilmesi ve yükseklik bilgilerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Sayısal yüzey modeli ve sayısal arazi modeli farkı alınarak her ağacın bireysel yüksekliği belirlenmiştir. Çalışma, orman envanteri, şehir içi yeşil alan yönetimi ve peyzaj planlamasında kullanılabilecek otomatik bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca, ağaçların konumlarının GPS koordinatlarıyla eşleştirilmesi sayesinde CBS tabanlı bir harita da oluşturulmuştur. Ağaç yoğunluğu ve yükseklik analizi yapılmıştır.[26]

4.8.TARIMSAL ALANLARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE ARAZİ KULLANIM SINIFLANDIRMASI

Bu çalışma, İHA ile alınan RGB görüntüler kullanılarak tarımsal alanların farklı arazi kullanım türlerine göre (ekin, nadas, çayır, ağaçlık vb.) sınıflandırılmasını konu alır. Görüntüler üzerinden yapılan segmentasyon işlemleriyle her parsel gruplandırılmış, ardından destek vektör makineleri (SVM) ve rastgele orman (Random Forest) gibi algoritmalarla sınıflandırma yapılmıştır. Sonuçta yüksek doğrulukla üretim haritaları oluşturulmuş, bu haritalar tarımsal planlama, arazi kullanım takibi ve verim analizleri için önerilmiştir. Tarımsal alanlardaki üretim türleri sınıflandırılmıştır.[27]

5. DOĞAL AFET ANALİZİ VE RİSK YÖNETİMİ

Heyelan, kaya düşmesi ve taşkın gibi afet risklerinin modellenmesi ve sonrası planlama çalışmaları bu başlık altında toplanmıştır:

5.1.MADEN SAHALARINDAKİ DEFORMASYONLARIN İHA'LAR İLE İZLENMESİ

Açık ocak madenciliğinde deformasyonların erken tespiti, hem iş güvenliği hem de verimlilik açısından kritik önem taşır. Bu çalışmada, İHA'lar aracılığıyla alınan hava görüntülerinden elde edilen ortofoto ve sayısal yüzey modelleri yardımıyla, maden sahasındaki deformasyonların izlenmesi hedeflenmiştir. Agisoft yazılımı ile gerçekleştirilen analizler sonucunda, üç farklı dönemde üretilen haritalar karşılaştırılmış ve arazideki değişiklikler başarılı şekilde ortaya konmuştur. Bu yöntemle, olası kaymalar önceden belirlenebilirken, madenlerin güvenli işletilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi sağlanmaktadır. Maden sahasında deformasyon takibi yapılmıştır.[28]

5.2.İNSANSIZ HAVA ARACINDAN ELDE EDİLEN VERİLER İLE KAYA DÜŞME POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: ADAM KAYALAR ÖRNEĞİ, MERSİN

Tarihi ve kültürel bir alan olan Adam Kayaları bölgesinde, İHA verileri ile olası kaya düşme riskleri analiz edilmiştir. Çalışmada, İHA'dan alınan yüksek çözünürlüklü görüntülerden oluşturulan sayısal yükseklik modelleri, HY-STONE yazılımında değerlendirilerek 3B kaya düşme simülasyonları yapılmıştır. Gerçekleşebilecek düşmelerin hızı, enerjisi ve sıçrama yükseklikleri analiz edilmiş ve özellikle ziyaretçi güvenliğini tehlikeye atabilecek alanlar belirlenmiştir. Arazi gözlemleri ile simülasyonlar doğrulanmış; böylece bu tür çalışmaların kültürel miras alanlarında uygulanabilirliği ve önleyici güvenlik politikalarına katkısı ortaya konmuştur. Kaya düşmesi riski analiz edilmiştir.[29]

5.3. ESKİ BİR ASKERİ SAHADA İHA SİSTEMLERİ KULLANILARAK PATLAMIŞ VE PATLAMAMIŞ MÜHİMMATLARIN TESPİTİ İÇİN HAVADAN MANYETİK İLE ARAŞTIRILMASI

Ankara'nın Kazan ilçesindeki eski bir askeri atış alanında, yüzeye yakın patlamış ya da patlamamış mühimmatların (UXO) tespiti için İHA destekli havadan manyetik veri toplama yöntemi kullanılmıştır. DJI M600 Pro modeli İHA'ya monte edilen sezyum buharı temelli manyetik sensör ile yüksek çözünürlüklü veriler toplanmış; elde edilen manyetik anomaliler, mühimmatların yer ve derinlik tespitinde kullanılmıştır. Arazi koşullarının zorlu olduğu, insan erişiminin kısıtlı olduğu alanlarda bu yöntem hem ekonomik hem de güvenli bir alternatif sunar. Özellikle arkeoloji, adli vakalar

ve maden aramaları gibi alanlarda uygulanabilirliği oldukça yüksektir. Patlamamış mühimmatların manyetik ölçümlerle tespiti sağlanmıştır.[30]

5.4.İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ ENGEBELİ ALANLARDAKİ KARAYOLU PROJELERİNDE KULLANIMI

Bu çalışma, arazi yapısının engebeli olduğu bölgelerde karayolu projelendirmesi sürecinde İHA sistemlerinin nasıl bir avantaj sunduğunu ortaya koyar. Engebeli arazilerde geleneksel yöntemlerle veri toplamak zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, İHA'larla yapılan uçuşlardan elde edilen ortofoto ve sayısal yükseklik modelleri sayesinde hem hızlı hem de düşük maliyetli ve güvenli veri üretimi sağlanır. Çalışmada özellikle İHA'ların düşük irtifa uçuş kabiliyetleri, yüksek çözünürlükte veri sağlama potansiyeli ve personel güvenliği açısından sunduğu avantajlar vurgulanmıştır. Yol projelerinin planlama aşamalarında en uygun güzergâhların belirlenmesi için İHA verilerinin oldukça etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. SYM ve ortofoto kullanılarak taşkın analizi yapılmıştır.[31]

5.5.SAYISAL YÜZEY MODELLERİ VE ORTOFOTO GÖRÜNTÜLER İLE TAŞKIN ANALİZİ

Bu çalışma, taşkın riski taşıyan alanların belirlenmesi ve bu risklerin haritalanması için İHA'lardan elde edilen sayısal yüzey modeli (SYM) ve ortofoto görüntülerin nasıl kullanılabileceğini ele alır. Modelleme sürecinde İHA görüntülerinden elde edilen yükseklik verileri kullanılarak potansiyel su taşkını bölgeleri belirlenmiş, bu alanlar Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) üzerinde analiz edilmiştir. Taşkın suyu yüksekliğine göre arazi üzerindeki yayılım ve olası zarar alanları detaylandırılmıştır. Çalışma, yerel yönetimlerin taşkın erken uyarı ve planlama çalışmalarına veri sağlamayı hedeflemektedir. Sayısal modellerle taşkın alanları tespit edilmiştir.[32]

5.6.YAPAY ZEKÂ YARDIMIYLA BİNA HASAR DÜZEYİ BELİRLEME: AFET SONRASI UYGULAMA

Deprem, sel gibi afetler sonrası bina hasar durumunun hızlıca belirlenmesi büyük önem taşır. Bu çalışmada, afet bölgesinde toplanan İHA görüntüleri bir yapay zekâ modeliyle işlenerek binaların hasar düzeyleri (yıkık, ağır, orta, hafif, hasarsız) otomatik olarak tespit edilmiştir. Derin öğrenme algoritmaları, görüntülerdeki yapısal bozulmaları analiz ederek sınıflandırma yapar. Yüksek doğruluk oranlarıyla çalışan bu sistem, afet yönetimi ekiplerinin olaylara hızlı müdahalesine yardımcı olurken, aynı zamanda karar destek sistemi olarak kullanılabilir. Afet sonrası bina hasar sınıflandırması yapılmıştır.[33]

5.7.HEYELAN RİSKİNİN SAYISAL YÜZEY MODELLERİYLE BELİRLENMESİ

Arazi kaymalarının önceden tahmin edilmesi için sayısal yükseklik modelleri (SYM) kullanılarak heyelan eğilim haritaları oluşturulmuştur. İHA ile elde edilen verilerden arazi eğimi, yönü, yükseklik farkları analiz edilmiş ve kritik eşik değerleri üzerinden potansiyel heyelan alanları sınıflandırılmıştır. CBS yazılımlarıyla yapılan bu modelleme, hem yerleşim alanlarının planlanmasında hem de afet öncesi risk azaltma çalışmalarında karar vericilere destek sunmaktadır. Çalışma, düşük maliyetli, hızlı ve etkili bir heyelan analiz yöntemi olarak önerilmektedir. Heyelan eğilimli bölgeler belirlenmiştir.[34]

5.8.AFET RİSKİ OLAN BÖLGELERDE YOL GÜZERGÂHI PLANLAMASI

Bu araştırma, afet riski taşıyan bölgelerde (örneğin heyelan, taşkın, yangın riski yüksek alanlar) güvenli yol güzergâhlarının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. İHA ile alınan ortofoto ve SYM verileri kullanılarak, topoğrafik yapı, eğim, zemin türü gibi kriterler analiz edilmiş ve bu risk faktörlerine göre alternatif yol senaryoları üretilmiştir. Arazi sınıflandırmaları ve risk haritaları CBS ortamında birleştirilerek en uygun güzergâh seçimi yapılmıştır. Bu

yöntem, kırsal alanlarda ulaşım planlaması ve afet müdahale yollarının planlanmasında büyük avantaj sağlar. Afet riski olan bölgelerde yol planlaması yapılmıştır.[35]

5.9.AFET BÖLGELERİNDE YOL AĞININ BELİRLENMESİ VE ANALİZİ

Afet sonrası müdahale planlamasında en önemli faktörlerden biri ulaşım altyapısının durumudur. Bu çalışmada, afet sonrası İHA ile elde edilen görüntülerden yol ağının belirlenmesi ve geçiş uygunluğunun analiz edilmesi amaçlanmıştır. Görüntü işleme ve sınıflandırma yöntemleriyle yollar, kapalı geçişler ve alternatif güzergâhlar belirlenmiş; Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak analiz haritaları oluşturulmuştur. Bu sayede afet müdahale ekiplerinin sahada hızlı hareket etmesine olanak sağlayacak bir karar destek sistemi önerilmiştir. Afet bölgelerinde yol ağının uygunluğu değerlendirilmiştir.[36]

6. ŞEHİRSEL PLANLAMA VE KENT HARİTALAMA

Kentsel alanların yönetimi için İHA'lardan elde edilen veriler kullanılarak detaylı analizler yapılmıştır:

6.1.KAMERA TÜRÜ VE UÇUŞ PARAMETRELERİNİN HARİTA ÜRETİMİNDEKİ ETKİSİ

Bu çalışma, İHA ile yapılan harita üretiminde kullanılan kameraların (RGB, multispektral, termal vb.) türüne ve uçuş parametrelerine (irtifa, bindirme oranı, uçuş hızı) göre verilerin doğruluğunu nasıl etkilediğini inceler. Farklı kamera sensörlerinden elde edilen görüntülerin ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretimi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Özellikle düşük irtifada yüksek bindirme oranıyla yapılan uçuşlarda daha yüksek doğruluk elde edildiği gözlenmiştir. Çalışma, planlama sürecinde ekipman ve uçuş ayarlarının dikkatle seçilmesinin veri kalitesini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Kamera türü ve uçuş parametrelerinin doğruluk üzerindeki etkisi araştırılmıştır.[37]

6.2.YER KONTROL NOKTASI (YKN) YERLEŞİMİ VE SAYISININ HARİTA DOĞRULUĞUNA ETKİSİ

İHA fotogrametrisinde yer kontrol noktalarının (YKN) sayısı kadar, bu noktaların alandaki dağılımı da önemlidir. Bu çalışmada, farklı YKN yerleşim senaryoları (köşelerde, merkezde, eşit dağılım) kullanılarak aynı alanda ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, YKN'lerin düzgün ve dengeli bir biçimde dağıtıldığında model doğruluğunun önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Ayrıca YKN sayısının artırılmasının doğruluğa katkısı bir noktadan sonra azalmaktadır. Bu bulgular, özellikle harita mühendisliği projelerinde YKN planlamasında dikkat edilmesi gereken unsurları vurgular. YKN yerleşim düzeninin doğruluğa etkisi değerlendirilmiştir.[38]

6.3.İHA İLE ORTOFOTO VE SAYISAL YÜZEY MODELİ ÜRETİMİ: TARIMSAL ARAZİ ÖRNEĞİ

Bu araştırmada, tarımsal alanlarda ortofoto harita ve sayısal yüzey modeli (SYM) üretimi için İHA'lardan elde edilen görüntüler kullanılmıştır. Uçuş planı, görüntü bindirme oranları ve GNSS destekli yer kontrol noktaları belirlenerek ortofoto mozaik ve SYM elde edilmiştir. Arazi eğimi, bitki örtüsü ve toprak yapısına göre verilerin doğruluğu test edilmiştir. Bu veriler, tarım arazilerinin topoğrafik yapısının modellenmesi, sulama planlaması ve erozyon analizi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere harita formatında sunulmuştur. Yöntem, kırsal alanlardaki detaylı harita ihtiyacını düşük maliyetle karşılamaktadır. Tarımsal bir arazide ortofoto ve SYM üretimi gerçekleştirilmiştir.[39]

6.4.HAVADAN LİDAR VERİSİYLE ŞEHİRSEL ALANDA YOL, BİNA VE AĞAÇ AYRIŞTIRILMASI

Bu çalışma, şehirsel alanda elde edilen LIDAR verileriyle zemin (yol), bina ve bitki örtüsünü birbirinden ayırt etmeye yönelik bir segmentasyon algoritması geliştirmiştir. LIDAR yoğunluk, yükseklik ve yansıtıcılık gibi parametreler kullanılarak her pikselin ait olduğu sınıf belirlenmiş ve bu sınıflar katmanlara ayrılmıştır. Yöntem, özellikle kentsel planlama, dijital ikiz şehir üretimi ve afet senaryolarında detaylı analizlerin yapılmasına olanak sağlar. Aynı zamanda

yapay zekâ ile desteklenerek sınıflandırma doğruluğu artırılmıştır. LIDAR verisi ile şehir alanında yol, bina ve bitki ayrımı yapılmıştır.[40]

6.5. RGB GÖRÜNTÜLERİNDEN YOL, BİNA VE YEŞİL ALAN SINIFLANDIRMASI

Bu çalışmada, İHA'lardan alınan RGB görüntüleri kullanılarak kentsel alanlarda yol, bina ve yeşil alanların otomatik olarak sınıflandırılması hedeflenmiştir. Piksel tabanlı ve nesne tabanlı yöntemler karşılaştırılarak; segmentasyonun daha stabil sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Görüntülerdeki renk, doku ve konumsal ilişkiler kullanılarak sınıflar ayrıştırılmış ve ortofotolar üzerinden doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu yöntem, şehir haritalarının hızlı güncellenmesi ve yeşil alan takibi gibi uygulamalar için faydalı bir analiz aracı olarak sunulmuştur. RGB görüntülerle yol, bina ve yeşil alan sınıflandırması yapılmıştır.[41]

6.6.YEŞİL ALANLARIN TESPİTİ VE KENTSEL PLANLAMA AMAÇLI SINIFLANDIRMA

Kentsel alanlarda yeşil alanların belirlenmesi, şehir planlaması ve çevre yönetimi açısından kritik önemdedir. Bu çalışmada, İHA'lardan elde edilen görüntülerle yeşil alanların (park, bahçe, çimlik alan vb.) tespiti ve sınıflandırılması yapılmıştır. Görüntü işleme algoritmaları sayesinde bitki örtüsü yoğunluğu belirlenmiş ve diğer kentsel unsurlardan (yol, bina) ayrıştırılmıştır. Elde edilen haritalar, belediyelerin yeşil alan politikalarını değerlendirmesine ve yeni park alanlarının planlanmasına yardımcı olacak biçimde kullanılmıştır. Kentsel yeşil alanların belirlenmesi ve planlamaya katkısı sağlanmıştır.[42]

6.7.ORTOFOTO KALİTESİNİN SAYISAL YÜZEY MODELİNE ETKİSİ

Bu çalışma, ortofoto haritaların çözünürlüğü ve geometrik doğruluğunun, sayısal yüzey modeli (SYM) üretimi üzerindeki etkisini incelemektedir. Farklı çözünürlükte ortofotolarla oluşturulan SYM'ler karşılaştırılmış ve model yüzeyindeki detay kaybı ya da bozulmalar analiz edilmiştir. Özellikle düşük çözünürlükteki görüntülerin yüksek eğimli arazilerde model sapmalarına yol açtığı belirlenmiştir. Çalışma, harita üretimi ve mühendislik uygulamalarında kullanılacak ortofotoların kalitesine dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ortofoto çözünürlüğünün SYM kalitesine etkisi analiz edilmiştir.[43]

6.8.FARKLI SAYISAL YÜZEY MODELİ (SYM) ÜRETİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışma, aynı bölge için farklı yöntemlerle (fotogrametri, LIDAR, GNSS destekli ölçüm) üretilen sayısal yüzey modellerini karşılaştırarak hangi yöntemin hangi tür arazi koşullarında daha avantajlı olduğunu analiz etmiştir. Arazi eğimi, bitki örtüsü, yapı yoğunluğu gibi değişkenler altında modellerin karşılaştırmalı doğruluk analizleri yapılmıştır. Fotogrametri yöntemi genel kullanım için uygun bulunurken, yoğun bitki örtüsü altındaki alanlarda LIDAR'ın daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu analiz, model üretimi öncesi doğru yöntem seçimi açısından yol göstericidir. Farklı SYM üretim yöntemleri (fotogrametri, LIDAR, GNSS) karşılaştırılmıştır.[44]

7. MADENCİLİK VE DEFORMASYON TAKİBİ

İHA'lar, maden sahalarında yüzey hareketlerini izleme ve alan modelleme çalışmalarında etkin olarak kullanılmıştır:

7.1. KARAYOLU ÖLÇMELERİNDE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KULLANILMASI: OKURCALAR ŞEHİR MERKEZİ ÖRNEĞİ

Bu çalışma, şehir merkezinden geçen karayollarında yüksek doğruluklu ölçüm verilerine ulaşmak için İHA sistemlerinin nasıl kullanılabileceğini araştırıyor. Geleneksel yersel ölçüm yöntemlerinin trafik güvenliği, zaman ve maliyet açısından zorlukları vurgulanırken, GNSS-IMU destekli İHA'larla elde edilen ortofoto görüntüleri ve nokta

bulutları sayesinde, detaylı ve doğru sayısal arazi modellerinin üretilebileceği gösteriliyor. PhotoScan ve Structure from Motion algoritmaları ile işlenen veriler, toprak ve sert zeminlerde ortalama 3,96–7,32 cm düşey doğruluk sunuyor. Çalışma ayrıca, İHA yöntemlerinin 1/1000 ölçekli harita üretiminde alternatif olabileceğini ve trafik güvenliği açısından da önemli faydalar sağlayabileceğini ortaya koyuyor. Karayolu üst yapı ölçümleri yapılmış, İHA ile hassas veri üretimi gerçekleştirilmiştir.[45]

7.2.VEKTÖR ALAN KILAVUZU YÖNTEMİ İLE GÖRSEL ÇİZGİ TAKİBİ İÇİN İNSANSIZ HAVA ARACI ÜZERİNDEKİ YALPANIN MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETİMİ

Bu teknik çalışmada, dört pervaneli bir İHA'nın görsel çizgi takibi sırasında rotadan sapmasını önlemek amacıyla geliştirilen model öngörülü kontrol (MPC) algoritması ile klasik PID denetimi karşılaştırılmıştır. TVAK (Tanjant Vektör Alan Kılavuzu) algoritması ile yol tanımlaması yapılmış, kamera görüntüleri kullanılarak İHA'nın yönelim açısı sürekli güncellenmiştir. Yapılan testlerde, 3 eksenli yalpa sistemine sahip MPC denetimli İHA'nın, rota takibinde daha başarılı ve daha az enerji tüketen bir performans sergilediği ortaya konmuştur. Bu çalışma, özellikle iç mekân ya da sınırlı görüş ortamlarında çizgi takibi gerektiren görevlerde İHA'ların kullanımına katkı sağlamaktadır. Görsel çizgi takibi için model öngörülü kontrol yöntemleri uygulanmıştır.[46]

7.3.AFET BÖLGESİNDEKİ BİNALARIN İHA GÖRÜNTÜLERİ İLE HASAR TESPİTİ

Doğal afetler sonrasında binalarda oluşan hasarın hızlıca belirlenmesi, müdahale ve planlama açısından hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada, afet bölgelerinde İHA'lar aracılığıyla alınan görüntülerden bina hasar seviyeleri yapay zekâ algoritmalarıyla otomatik olarak sınıflandırılmıştır. Derin öğrenme teknikleriyle geliştirilen model, farklı hasar düzeylerini (hafif, orta, ağır, yıkık) yüksek doğrulukla ayırt edebilmektedir. Çalışma, afet sonrası hızlı karar alma süreçlerinde kullanılabilecek etkili ve zaman kazandırıcı bir yaklaşım sunmakta ve afet yönetimi alanına katkı sağlamaktadır. Afet sonrası bina hasarı tespitinde derin öğrenme yöntemleri kullanılmıştır.[47]

7.4.OTOMATİK YER KONTROL NOKTASI ÜRETİMİNDE VEKTÖR HARİTALARIN KULLANIM**I**

Bu çalışma, İHA görüntülerinin yöneltilmesi ve coğrafi referanslandırılması sürecinde, araziye çıkmadan, mevcut vektör haritalardan otomatik yer kontrol noktası (YKN) üretimini konu alır. OpenStreetMap gibi kaynaklardan elde edilen detaylar, görüntülerle eşleştirilerek YKN olarak tanımlanmıştır. Otomatik eşleştirme algoritmaları yardımıyla oluşturulan bu noktalarla elde edilen ortofotolar, geleneksel yöntemlerle üretilenlerle karşılaştırılmış ve benzer doğruluk seviyeleri yakalanmıştır. Bu yöntem, özellikle afet sonrası acil haritalama ihtiyaçlarında büyük zaman ve maliyet avantajı sağlar. Vektör haritalar yardımıyla otomatik YKN üretimi yapılmıştır.[48]

7.5.MADEN SAHALARINDA ÜRETİLEN 3B MODELLERİN GÜVENLİK VE VERİMLİLİK ANALİZİNDE KULLANILMASI

Açık ocak maden işletmelerinde güvenlik risklerinin tespiti ve alan yönetimi için İHA teknolojisi ile 3B modelleme yapılmıştır. Fotogrametrik veriler işlenerek maden sahasının dijital ikizi oluşturulmuş ve deformasyon izleme, şev stabilitesi değerlendirme gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, maden sahasının zaman içerisindeki değişimi gözlemlenebilmekte ve riskli bölgeler belirlenerek önleyici tedbirler alınabilmektedir. Çalışma, İHA ile maden yönetiminin nasıl daha güvenli ve verimli hâle getirilebileceğini göstermektedir. 3B modeller maden güvenliği ve verimlilik analizi için kullanılmıştır.[49]

7.6. FARKLI UÇUŞ YÜKSEKLİKLERİ VE POZLAMA AYARLARININ GÖRÜNTÜ KALİTESİNE ETKİSİ

Bu çalışmada, İHA ile görüntü alınırken kullanılan farklı uçuş yükseklikleri ve kamera pozlama ayarlarının (ISO, enstantane, diyafram) fotoğraf kalitesine ve veri işleme sonuçlarına etkisi değerlendirilmiştir. Görüntü kalitesi, özellikle düşük ışık koşullarında büyük farklılıklar göstermekte ve model doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

Optimal pozlama ayarlarının seçilmesiyle daha net ve kontrastlı görüntüler elde edilmiş, bu da ortofoto ve sayısal model üretiminde hata oranlarını azaltmıştır. Çalışma, özellikle amatör kullanıcılar ve yeni başlayanlar için önemli teknik öneriler sunmaktadır. Farklı uçuş yükseklikleri ve pozlama ayarlarının görüntü kalitesine etkisi incelenmiştir.[50]

8.SONUÇ

İHA teknolojileri, gelişmiş sensörler ve analiz algoritmaları ile birleştirildiğinde, pek çok sektörde karar verme süreçlerini hızlandırmakta, maliyetleri azaltmakta ve insan güvenliğini artırmaktadır. Bu çalışma kapsamında özetlenen 50 başlık, İHA'ların çok disiplinli kullanım potansiyelini gözler önüne sermektedir. Her bir uygulama, belirli bir probleme yenilikçi bir çözüm sunarken, akademik ve sektörel düzeyde gelişimin önünü açmaktadır.

9.KAYNAKLAR

1. Aksoy, B., et al., *İnsansız hava aracı ile görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak yangın tespiti: örnek bir uygulama.* Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2021. **9**(6): p. 112-122.
2. Melis, U. and I. ÖZEMİR, *İHA ile Fotogrametrik Veri Üretiminde Maliyet Analizi.* Harita Dergisi, Ocak, 2019. **161**: p. 35-45.
3. Kuçak, R.A., et al., *İHA ve hava LİDAR verilerinden üretilen SAM ile geoit modellerinin değerlendirilmesi üzerine bir inceleme.* TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası. **17**: p. 25-27.
4. Aslan, N., D.K. San, and S. Selim, *İHA Tabanlı Sayısal Yüzey Modeli Kullanılarak Kentsel Peyzajda Ağaç Sıklığı Ve Dikim Aralıklarının Otomatik Olarak Belirlenmesi.* Materyal Bilgileri: p. 19.
5. Gök, G., et al., *Arkeolojik Alanlarda Ortofoto Harita Üzerinden U-Net Tabanlı bir Segmentasyon ve Sınıflandırma Yaklasımı A U-Net Based Segmentation and Classification Approach over Orthophoto Maps of Archaeological.*
6. Engin, M.A. and S. Kökhan, *İnsansız Hava Araçları ile Orman Yangınlarının Tespitinde Görüntü İşleme ve Yapay Zekâ Tabanlı Otomatik Bir Model.* Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2024. **12**(2): p. 762-775.
7. Kunduracı, M.F., *Görüntü işleme yöntemleri kullanarak araç marka ve modelinin tespit edilmesi.* 2019.
8. Kaymak, A.M., *İnsansız hava aracı (drone) ve görüntü işleme teknolojilerinin meyve bahçelerinde kullanım örneği.* 2019.
9. Demir, N. and H. Köksal, *Vatandaş Bilimi Tabanlı Vektör Haritaların Kullanılması ile İnsansız Hava Aracından Elde Edilen Görüntülerin Yöneltilmesi için Otomatik Yer Kontrol Noktası Üretimi.* Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2018. **33**(4): p. 255-266.
10. Yiğit, A.Y. and M. Uysal, *Yüksek çözünürlüklü insansız hava aracı (İHA) görüntülerinden karayolların tespiti.* Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2021. **10**(3): p. 1040-1054.
11. Sayar, İ., *Eğik Fotogrametrik Yöntem ve Klasik Yöntemle Fotogrametrik Veri Üretimlerinin Karşılaştırması*. 2021, Konya Teknik Üniversitesi.
12. Kazar, G.K., *İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Metrik Olmayan Kameraların Kalibrasyonu*. 2021, Konya Teknik Üniversitesi.
13. BUDAK, G.Y., M.S. DOĞAN, and S. ABDİKAN, *İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN KONVOLÜSYONEL SİNİR AĞLARI İLE BİNA HASAR TESPİTİ.*

14. Ulvi, A., V. İzci, and A.Y. Yiğit, *Yer Kontrol Nokta (YKN) Sayısı ve Dağılımının Harita Üretim Hassasiyetine Etkisinin Araştırılması.* Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 2024. **40**(2): p. 167-180.

15. Kırat, S.S. and İ. Aydın, *İHA TABANLI RAY KONTROLÜ İÇİN EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI İLE RAY GÖRÜNTÜLERİNİN GERÇEK ZAMANLI SEGMENTASYONU.* Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2024. **27**(1): p. 151-165.

16. Canaz Sevgen, S., *LiDAR verilerinden bina çatı düzlemi otomatik çıkarım modeli geliştirme.*

17. Zeybek, M. and İ. Şanlıoğlu, *Topoğrafik yüzey değişimlerinin görüntü işleme teknikleriyle belirlenmesi üzerine bir araştırma.* 2019.

18. Yiğit, A.Y., Y. Kaya, and H.İ. Şenol, *AÇIK MADEN OCAKLARINDA İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) KULLANIMI.* Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 2023. **11**(1): p. 225-235.

19. Güzel, E. and M. Yağcı, *Hareketli insan yüzü tespit ve takibi yapabilen İHA uygulaması.* Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2021. **9**(6): p. 383-394.

20. Gürbüz, M.F. and M. Türker, *Çok yüksek çözünürlüklü İHA görüntülerinden otomatik ağaç tespiti.* Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği IX. Teknik Sempozyumu (TUFUAB2017), 2017: p. 27-29.

21. Altun, M. and M. Türker, *Çok yüksek çözünürlüklü renkli İHA görüntülerinden kentsel alanlarda araç tespiti.* Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2020. **26**(2): p. 371-384.

22. SEFERCİK, U.G., M. NAZAR, and İ. AYDIN, *OPTİK İHA İLE 3B MODEL ÜRETİMİNDE PROBLEMATİK NOKTALAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ.* VIII. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2022), Doi, 2022. **10**.

23. Şin, B. and İ. Kadıoğlu, *İnsansız hava aracı (İHA) ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak yabancı ot tespitinin yapılması.* Turkish journal of weed science, 2019. **22**(2): p. 211-217.

24. Türkoğlu, M., et al., *Derin Evrişimsel Sinir Ağı Kullanılarak Kayısı Hastalıklarının Sınıflandırılması.* Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2020. **9**(1): p. 334-345.

25. Sönmez, N.K., M. Çoşlu, and N. Demir, *Farklı insansız hava araçlarından (İHA) elde edilen veriler ile buğday bitkisinin boyunun belirlenmesi.* Mediterranean Agricultural Sciences, 2021. **34**(2): p. 195-203.

26. Alptekin, A. and M. Yakar, *Lazer Tarayıcının Jeolojik Olayların Modellenmesinde Kullanımı.* Türkiye Lidar Dergisi, 2021. **3**(2): p. 71-75.

27. ERGİN, H. and İ. TÜRKMEN, *SAM ALANLARINDA BULUNAN FÜZE TİPLERİNİN DERİN SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI.*

28. Oruç, M.E. and A. Ulvi, *Maden sahalarındaki deformasyonların İHA'lar ile izlenmesi.* Türkiye Fotogrametri Dergisi, 2023. **5**(2): p. 43-57.

29. Ağca, M., N. Gültekin, and E. Kaya, *İnsansız hava aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin.* Geomatik, 2020. **5**(2): p. 134-145.

30. Ertuğrul, C., *Eski bir askeri sahada iha sistemleri kullanılarak patlamış ve patlamamış mühimmatların tespiti için havadan manyetik ile araştırılması= Aerial magnetic search for the detection of explosed and unexplosed munitions using uav systems in an old military field*. 2023, Sakarya Üniversitesi.

31. Fidancı, Y., *İnsansız hava araçlarının engebeli alanlardaki karayolu projelerinde kullanımı*. 2019, Konya Teknik Üniversitesi.

32. Seydanlıoğlu, A., *Belediye hizmetlerinde kullanılan harita üretimlerinin temel ölçütlerle kıyaslanması.* 2017.

33. Özdemir, H. and A. Akbaş, *Sayısal yükseklik modellerindeki mekânsal çözünürlük değişkenliğinin taşkın tehlike analizine etkileri.* Coğrafya Dergisi, 2023(46): p. 137-156.

34. ÖZKAN, M., *İHA TABANLI NDVI İLE MISIR BİTKİSİNİN VERİM TAHMİNİ*. 2023.

35. Aksoy, B., et al., *İnsansız Hava Araçları Kullanılarak Deforme Olmuş Karayolu Çizgilerinin Tespitinde Yapay Zekâ Yöntemlerinin Kullanılması.* Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2023. **9**(4): p. 211-219.

36. Karaköse, E. and M. Aksu, *İnsansız Hava Araçlarında Nokta Bulutu Verisi Kullanılarak İniş Pisti Uygunluk Analizi.* Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2024. **36**(2): p. 535-551.

37. Öztürk, T., *Toplum güvenliği ve kişisel mahremiyet için insansız hava aracı anomali tespiti*. 2024, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi.

38. Demircan, M., *İnsansız hava aracı sistemlerinde hata tespit yaklaşımları*. 2019, TOBB UNIVERSITY of Economics and Technology, Graduate School of Engineering ….

39. Kilic, I. and O. Yaman, *Akıllı Tarım İçin Yerel İkili Gauss Modeli (LBGP) Kullanarak Bitkilerin Destek Vektör Makinası (SVM) ile Sınıflandırılması Yöntemi Classification Method of Plants with Support Vector Machine (SVM) Using Local Binary Gaussian Model.*

40. Çömert, R., D.K. Matcı, and U. AVDAN, *YIKILMIŞ BİNALARIN NESNE TABANLI SINIFLANDIRMA İLE İNSANSIZ HAVA ARACI VERİLERİNDEN TESPİT EDİLMESİ.*

41. SEVİCİ, Ö.M., A.A. BİLGİN, and S. SERTTAŞ, *VTOL İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI VE ÜRETİMİ.*

42. Ay, B. and E. Namlı, *GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI İHA VE UYDU SİSTEMLERİ HİBRİT YAPAY ZEKÂ MODELİYLE KAÇAK YAPILARIN TESPİTİ.* Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi, 2017. **3**(2): p. 114-129.

43. Kabadayı, A. and M. Uysal, *İnsansiz hava araci ile elde edilen verilerden binalarin tespiti.* Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi, 2019. **1**(1): p. 8-14.

44. Candan, F., M.E. Sanci, and O. Al, *Insansız Hava Aracı ile Otonom Mayın Tarama: Pilot Çalısma Autonomous Mine Sweeping using Unmanned Aerial Vehicle: Pilot Study.*

45. Tercan, E., *Karayolu ölçmelerinde insansiz hava araçlarinin kullanilmasi: Okurcalar şehir merkezi örneği.* Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2018. **7**(2): p. 649-660.

46. Hacıoğlu, R., A. Altan, and K. Köksal, *Vektör Alan Kılavuzu Yöntemi ile Görsel Çizgi Takibi İçin İnsansız Hava Aracı Üzerindeki Yalpanın Model Öngörülü Denetimi.* Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2017. **7**(1): p. 218-227.

47. TABANLI, H.J.V.U.A. and Y. ÇALIŞMALARIN, *GSI JOURNALS SERIE C: ADVANCEMENTS IN INFORMATION SCIENCES AND TECHNOLOGIES.*

48. Elmas, E.E. and M. Alkan, *İnsansız Hava Araçlarıyla Hareketli Nesnelerin Tespit ve Takibi.* Gazi UNIVERSITY Journal of Science Part C: Design and Technology, 2022. **10**(4): p. 1111-1126.

49. Güler, Ö., *Uzaktan görüntüleme yöntemleri ile elde edilen sayısal yüzey modellerinin mermer madenciliğinde kullanımı*. 2019, Dokuz Eylul Universitesi (Turkey).

50. Yavuz, A., M. BEKTAŞ, and F. BULUT. *Akıllı İnsansız Hava Araçları (İHA) ile Bölge Tarama*. in *3rd International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'20)*. 2020.

HİPERSONİK FÜZE SİSTEMLERİ VE KARŞI ÖNLEMLER

Sacide TEKİN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Savunma Teknolojileri Bölümü, Selçuklu, Konya

(248268002003@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract – *Bu çalışma, son yıllarda askeri ve stratejik dengeleri kökten değiştiren hipersonik füze sistemlerini kapsamlı bir literatür taraması ile incelemektedir. Mach 5 üzeri hızlarda hareket edebilen bu sistemler, savunma mimarilerini aşabilen manevra kabiliyeti ve düşük algılanabilirlik gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Çalışmada; Çin, Rusya, ABD gibi büyük güçlerin hipersonik füze stratejileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmekte; Türkiye'nin bu alandaki teknik kapasitesi, ulusal vizyonu ve dış politika refleksleri değerlendirilmektedir. Ayrıca hipersonik silahların uluslararası hukuk, etik, dijital savaş teknolojileri, yapay zekâ entegrasyonu ve mühendislik altyapıları üzerindeki etkileri de ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Çalışma, hipersonik teknolojilerin sadece askeri değil, aynı zamanda diplomatik, teknolojik ve normatif sistemler üzerinde dönüştürücü etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.*

Keywords – Hipersonik Füze Sistemleri, Savunma Teknolojisi, Askerî Strateji, Caydırıcılık, Jeopolitik Rekabet, Yapay Zekâ, Türkiye Savunma Sanayii, Uluslararası Hukuk, ABD-Çin Rekabeti, NATO

1.Giriş

Hipersonik füze sistemleri, son yıllarda savunma teknolojileri alanında en hızlı gelişen ve en çok dikkat çeken konulardan biridir. Bu teknolojiler, sahip oldukları hız, manevra kabiliyeti ve düşük algılanabilirlik gibi özelliklerle mevcut güvenlik dengelerini sarsmakta ve yeni askeri stratejilere yön vermektedir. Bu literatür taraması, bu sistemlerin çok yönlü etkilerini ele almakta ve mevcut akademik birikimi tematik başlıklar altında düzenlemektedir.

2. Küresel Güç Rekabeti ve Jeopolitik Stratejiler

Hipersonik füze teknolojileri, büyük güç rekabetinin merkezine yerleşmiş ve stratejik denge anlayışını köklü biçimde değiştirmiştir. Bu başlık altında, bu silahların küresel düzeyde güç projeksiyonu ve bölgesel baskı aracı olarak nasıl kullanıldığı ele alınmaktadır.

Bu başlıkta değerlendirilen literatür, hipersonik silahların sadece askeri değil aynı zamanda diplomatik ve psikolojik etkiler yarattığını göstermektedir. Güçlü aktörlerin bu teknolojilere yönelmesi, küresel stratejik dengenin çok kutuplu bir yapıya evrilmesine neden olmaktadır.

2.1. Modern Seyir Füzeleri ve Küresel Yayılımı

Bu çalışma, modern seyir füzelerinin ortaya çıkışı ve yayılım sürecini tarihsel bağlamda ele almaktadır. ABD'nin Tomahawk tipi seyir füzeleriyle başlayan bu gelişim süreci, diğer aktörlerin benzer sistemleri geliştirmesiyle küresel bir silahlanma yarışına dönüşmüştür. Makalede özellikle İran gibi ülkelerin bu teknolojiyi elde etmesi ve vekil güçlere transfer etmesi, küresel güvenlik açısından ciddi riskler yaratmaktadır. Devlet dışı aktörlerin bu tür sofistike silah sistemlerine erişimi, deniz yolları güvenliğini tehdit etmekte ve mevcut uluslararası hukuk düzenini zorlamaktadır. Ayrıca makalede, bu füzelerin geleneksel silahlardan farklı olarak düşük radar izi, yüksek hassasiyet ve uzun menzil gibi özelliklerle ulus-devletlerin askeri stratejilerini nasıl dönüştürdüğü ayrıntılı şekilde incelenmiştir. [1]

2.2. Tukidides Tuzağı Çerçevesinde ABD-Çin Rekabeti: Güç Değişimi ve Savaş Riski

Bu makale, klasik uluslararası ilişkiler teorilerinden biri olan Tukidides Tuzağı'nı merkeze alarak ABD ve Çin arasında yaşanan güç mücadelesini açıklamaktadır. Çin'in yükselen ekonomik ve askeri gücü karşısında ABD'nin mevcut statükoyu koruma eğilimi, tarihsel örneklerle kıyaslanarak analiz edilmiştir. Makale, bu iki büyük gücün özellikle Güney Çin Denizi, Tayvan Boğazı, uzay ve siber güvenlik gibi alanlarda nasıl çatışma potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır. Tukidides Tuzağı bağlamında asıl tehdidin doğrudan savaştan çok, karşılıklı güvensizlik ve yanlış hesaplamalar olduğu vurgulanmaktadır. Çalışma, "önleyici saldırı" ve "kırmızı çizgi" stratejileri gibi taktiklerin bu iki ülkeyi istemeden bir çatışmaya sürükleyebileceği uyarısında bulunurken; aynı zamanda diyalog kanallarının açık tutulmasının stratejik istikrar açısından yaşamsal önemini savunmaktadır. [2]

2.3. Çin'in Hipersonik Füze Stratejisi: Askeri Caydırıcılık ve Güç Projeksiyonu

Bu çalışmada Çin Halk Cumhuriyeti'nin hipersonik füze programı, askeri stratejiler bağlamında kapsamlı olarak ele alınmıştır. Çin'in "DF-ZF" (Dong Feng-ZF) ve benzeri sistemleriyle geliştirdiği hipersonik yetenek, özellikle Tayvan Boğazı ve Güney Çin Denizi gibi gerilimli bölgelerde caydırıcılık oluşturma amacı taşımaktadır. Çin'in bu alandaki stratejisi, ABD'nin füze savunma sistemlerini bypass etme hedefiyle şekillenmekte; buna paralel olarak 'aktif savunma' ve 'ilk vuruş kapasitesi' gibi doktrinlere entegre edilmektedir. Makalede, hipersonik teknolojilerin Çin'in bölgesel güç projeksiyonu açısından kritik bir araç haline geldiği, özellikle deniz platformlarına entegre edilmesiyle bu silahların stratejik esnekliğinin arttığı ifade edilmiştir. Aynı zamanda Çin'in bu sistemleri "savaşsız savaş" konsepti çerçevesinde bir baskı aracı olarak kullandığı ve bu nedenle uluslararası güvenlik mimarisi üzerinde asimetrik etkiler yarattığı vurgulanmıştır. [3]

2.4. Rusya'nın Hipersonik Füze Kapasitesi: Avangard ve Kinzhal Sistemleri Üzerinden Analiz

Bu makale, Rusya Federasyonu'nun hipersonik silah sistemleri konusundaki teknik kapasitesini ve bu kapasitenin küresel güvenlik dengelerine etkilerini kapsamlı şekilde incelemektedir. "Avangard" planör sistemi ve "Kh-47M2 Kinzhal" füze sistemleri detaylı olarak analiz edilmekte, bu sistemlerin NATO'nun mevcut hava ve füze savunma mimarileri üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Makaleye göre Rusya, hipersonik silahları yalnızca teknolojik üstünlük sağlamak için değil, Batı'yı stratejik diyaloglara zorlamak için bir diplomatik koz olarak da kullanmaktadır. Ayrıca, Rusya'nın bu sistemleri nükleer başlık taşıma kapasitesiyle geliştirmesi, "dehşet dengesi"nin yeniden tanımlanmasına yol açmaktadır. Çalışma, bu silahların küresel caydırıcılık doktrinlerinde büyük bir kırılma yarattığını ve geleneksel nükleer stratejilere karşı ciddi bir meydan okuma oluşturduğunu savunmaktadır.[4]

2.5. ABD'nin Hipersonik Füze Geliştirme Programları: Konvansiyonel Küresel Saldırı Doktrini Bağlamında Değerlendirme

Bu makalede, ABD'nin hipersonik silah geliştirme programları "Prompt Global Strike" (PGS – Konvansiyonel Küresel Saldırı) doktrini çerçevesinde değerlendirilmiştir. ABD'nin bu doktrini, dünyanın herhangi bir noktasındaki stratejik hedefleri, bir saatten kısa sürede vurmayı hedefleyen yüksek hızlı konvansiyonel silah sistemleri ile hayata geçirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, ABD'nin bu alandaki teknolojik yatırımlarını (LRHW, AGM-183 ARRW, HAWC programları) ayrıntılarıyla ele almakta; programların teknik özellikleri, test başarımları ve bütçesel boyutlarını incelemektedir. Ayrıca ABD'nin hipersonik sistemleri nükleer yerine konvansiyonel amaçlarla kullanmayı planlaması, bu doktrinin kriz zamanlarında yanlış algılama riskini artırdığı için stratejik istikrarsızlık potansiyeli taşımaktadır. Makale, hipersonik teknolojilerin ABD dış politikasındaki "önleyici kapasite" anlayışını güçlendirdiğini ve bu durumun özellikle Çin ve Rusya gibi aktörleri tedirgin ettiğini vurgulamaktadır.[5]

2.6. Askerî Modernizasyon Sürecinde Hipersonik Füzelerin Rolü: Çin, Rusya ve ABD Karşılaştırması

Bu kapsamlı çalışma, hipersonik füzelerin büyük güçlerin askeri modernizasyon stratejilerindeki yerini karşılaştırmalı olarak incelemektedir. ABD, hipersonik sistemleri konvansiyonel küresel saldırı kapasitesi için geliştirirken; Rusya bu teknolojiyi nükleer caydırıcılık sistemlerine entegre etmeyi tercih etmektedir. Çin ise her iki yaklaşımı da içeren hibrit bir model benimseyerek, deniz kuvvetlerine entegre edilen hipersonik füzelerle bölgesel baskı kurmayı hedeflemektedir. Makalede, bu üç ülkenin modernizasyon stratejileri; savunma bütçeleri, teknolojik öncelikleri, stratejik tehdit algıları ve diplomatik refleksleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma, hipersonik teknolojilerin sadece teknik bir ilerleme değil, aynı zamanda güç projeksiyonunun yeniden tanımlanması anlamına geldiğini; klasik askeri üstünlüğün parametrelerini değiştirdiğini ileri sürmektedir.[6]

2.7. Hipersonik Füze Testlerinin Jeopolitik Yansımaları: Çin ve Hindistan Örnekleri

Bu çalışmada, Çin ve Hindistan'ın gerçekleştirdiği hipersonik füze testlerinin uluslararası sistemde oluşturduğu jeopolitik etkiler analiz edilmiştir. Çin'in test ettiği DF-ZF sistemi, Tayvan Boğazı ve Güney Çin Denizi'nde caydırıcılığı artırmaya yönelik görülürken, Hindistan'ın "HSTDV" testleri ise Pakistan ve Çin'e karşı denge arayışının bir parçası olarak yorumlanmaktadır. Makale, bu testlerin yalnızca askeri değil; diplomatik, ekonomik ve medya yansımalarıyla da uluslararası kamuoyunu etkilediğini vurgular. Özellikle Çin'in testlerinin ABD ve Japonya'da stratejik paniğe neden olması, bu tür gösterilerin psikolojik caydırıcılık fonksiyonu taşıdığını göstermektedir. Hindistan'ın testleri ise iç kamuoyunu konsolide etmeye ve küresel güç algısını güçlendirmeye yönelik bir araç olarak tanımlanmaktadır. Makale, hipersonik testlerin artık "stratejik sinyal verme" aracı olarak kullanıldığını ve bu durumun uluslararası krizleri tetikleyebileceğini ileri sürmektedir.[7]

2.8. **Hipersonik Füze Sistemleri Bağlamında Türkiye-Rusya-ABD Üçgeni: Stratejik İlişkiler, Rekabet ve Denge Arayışı**

Bu kapsamlı analiz, hipersonik füze teknolojilerinin gelişimi bağlamında Türkiye, Rusya ve ABD arasındaki stratejik ilişkileri, güvenlik politikalarını ve ittifak dinamiklerini üçlü bir perspektifle ele almaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde, ABD'nin küresel ölçekte yürüttüğü hipersonik silah yatırımları "Prompt Global Strike" gibi stratejilerle açıklanırken; bu stratejilerin NATO içinde nasıl yankı bulduğu ve Türkiye gibi müttefikleri nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. İkinci bölümde Rusya'nın "Avangard" ve "Kinzhal" gibi sistemler üzerinden yürüttüğü agresif savunma stratejileri, hem NATO'nun doğu kanadındaki baskıyı artırmak hem de Avrupa üzerindeki nüfuzu korumak için tasarlandığı belirtilmektedir.

Çalışmanın en dikkat çeken bölümü ise Türkiye'nin bu iki kutup arasında izlemeye çalıştığı denge siyaseti üzerine odaklanmaktadır. Türkiye, bir yandan NATO üyesi olarak Batı savunma sistemleriyle entegrasyon hedefi güderken; öte yandan S-400 hava savunma sistemi alımıyla Rusya ile askeri iş birliğini çeşitlendirmiştir. Bu durum, Türkiye'nin hipersonik savunma sistemlerine yönelik potansiyel yöneliminin yalnızca teknik değil, aynı zamanda jeopolitik olarak da çok boyutlu bir karar alanı olduğunu göstermektedir. Makale, Türkiye'nin hem NATO içindeki pozisyonunu koruması hem de bölgesel özerkliğini artırması için hipersonik teknolojilere özgün ve milli bir yaklaşım geliştirmesi gerektiğini savunmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, hipersonik sistemlerin sadece askeri değil, aynı zamanda diplomatik ilişki yönetimi, ittifak uyumu ve uluslararası itibar açısından stratejik bir kaldıraç haline geldiğini ortaya koymaktadır.[8]

3. Türkiye'nin Savunma Politikaları ve Ulusal Vizyonu

Türkiye'nin hipersonik füze sistemlerine yönelik stratejik ilgisi, dış politika dengeleri, bölgesel güvenlik ihtiyaçları ve yerli savunma sanayii politikaları çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Literatür, Türkiye'nin savunma kapasitesini artırma çabasının teknik yeterlilikten öte bir siyasi stratejiye dönüştüğünü ortaya koymaktadır. Yerli üretim çabaları ve çok yönlü dış politika tercihleri, bu süreçte kritik rol oynamaktadır.

3.1. İncirlik Üssü ve ABD'nin Alternatif Üs Arayışı

İncirlik Üssü'nün ABD açısından tarihi ve stratejik değeri, bu makalede detaylı biçimde ele alınmaktadır. İkinci Dünya Savaşı sonrası ABD'nin denizaşırı üs politikası kapsamında kurulan İncirlik, Soğuk Savaş boyunca önemli bir askeri ve lojistik üs olarak kullanılmıştır. Ancak günümüzde Türkiye ile ABD arasında yaşanan diplomatik gerilimler, bu üssün geleceği konusunda çeşitli belirsizlikleri gündeme getirmiştir. Makale, ABD'nin İncirlik'e alternatif olarak düşündüğü Romanya, Yunanistan ve Körfez ülkelerindeki üs imkanlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmekte ve İncirlik'in stratejik önemini yeniden konumlandırmaktadır. Ayrıca, NATO içindeki güç dengesinin değişimi ve Türkiye'nin savunma politikalarındaki dönüşüm, bu değerlendirmeyi etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır.[9]

3.2. NATO ve ABD'nin Üs Politikalarında Dönüşüm: İncirlik Örneği Üzerinden Stratejik Yeniden Yapılanma

Bu çalışma, ABD'nin denizaşırı üs stratejisindeki dönüşümü, özellikle Türkiye'deki İncirlik Üssü üzerinden irdelemektedir. Makalede, ABD'nin bu üssü kullanma konusundaki politikalarının, hem küresel askeri stratejileri hem de Türkiye ile olan ikili ilişkileri açısından nasıl şekillendiği analiz edilmiştir. İncirlik'in, NATO'nun güneydoğu kanadında yer alması ve Ortadoğu'daki operasyonlar açısından taşıdığı lojistik önemi vurgulanırken, Türkiye'nin bölgesel stratejik özerklik talepleri bu işbirliğini zorlaştırmaktadır. ABD'nin alternatif üs arayışları (Yunanistan'daki Dedeağaç, Romanya'daki Mihail Kogălniceanu Üssü vb.) değerlendirildiğinde, Washington'un İncirlik'e duyduğu bağlılığın azaldığı; ancak bu üssün hâlâ vazgeçilmez nitelikte olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Makale, çok taraflı güvenlik mimarisinin değişen dengelerine ışık tutmaktadır.[10]

3.3. Türkiye'nin Balistik Füze Programı: Stratejik Caydırıcılık ve Bölgesel Güvenlik Perspektifi

Bu makale, Türkiye'nin uzun menzilli balistik füze geliştirme girişimlerini, bölgesel caydırıcılık ekseninde ele almaktadır. 2012'den itibaren ivme kazanan bu çabalar, savunma sanayii kapasitesi, ulusal güvenlik hedefleri ve dış politika vizyonuyla bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir. 800 km menzil hedefiyle tanımlanan programın, Türkiye'yi savunmadan öte "etki alanı kuran" bir aktör haline getirmeyi amaçladığı vurgulanmıştır. Ayrıca bu teknolojinin geliştirilmesinin sadece askeri değil, politik ve diplomatik sonuçları da olduğu belirtilmiştir. NATO üyeliği, Füze Teknolojisi Kontrol Rejimi (FTKR) ve bölgesel ittifaklar bağlamında bu girişimlerin yarattığı jeopolitik gerilimlere dikkat çekilmiş; Türkiye'nin füze teknolojileri alanında stratejik özerklik arayışına yöneldiği savunulmuştur.[11]

3.4. Türkiye'nin Hipersonik Füze Yetkinliği: Teknik Olanaklar ve Stratejik Hedefler

Bu makale, Türkiye'nin hipersonik füze sistemleri alanındaki mevcut kabiliyetlerini, teknolojik gelişmişlik düzeyini ve stratejik hedeflerini kapsamlı şekilde analiz etmektedir. Türkiye'nin savunma sanayiinde son yıllarda hızlanan yerli üretim girişimleri kapsamında hipersonik teknolojilerin nasıl bir gelecek vizyonuna sahip olduğu değerlendirilmiştir. TÜBİTAK SAGE, Roketsan ve Savunma Sanayi Başkanlığı gibi kurumların Ar-Ge faaliyetleri çerçevesinde geliştirilen prototipler, test altyapıları ve tahrik sistemlerine dair mevcut gelişmeler aktarılmıştır. Çalışmada ayrıca, Türkiye'nin hipersonik füze üretiminde karşılaştığı temel sorunlar (malzeme bilimi, ısı kalkanı teknolojisi, aviyonik entegrasyon vb.) teknik detaylarla ortaya konmuş, bu teknolojilerin yalnızca askeri caydırıcılık değil, aynı zamanda bölgesel liderlik açısından sembolik bir değer taşıdığı vurgulanmıştır. Sonuç olarak, Türkiye'nin hipersonik alanda henüz başlangıç aşamasında olduğu ancak bu alandaki stratejik vizyonunun yüksek olduğu değerlendirilmiştir.[12]

3.5. Türk Savunma Sanayisinin Hipersonik Silahlar Bağlamında Konumlanması: SWOT Analizi Temelli Bir Yaklaşım

Bu çalışmada, Türkiye'nin savunma sanayisinin hipersonik silahlar çerçevesindeki potansiyeli SWOT (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler) analizi yöntemiyle incelenmiştir. Güçlü yönler arasında; son on yılda kurumsal altyapının güçlenmesi, Roketsan ve TÜBİTAK SAGE gibi kurumların proje yürütme kapasitesi ve kamu desteği öne çıkarken; zayıf yönler olarak malzeme bilimi, yüksek hızlı aerodinamik test altyapısı ve uzman insan kaynağı eksikliği vurgulanmaktadır. Fırsatlar bölümünde, küresel pazarda artan hipersonik sistem ihtiyacı ve NATO'nun doğu kanadındaki yeni güvenlik tehditleriyle Türkiye'nin stratejik öneminin artması dikkat çekmektedir. Tehditler arasında ise, teknoloji ambargoları, dışa bağımlılık ve kontrol rejimlerinin kısıtlayıcı etkileri gösterilmiştir. Makale, Türkiye'nin bu alandaki hedeflerini sürdürülebilir kılmak için özgün mühendislik çözümleri ve uluslararası işbirliklerine ihtiyaç duyduğunu belirtmektedir.[13]

4. Caydırıcılık Doktrinleri ve Güvenlik Teorileri

Hipersonik füzeler, caydırıcılık paradigmasını yeniden şekillendirmekte, hem nükleer hem de konvansiyonel askeri dengeleri yeniden tanımlamaktadır. Bu başlık altında teorik yaklaşımlar ve savunma stratejileri incelenmektedir.

Bu başlıktaki çalışmalar, hipersonik sistemlerin hızlı karar alma süreçlerini tetiklemesi nedeniyle mevcut caydırıcılık modellerini geçersiz kılabileceğini savunmaktadır. Güvenlik teorileri artık daha yüksek tempolu, daha karmaşık tehditlere karşı yeniden inşa edilmelidir.

4.1. Stratejik Konseptler Bağlamında NATO ve 2022 Stratejik Konsepti

Bu makalede, NATO'nun kurulduğu günden 2022 yılına kadar geliştirdiği stratejik konseptler tarihsel bir perspektifle ele alınmış ve örgütün güvenlik anlayışındaki evrim kapsamlı bir biçimde değerlendirilmiştir. NATO'nun 2022 Stratejik Konsepti, ittifakın değişen uluslararası düzene nasıl yanıt verdiğini, özellikle Rusya ve Çin gibi aktörlerin tehdit algısında nasıl konumlandığını göstermektedir. Çalışma, NATO'nun bu belgeyle tehditleri tanımlamada ve caydırıcılık sağlamada ne kadar başarılı olduğu konusunda eleştirel bir tutum sergilemektedir. Ayrıca, 2010 Stratejik Konsepti ile karşılaştırmalı analiz yapılarak, örgütün retorikten eyleme geçme kabiliyeti sorgulanmıştır. NATO'nun yeni konseptinin somut çözüm önerileri sunmaktan çok, mevcut güvenlik ortamını betimlemeye yönelik bir belge niteliği taşıdığı sonucuna varılmıştır.[14]

4.2. NATO'nun Arktik Stratejisi ve Yeni Soğuk Savaş Parametreleri

Bu makalede, Kuzey Kutbu'nun (Arktik) giderek artan jeopolitik önemi ve NATO'nun bu bölgeye yönelik stratejileri ele alınmaktadır. Küresel ısınmanın etkisiyle Arktik bölgesindeki buzulların erimesi yeni deniz ticaret yollarının ve enerji rezervlerinin ortaya çıkmasına neden olurken, Rusya'nın bölgedeki askeri faaliyetlerini artırması NATO'nun bölgeye olan ilgisini yeniden gündeme getirmiştir. Çalışma, Arktik bölgesinin yalnızca çevresel değil, stratejik bir savaş alanı haline gelmekte olduğunu savunmaktadır. NATO'nun Norveç, Kanada ve yeni üyeler üzerinden bölgeye yönelik savunma kapasitesi artırılmaya çalışılsa da henüz bu alanda bir birlik doktrini oluşturulamamıştır. Arktik'in gelecekte büyük güç rekabetinin yeni cephesi haline gelmesi muhtemeldir. Bu bağlamda, NATO'nun askeri varlığını artırırken aynı zamanda çevresel hassasiyetleri de gözetmesi gerektiği vurgulanmaktadır.[15]

4.3. Konvansiyonel ve Nükleer Caydırıcılıkta Hipersonik Füzelerin Yeri: Stratejik Denge Tartışmaları

Bu çalışma, hipersonik füze teknolojilerinin hem konvansiyonel hem de nükleer caydırıcılık doktrinleri üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Konvansiyonel başlık taşıyan hipersonik silahların yüksek isabet kabiliyeti ve reaksiyon süresinin düşüklüğü, bunların klasik füze sistemlerine kıyasla çok daha etkin bir saldırı aracı haline gelmesini

sağlamaktadır. Ancak bu yüksek hız ve düşük tepki süresi, saldırıya uğrayan ülkenin tehdidin niteliğini ayırt edememesi riskini doğurarak yanlış hesaplamalara ve potansiyel nükleer misillemelere neden olabilir. Makalede, özellikle Rusya-ABD arasında oluşabilecek kriz senaryolarında hipersonik füzelerin nükleer çatışmaya neden olabilecek bir tetikleyici olarak değerlendirildiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın temel önerisi; konvansiyonel hipersonik silahların kullanımına dair şeffaflık, önceden uyarı sistemlerinin güçlendirilmesi ve silahların niteliklerinin uluslararası denetime açık hale getirilmesidir.[16]

4.4. Avrupa'nın Hipersonik Füze Yarışındaki Konumu: Teknolojik Kapasite ve Stratejik Açmazlar

Bu makalede, Avrupa Birliği üyesi ülkelerin ve NATO müttefiklerinin hipersonik silah teknolojisi geliştirme sürecinde karşılaştıkları zorluklar ve stratejik ikilemler incelenmektedir. Almanya, Fransa ve İngiltere'nin ayrı ayrı yürüttüğü hipersonik projeler; ortak üretim eksiklikleri, Ar-Ge yatırımlarının parçalanmışlığı ve siyasi uyumsuzluklar nedeniyle sınırlı ilerleme kaydetmiştir. Çalışma, Avrupa'nın ABD ve Çin gibi büyük aktörlere kıyasla ciddi bir teknoloji ve hız farkı yaşadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca Avrupa'nın hipersonik füzelere yönelik savunma sistemleri konusundaki hazırlıksızlığı, kıtanın güvenlik mimarisinde stratejik boşluklar yaratmaktadır. Makale, AB savunma ajansının ortak bir hipersonik savunma stratejisi oluşturması ve Fransa-Almanya-İtalya gibi ana aktörlerin daha entegre bir üretim politikası yürütmesi gerektiğini ileri sürmektedir.[17]

4.5. Hipersonik Silahların Yayılma Riski ve Silah Kontrol Rejimlerine Etkisi

Bu makale, hipersonik silahların yayılma potansiyelini ve mevcut silah kontrol rejimlerine etkisini çok boyutlu biçimde analiz etmektedir. Nükleer ve konvansiyonel kapasitede kullanılabilen bu sistemlerin, teknoloji transferi yoluyla özellikle orta ölçekli devletlerin erişimine açılma riski vurgulanmaktadır. Mevcut rejimler —özellikle Füze Teknolojisi Kontrol Rejimi (MTCR)— hipersonik sistemlerin özgün yapısı ve çift kullanımlı teknolojisi nedeniyle bu tehditleri kapsam dışı bırakmakta ya da yetersiz kalmaktadır. Makale, hipersonik silahların yayılması halinde caydırıcılık dengesinin bozulabileceğini, özellikle kriz anlarında yanlış alarm riskinin küresel çatışma ihtimalini artıracağını savunmaktadır. Sonuç olarak, yazarlar bu sistemlerin üretimi, test edilmesi ve ihracatına dair yeni, bağlayıcı ve teknik temelli bir uluslararası rejimin oluşturulması gerektiğini ileri sürmektedir.[18]

5. Hipersonik Teknolojilerin Mühendislik ve Fiziksel Altyapısı

Hipersonik sistemlerin teknik temelini oluşturan aerodinamik, itki ve ısıl koruma sistemleri bu başlık altında mühendislik düzeyinde ele alınmaktadır.

Literatür, bu teknolojilerin gelişiminin yalnızca stratejik değil, aynı zamanda ciddi mühendislik ve bilimsel Ar-Ge gerektirdiğini vurgulamaktadır. Ülkelerin bu sistemleri geliştirme kabiliyeti doğrudan bilimsel altyapılarıyla ilişkilidir.

5.1. Uzayda Askerî Rekabet ve A2/AD Stratejileri

Bu makale, uzay alanındaki askeri rekabeti ve Anti-Access/Area Denial (A2/AD) stratejilerinin gelişimini analiz etmektedir. ABD'nin Uzay Kuvvetleri Komutanlığı ve Rusya'nın Aerospace Power yapılanması gibi örnekler üzerinden, büyük güçlerin uzay alanında egemenlik kurma çabaları ortaya konmuştur. Uzay temelli radarlar, uydu haberleşme sistemleri ve hipersonik savunma unsurlarının entegrasyonu ile bu alandaki teknolojik üstünlüğün, hem konvansiyonel hem de nükleer savaşlarda belirleyici olacağı vurgulanmaktadır. A2/AD doktrinleri kapsamında, düşman kuvvetlerin belirli bölgelere erişimini engelleme stratejileri uzay sistemleriyle desteklenmektedir. Bu durumun, askeri stratejilerin doğasını değiştirdiği ve askeri üstünlüğün artık sadece karada ya da havada değil, uzayda da sağlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.[19]

5.2. Otonom Silah Sistemleri ve Savaş Alanındaki Rolü: 2040 Vizyonu

Bu makale, otonom silah sistemlerinin savaş alanlarındaki dönüşüm gücünü ve 2040 yılına kadar bu sistemlerin askeri doktrinlere nasıl entegre edileceğini irdelemektedir. Makalede, insansız hava araçlarından robot tanklara, yapay zekâ destekli komuta merkezlerinden kendini yeniden yapılandırabilen yazılımlara kadar uzanan geniş bir teknoloji spektrumu değerlendirilmiştir. Özellikle bu sistemlerin karar verme mekanizmalarındaki otonomluğu, insan denetiminden uzaklaşmanın doğurabileceği etik ve stratejik sorunlarla birlikte tartışılmıştır. Ayrıca bu teknolojilerin yalnızca çatışma anında değil, barış zamanı görevlerinde (gözetleme, devriye, siber savunma) de kullanılabileceği vurgulanmaktadır. 2040 senaryolarına göre, devletler arasında otonom silah yarışı hızla büyürken, silah sistemlerinin yazılım üzerinden saldırıya uğraması ihtimali de "siber silahsızlanma" gibi yeni güvenlik kavramlarını zorunlu kılacaktır.[20]

5.3. Hipersonik Silah Sistemlerinin Fiziksel Temelleri ve Teknolojik Zorlukları

Bu teknik odaklı makale, hipersonik füze sistemlerinin temel fiziksel ilkelerini, aerodinamik yapılarını, ısıl koruma sistemlerini ve tahrik teknolojilerini ayrıntılı biçimde incelemektedir. Mach 5 ve üzeri hızlarda seyahat eden bu sistemlerin karşılaştığı aerotermal zorluklar, hipersonik uçuş fiziği bağlamında analiz edilmiştir. Özellikle scramjet motor teknolojisi, süpersonik yanma prensipleri ve yüksek sıcaklık mukavemetli malzemelerin kullanımı gibi teknik başlıklar, mühendislik temelli bir perspektifle sunulmuştur. Ayrıca, mevcut savunma sistemlerinin hipersonik silahları durdurmadaki yetersizliği bilimsel verilerle desteklenmiş; kinetik enerjili önleme sistemlerinin ve yeni nesil radar teknolojilerinin yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Bu bağlamda makale, hem teorik altyapı hem de savunma mühendisliği açısından hipersonik teknolojilerin ne denli karmaşık ve maliyetli bir alan olduğunu vurgulamaktadır.[21]

6. Yapay Zekâ ve Dijital Savaş Teknolojileri

Yapay zekâ ve dijital sistemler, hipersonik silahların yönlendirilmesinden komuta kontrol altyapılarına kadar çok sayıda alanda dönüştürücü rol oynamaktadır. Bu başlık, bu yeni nesil teknolojilerin entegrasyonuna odaklanmaktadır.

Bu çalışmalar, savaş ortamında insan kararının yerini kısmen yapay zekânın aldığı bir çağın başladığını ortaya koymaktadır. Özellikle veri işleme, otonom yönlendirme ve gerçek zamanlı tepki mekanizmaları, yeni dijital savaş paradigmasını tanımlamaktadır.

6.1. Savaşın Evrimi: Yapay Zekâlı Askeri Stratejiler ve "Akıllı Savaş" Kavramı

Bu tez niteliğindeki kapsamlı çalışma, savaşın tarihsel evrimini Soğuk Savaş dönemi ve "akıllı savaş" dönemi üzerinden incelemektedir. Soğuk Savaş döneminde teknolojinin belirleyici rolüne dikkat çeken çalışma, günümüzde yapay zekâ ve robotik teknolojilerle şekillenen savaş biçimlerini "akıllı savaş" kavramı çerçevesinde analiz etmektedir. ABD ve Çin örnekleri üzerinden hipersonik silahlar, savaş robotları, İHA/SİHA'lar, radar sistemleri gibi teknolojilerin savaş doktrinlerindeki etkisi derinlemesine incelenmiştir. Ayrıca yapay zekâ destekli karar destek sistemlerinin, askeri komuta yapısını nasıl değiştirdiği ve bu durumun etik, hukuki ve stratejik sonuçları sorgulanmaktadır. Çalışma, teknoloji ve savaş ilişkisini tarihsel süreklilik içerisinde ele alarak gelecekteki muhtemel askeri dönüşümleri öngörmeye çalışmaktadır.[22]

6.2. Literatür Taramasına Dayalı Akıllı Savaş ve Yapay Zekâ Etkileşimi: ABD ve Çin Karşılaştırması

Bu derinlikli analiz, "akıllı savaş" konseptini literatürdeki diğer savaş biçimleriyle karşılaştırmakta ve özellikle yapay zekâ, otonom sistemler ve veri merkezli askeri karar süreçleri açısından irdelemektedir. ABD ve Çin'in yapay zekâ yatırımları; askeri bütçeleri, teknoloji politikaları ve savunma sanayii stratejileri üzerinden karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. ABD'nin insan-makine ortak çalışmasına dayalı "centaur warfare" yaklaşımı ile Çin'in tümüyle otonomlaşmış sistem vizyonu arasındaki farklar ortaya konmuştur. Bu karşılaştırma, gelecekteki savaş doktrinlerinin yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda kültürel ve ideolojik olarak da farklılaşacağını göstermektedir. Makale, teknolojik gelişmelerin klasik savaş teorilerini nasıl dönüştürdüğünü ortaya koyarken; aynı zamanda yeni etik, hukuki ve operasyonel sorunları da gündeme getirmektedir.[23]

6.3 Yapay Zekâ Destekli Hipersonik Füze Sistemleri: Algoritma Tabanlı Tehdit Değerlendirme

Bu ileri düzey teknik makale, hipersonik silah sistemlerinde yapay zekâ kullanımını, özellikle hedef tespiti, rota optimizasyonu ve gerçek zamanlı veri işleme bağlamında ele almaktadır. Makale, füze sistemlerinin manevra kabiliyeti ve saldırı rotalarının değişkenliği nedeniyle geleneksel kontrol sistemlerinin yetersiz kaldığını, bu açığın yapay zekâ algoritmalarıyla kapatılabileceğini savunmaktadır. Örnek olarak, düşman hava savunma sistemlerini analiz eden ve optimal saldırı penceresini hesaplayan sinir ağı modelleri sunulmuştur. Ayrıca hedefin dinamik konum değişikliklerine göre rotasını gerçek zamanlı olarak yeniden oluşturan adaptif algoritmalar, sistemlerin otonom kabiliyetlerini artırmaktadır. Bu bağlamda, hipersonik füze sistemlerinin sadece kinetik değil, yazılımsal olarak da silah haline geldiği; siber saldırılar, GPS yanıltmaları ve elektromanyetik müdahalelere karşı dirençli yapılar geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.[24]

6.4. **Hipersonik Silahların Operasyonel Entegrasyonu: Komuta-Kontrol Sistemlerine Etkisi**

Bu makale, hipersonik füze sistemlerinin mevcut komuta-kontrol (C2) yapıları üzerindeki etkisini ve bu sistemlerin ordu organizasyonlarına nasıl entegre edilebileceğini analiz etmektedir. Hipersonik silahların çok kısa sürede hedefe ulaşması, C2 sistemlerinin daha önceden tanımlı karar zincirlerinden çıkmasını, daha hızlı, merkezsiz ve algoritmik tabanlı karar alma yapılarının inşa edilmesini zorunlu kılmaktadır. Çalışma, bu yeni komuta sistemlerinin yapay zekâ ile desteklenmiş, yüksek bant genişliğine sahip, düşük gecikmeli haberleşme altyapılarına ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca C2 sistemlerinde "kill chain" sürecinin (hedef tespiti, karar verme, angajman) yeniden tasarlandığı ve geleneksel hiyerarşik yapılardan çok, modüler ve esnek sistemlerin öne çıktığı ifade edilmektedir. Bu bağlamda hipersonik füze teknolojisinin, yalnızca taktik bir avantaj değil; aynı zamanda stratejik organizasyon dönüşümünü de beraberinde getirdiği vurgulanmaktadır.[25]

7. Uluslararası Hukuk, Etik ve Devlet Dışı Aktörler

Hipersonik silahlar, uluslararası hukuk normlarını zorlamakta; savaş hukuku, ayrım ilkesi ve devlet-dışı aktörlerin rolü gibi alanlarda belirsizlik yaratmaktadır.

Bu literatür, mevcut uluslararası hukuk düzeninin hipersonik teknolojilere cevap veremediğini ve yeni bağlayıcı mekanizmalara ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca devlet dışı aktörlerin erişimi, küresel güvenliği daha da karmaşık hale getirmektedir.

7.1. Gelişmekte Olan Devletler İçin Uzay Politikası: Türkiye, Brezilya ve Çin Örneği

Bu makale, gelişmekte olan ülkelerin uzay politikalarını ve bu alandaki ulusal güvenlik hedeflerini karşılaştırmalı olarak ele almaktadır. Türkiye, Brezilya ve Çin'in uzay alanında attığı adımlar; kurumsal yapılanma, teknoloji transferi, yerli üretim ve stratejik vizyon açısından değerlendirilmektedir. Çin'in agresif ve devlet merkezli uzay stratejisi, Brezilya'nın bölgesel liderlik hedefleri ve Türkiye'nin henüz olgunlaşma sürecindeki projeleri

detaylandırılmıştır. Çalışma, uzay teknolojilerine erişimin artık yalnızca büyük güçlere özgü olmadığını, gelişmekte olan ülkelerin de hem sivil hem de askeri amaçlarla bu alanda rol üstlenebileceğini ortaya koymaktadır. Bu durumun uluslararası sistemde güç dengelerini değiştirebilecek potansiyel taşıdığı vurgulanmakta ve gelişen teknolojilerle uzayın gelecekteki çatışma alanı olabileceği öngörülmektedir.[26]

7.2. Füze Teknolojisi Kontrol Rejimi (FTKR) Kapsamında Seyir ve Balistik Füze İhracatı

Bu makale, Füze Teknolojisi Kontrol Rejimi'nin (MTCR – FTKR) küresel silah ihracatını nasıl şekillendirdiğini ele almaktadır. Balistik füzeler ve seyir füzeleri arasındaki teknik farklar, hedeflenen menzil ve başlık kapasitesi üzerinden detaylandırılmıştır. Özellikle FTKR'nin 1. ve 2. Kategori silah ayrımları üzerinden devletlerin teknoloji transferine dair sorumlulukları irdelenmiştir. Makalede, gelişmekte olan ülkelerin bu rejime taraf olsalar dahi kendi silah ihracatlarını sınırlama noktasında karşılaştıkları zorluklar açıklanmış; bu durumun rejimin etkinliğini nasıl tartışmalı hale getirdiği eleştirel bir bakış açısıyla sunulmuştur. Ayrıca İran, Hindistan ve Çin gibi ülkelerin FTKR'ye yönelik stratejik duruşları da karşılaştırmalı olarak ele alınarak, küresel silah kontrol rejimlerinin geleceği sorgulanmıştır.[27]

7.3. Devlet Dışı Aktörlerin Füze Kullanımı: İran ve Vekil Güçler Üzerinden Tehdit Değerlendirmesi

Bu çalışma, devlet dışı aktörlerin sofistike füze sistemlerine erişimi konusunu odak noktasına alarak, özellikle İran'ın vekil güçler üzerinden yürüttüğü füze stratejisini analiz etmektedir. Hizbullah, Husiler ve Haşdi Şabi gibi İran destekli yapıların gemisavar ve seyir füzeleri gibi kompleks silah sistemlerine erişimi, devletlerarası dengeleri doğrudan etkileyen bir tehdit unsuru olarak ele alınmıştır. Makalede, bu yapıların devlet kontrolü dışında kalmaları nedeniyle klasik caydırıcılık mekanizmalarının işlevsizleştiği, bu durumun da Orta Doğu'da istikrarsızlığı artırdığı savunulmaktadır. Ayrıca, bu aktörlerin füzeleri kullanarak petrol altyapılarını, ticaret gemilerini ve sivil hedefleri vurma potansiyelleri, küresel enerji güvenliği açısından ciddi riskler doğurmaktadır. Çalışma, devlet dışı aktörlerin silahlandırılmasının sadece bir güvenlik tehdidi değil, aynı zamanda uluslararası hukuk açısından da çözülmemiş bir sorun olduğunu ortaya koymaktadır.[28]

7.4. Hipersonik Silahların Hukuki Statüsü: Uluslararası Hukuk ve Savaş Hukuku Bağlamında Bir Değerlendirme

Bu çalışmada hipersonik silahların uluslararası hukuk çerçevesindeki konumu, özellikle savaş hukuku, insan hakları hukuku ve silah kontrol rejimleri bağlamında irdelenmektedir. Hipersonik füzelerin yüksek hız ve isabet oranı, silahlı çatışmalarda "orantılılık" ve "ayrım gözetme" ilkeleri açısından tartışmalı hale gelmesine neden olmaktadır. Makaleye göre, bu silahların klasik füzelere kıyasla hedef tespiti ve angajman süreçlerinde çok daha kısa sürede harekete geçmesi, sivil-asker ayrımını gözetme yükümlülüğünü teknik olarak zorlaştırabilir. Ayrıca hipersonik silahlar, şu anki silah kontrol rejimlerinin çoğunun (FTKR, NPT, CWC gibi) kapsamı dışında kalmaktadır. Bu durum uluslararası hukukun söz konusu teknolojilere nasıl uyarlanabileceği tartışmalarını gündeme getirmiştir. Makale, bu alanda yeni bağlayıcı normların ve denetim mekanizmalarının geliştirilmesi gerektiğini savunmaktadır.[29]

8. Savunma Sistemleri, Testler ve Operasyonel Entegrasyon

Hipersonik tehdide karşı savunma sistemlerinin geliştirilmesi, askeri testler ve operasyonel planlamaya entegrasyon bu başlık altında ele alınmaktadır.

İncelenen literatür, savunma sistemlerinin hipersonik tehdide karşı hazırlıksız olduğunu açıkça göstermektedir. Yeni nesil radarlar, önleme teknolojileri ve hızlı karar destek sistemleri geliştirilmedikçe bu tehdidin dengelenmesi mümkün görünmemektedir.

8.1. COVID-19 Pandemisinin Küresel Askeri Harcamalara Etkisi: SIPRI Verileri Işığında Bir Analiz

Bu çalışmada, COVID-19 pandemisinin küresel askeri harcamalar üzerindeki etkisi Stockholm Uluslararası Barış Araştırmaları Enstitüsü (SIPRI) verileri ışığında analiz edilmiştir. Pandemi döneminde ekonomik daralmalara rağmen birçok ülkenin askeri harcamalarında artış eğilimini sürdürmesi, "güvenlik harcamalarının esnekliği" şeklinde kavramsallaştırılmıştır. Özellikle ABD, Çin, Hindistan ve Rusya gibi büyük aktörlerin savunma bütçelerinde ciddi bir kesinti yapmaması, güvenlik stratejilerinin ekonomi politikaları üzerinde nasıl öncelikli olduğunu göstermektedir. Gelişmekte olan ülkelerde ise savunma harcamalarının daha çok iç güvenlik, sınır savunması ve sağlık sektörüne paralel sivil-asker işbirliği projelerine yönlendirildiği belirtilmiştir. Bu durumun uzun vadede, hibrit tehditlere karşı daha entegre güvenlik politikaları oluşturma zorunluluğu doğuracağı ifade edilmektedir.[30]

8.2. Hipersonik Füzelere Karşı Savunma Sistemleri: Yetersizlikler, Yenilikler ve Gelecek Senaryoları

Bu makalede, hipersonik füze sistemlerine karşı mevcut savunma sistemlerinin yetersizliği ve bu açığı kapatmaya yönelik geliştirilmekte olan teknolojiler değerlendirilmiştir. Halihazırda kullanılan balistik füze savunma sistemleri (ör. THAAD, Patriot, S-400) hipersonik füzelerin manevra kabiliyeti, alçak irtifa seyri ve yüksek hızına karşı etkisiz kalmaktadır. Çalışma, özellikle "glide vehicle" tipi planörlerin önlenememesi sorununu vurgulayarak, klasik radar sistemlerinin hipersonik hedefleri algılamada yaşadığı gecikmeyi teknik verilerle açıklamaktadır. Ayrıca ABD'nin GPI, Glide Breaker gibi yeni projeleri, Çin'in hipersonik karşı radar sistemleri ve Avrupa'nın lazer temelli önleme teknolojileri örneklenmiştir. Makale, etkili bir hipersonik savunma mimarisinin sadece füze değil; erken uyarı uyduları, yapay zekâ destekli veri işleme ve hava-uzay radarlarının bütünleşik şekilde çalıştığı yeni nesil bir sistem gerektirdiğini ileri sürmektedir.[31]

9.Sonuç

Bu literatür taraması, hipersonik füze sistemlerinin sadece askeri değil; diplomatik, teknolojik, etik ve hukuki alanlarda da çok yönlü sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Literatür, gelecekteki savaşların doğasının değişeceğini ve bu değişimin yalnızca büyük güçleri değil, tüm devletleri ve uluslararası düzeni etkileyeceğini ortaya koymaktadır. Tüm bu gelişmeler karşısında, savunma planlayıcılarının ve karar vericilerin sadece silah sistemleri değil, bilgi sistemleri, hukuk altyapısı ve diplomatik kanalları da eşzamanlı olarak yeniden yapılandırması gerekmektedir.

10.KAYNAKLAR

1. Alım, E., *Hipersonik Füzeler ve Stratejik İstikrar: Rusya-ABD İlişkileri Üzerine Bir İnceleme.* Savunma Bilimleri Dergisi, 2021(39): p. 137-177.
2. Öz, O., *Soğuk Savaştan Akıllı Savaşa Geçiş Sürecinde Yapay Zekâ Teknolojilerinin Rolü: Çin ve ABD Örnekleri*. 2023, Kapadokya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü.
3. Kiriktaş, A., *Asya-Pasifik'te Çin'in Füze Stratejisi ve Küresel Dengeler.* Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 2025. **10**(1): p. 1-23.
4. Şahin, E. and M.S.Ö. Özcan, *Bölgesel Güvenlik Kompleksi Bağlamında Artan Arktik Rekabeti ve Askeri Güvenlik.* Paradigma: İktisadi ve İdari Araştırmalar Dergisi. **13**(Özel Sayı): p. 90-111.
5. Altıntaş, N. and E. Önder, *CUMHURİYETİN YÜZÜNCÜ YILINDA TÜRKİYE İÇİN NÜKLEER GÜÇ OLMA İHTİYACININ ANALİZİ.* Avrasya Dosyası, 2024. **14**(2): p. 14-61.
6. İpekçi, İ., A. Soydemir, and A. Erciyas, *NATO'nun 2030 vizyonu.* İstanbul Esenyurt Üniversitesi İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 2021. **1**(2): p. 19-39.

7. Bingöl, O., *ABD'nin Soğuk Savaş Sonrası Dönemde Askeri Üs Politikasında Değişimin Türkiye'ye Etkileri ve İncirlik Üssünün Geleceği.* Uluslararası Kriz ve Siyaset Araştırmaları Dergisi, 2024. **8**(1): p. 29-53.

8. Emre, O., *ABD-RUSYA İLİŞKİLERİNDE CAYDIRICILIK VE SİLAHLARIN KONTROLÜ: 21. YÜZYILDA NÜKLEER STRATEJİNİN GELECEĞİ.*

9. Gürsu, M., *Ukrayna-Rusya Savaşından Alınan Hava Savunma Dersleri.* Savunma Bilimleri Dergisi, 2023. **2**(43): p. 357-383.

10. Tokatlı, S.G., *TUKİDİDES TUZAĞI ÇERÇEVESİNDE ABD–ÇİN REKABETİNİN ANALİZİ: TEORİK BİR DEĞERLENDİRME.* Akademik Hassasiyetler, 2023. **10**(21): p. 459-481.

11. Çevirme, A. and U.Y. Asal, *Savaşın değişen yapısı ve yeni nesil silah teknolojileri: Hipersonik silahlar üzerine bir inceleme.* 2024.

12. Sapmaz, A., *Rusya Federasyonu'nun Nükleer Caydırıcılık Politikası.* Avrasya Dünyası, 2023. **7**(13).

13. Egeli, Ö.Ü.S., *GÜVENLİK YAZILARI.*

14. BAYKARA, S.T., *STRATEJİK KONSEPTLER BAĞLAMINDA NATO VE 2022 STRATEJİK KONSEPTİ.* Premium e-Journal of Social Sciences (PEJOSS), 2022. **6**(22): p. 294-302.

15. SEYRİ, A.H., *COVID-19 KRİZİNDE KÜRESEL ASKERİ HARCAMALARIN SEYRİ.*

16. Kaya, E., *Deniz Güvenliği Bağlamında Arktik Okyanusu.* Paradigma: İktisadi ve İdari Araştırmalar Dergisi. **13**(Özel Sayı).

17. Karaağaç, C., *Geleceğin harekât ortamında iha sistemleri: askeri uygulamalar & teknoloji gereksinimleri.* III. Ulusal Havacılıkta İleri Teknolojiler Konferansı, İstanbul, 2014.

18. Demirayak, Ö. and D. Ateş, *Nato'nun Yüksek Kuzey'deki Rolü Ve Yetenekleri.* Paradigma: İktisadi ve İdari Araştırmalar Dergisi, 2024. **13**(Özel Sayı): p. 112-128.

19. Korkmaz, G., *Gelecek öngörüleri ve alınan dersler çerçevesinde savunma tedarik projeleri.* Savunma Bilimleri Dergisi, 2022. **1**(41): p. 163-204.

20. Topcu, N., *Realist bir perspektiften 21. yüzyıl güç mücadelesinde uzay politikalarının yeri: Gelişmekte olan ülke örnekleri–Brezilya, Çin ve Türkiye.* 2024.

21. Biçer, R.S.S., *NATO'nun Savunma ve Caydırıcılık Çalışmaları ile İlgili Bir Değerlendirme.* Güvenlik Stratejileri Dergisi, 2022. **18**(42): p. 323-346.

22. Aka, G.A.G. and K. Süvari, *DÖNÜŞEN KÜRESEL NÜKLEER DÜZENE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR: TÜRKİYE, BREZİLYA VE GÜNEY AFRİKA ÖRNEKLERİ.* Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, 2023. **24**(45): p. 521-537.

23. Çokgüçlü, Y., *Asya pasifik ve Hint pasifik'te ABD öncülüğünde geliştirilen ittifakların (Aukus-The Quad) ABD-Çin ilişkilerine etkisi.* International Journal of Social Sciences, 2022.

24. Yılmaz, S., *Teknoloji ve Savaş.* İstanbul Esenyurt Üniversitesi İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 2021. **1**(1): p. 51-66.

25. Alim, E., *Füze Teknolojisi Kontrol Rejimi: ABD Merkezli Hegemonik Bir Yapıdan Normatif Bir Yapıya Geçişin Önemi.* Güvenlik Stratejileri Dergisi, 2020. **16**(36): p. 821-872.

26. Kucukdegırmencı, O., *Çin Ve Japonya'Nin Doğu Çin Denizi İhtilafi Üzerine Bir Değerlendirme: Senkakudiaoyu Adalari, Dünü Ve Bugünü.* Academic Review of Humanities and Social Sciences, 2021. **4**(2): p. 184-211.

27. EGELİ, S., *Türkiye'nin Balistik Füze Programı.* Middle Eastern Analysis/Ortadogu Analiz, 2013. **5**(58).

28. Onay, Y., *2025 ve Sonrası Dönemde Türkiye'nin Güvenlik Politikalarının Olası Eğiliminin Analizi.* İstanbul Kent Üniversitesi Siyasal, Sosyal ve Stratejik Araştırmalar Dergisi, 2025. **1**(1): p. 104-125.

29. SÖKMEN, A.İ., *YENİ SAVAŞ ALANI: UZAY.*

30. PARALI, Y., *BİRİNCİ VE YÜKSEK MERTEBEDEN KAYMA KİPLİ KONTROL ALGORİTMALARININ MİNİMUM OLMAYAN FAZLI FÜZELERİN KONTROLÜNE UYGULANMASI.*

31. Kıratlı, M. and Z. Kanapiyanova, *Rusya'nın Nükleer Silah Programının Uluslararası Nükleer Hukuk ve Ticaret Hukuku Bakımından Değerlendirilmesi.* Electronic Turkish Studies, 2022. **17**(4).

AKIM-GERİLİM OKUYAN DEVRE KARTI

Edanur YERLİHELVACI[1*], Zehra ELMAS[2*], Meryem Ece ARIKAN[3*]

[1,2,3] Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya
[1] edanuryerlihelvaci@gmail.com, ORCİD: 0009-0008-8030-9249*
[2] zehra.elmaas@gmail.com, ORCİD: 0009-0001-4622-0717 [3*] arikanece33@gmail.com, ORCİD: 0009-0003-6339-8941*

Özet - Elektrik ve elektronik devrelerinde gerilim ve amper ölçümü için de kullanılan multimetre, devredeki gerilimi ve devreden geçen elektrik akımını hassas bir şekilde ölçerek devrenin düzgün çalışıp çalışmadığı hakkında bilgi verir. Bu sayede olası arızalar tespit edilebilir, devre elemanlarının istenilen değerlerde çalışıp çalışmadığı kontrol edilir. Bu değerlerin hatalı ölçülmesi; devre elemanlarının arızalanmasına, enerji kayıplarına ve güvenlik risklerine yol açabileceğinden multimetre kullanımı teknik çalışmalarda zorunluluk haline gelmiştir. Gerilim ve akım değerlerinin bilinmesi yalnızca laboratuvar ortamlarında değil, aynı zamanda ev tipi elektrik tesisatlarında, sanayi ve üretim tesislerinde, otomotiv elektroniğinde, yenilenebilir enerji sistemlerinde (özellikle güneş enerjisi ve rüzgâr türbini uygulamalarında), haberleşme sistemlerinde, bakım-onarım işlemlerinde ve eğitim amaçlı deney düzenekleri gibi pek çok alanda önemlidir. Bu projede doğru akım (DC), 0–10A aralığındaki akım ve 0–100V aralığındaki gerilim değerlerinin ölçülmesi ve ölçülen değerlerin, bir mikrodenetleyici tarafından işlenerek dokunmatik ekran üzerinde gerçek zamanlı olarak gösterilmesi hedeflenmiştir.

Günümüze kadar gerilim ve akım değerlerini ölçmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; Yüksek akımlı şöntlerin kalibrasyonu konusunda kapsamlı çalışmalardan biri Kusters ve MacMartin (1969) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, 20.000 ampere kadar akımlarda dört uçlu direnç veya şöntlerin kalibrasyonu için bir doğru akım karşılaştırıcı köprü tasarlamışlardır. Bu sistem, şöntlerin tam anma akımına kadar test edilmesine olanak tanımış, böylece yük katsayısının (power coefficient) etkileri de doğrudan ölçümlere dahil edilmiştir. Ölçüm yöntemi, iki direnç üzerinden geçen akımların oranının belirlenmesine
dayanmakta olup, dirençler arasında eşit gerilim elde edilmesiyle yüksek doğrulukta sonuçlar alınmıştır. Kusters ve MacMartin'in önerdiği köprü, 100 A aralığında 1 ppm'den düşük hata oranlarına ulaşmış, sonrasında yapılan geliştirmelerle bu doğruluk 20.000 A seviyelerine kadar korunabilmiştir [1]. Yüksek doğru gerilim (DC) ölçümlerinde kullanılan referans sistemleri, ölçüm belirsizliğini azaltmak ve uzun süreli kararlılığı artırmak amacıyla son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir. Bu alanda yapılan çalışmalardan biri, Merev ve Hällström (2015) tarafından sunulan, şönt tipi bant aralığı referanslarına dayalı 20 kV'luk bir gerilim referans sistemidir. Çalışmada geliştirilen sistem, yüksek gerilim ölçümlerinde temel alınabilecek, kararlı ve düşük belirsizlikli bir referans kaynağı oluşturmayı hedeflemiştir.

Önerilen sistem, sıcaklık kompanzasyonlu zener diyotlara dayalı önceki referans tasarımlara kıyasla daha düşük belirsizlik, düşük dinamik empedans ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Araştırmacılar, şönt referanslarının sıcaklık katsayısını minimize etmek için seçilmiş Zener diyotları kullanarak kompanzasyon sağlamışlardır. Bununla birlikte, sızıntı akımlarının dengelenmesi amacıyla ticari bir dört kadranlı akım kaynağı sistemle entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, yüksek gerilim ölçümlerinde önemli bir hata kaynağı olan kaçak akım etkilerini ortadan kaldırmış ve sistemin kararlılığını artırmıştır.

Benzer yaklaşımlar, yüksek doğru gerilim metrologisinde bant aralığı (bandgap) referanslarının kararlılığı, sıcaklık katsayısının azaltılması ve akım dengeleme devrelerinin optimizasyonu üzerine odaklanmıştır (Gao et al., 2018;

Hällström et al., 2019). Ayrıca yüksek gerilim bölücülerin (high-voltage dividers) doğruluğunu artırmak için referans sistemlerinin kalibrasyon zincirlerine doğrudan bağlanması gerektiği vurgulanmıştır [2]. Kraft (2007) çalışmasında, 15 amperden 3000 ampere kadar olan yüksek akımların ölçümünde kullanılan düşük dirençli, tek aralıklı akım şöntlerinin ölçüm tekniklerini incelemiştir. Araştırmada, günümüzde kullanılan farklı şönt tasarımlarının performansları, kendi kendine ısınma etkileri ve bu etkilerin ölçüm doğruluğu üzerindeki sonuçları detaylı biçimde ele alınmıştır. Özellikle, şöntlerin sıcaklık ve direnç dengesine ulaşması için gereken sürelerin önemine dikkat çekilmiş, bu sürelerin şöntün yapısına, kullanılan malzemelere ve sıcaklık sensörünün konumuna bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır.

Kraft, sıcaklığın şönt boyunca homojen dağılmamasının ölçüm belirsizliğini artırabileceğini, bu nedenle termal dengenin tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, akım şöntlerinde oluşan hataların, simetrik ve düşük dirençli bağlantı tasarımlarıyla azaltılabileceğini ifade etmiştir. Çalışma, akım dağılımı ve potansiyel terminallerinin konumlandırılmasının da ölçüm doğruluğunu doğrudan etkilediğini göstermektedir[3]. Hu ve çalışma arkadaşları (2025), dağıtılmış fotovoltaik (PV) sistemlerin DC tarafında meydana gelen geçici anomali tespiti problemini çözmeye yönelik olarak, düşük gerilimli DC sinyaller üzerinde oluşan üst üste bindirilmiş geçici gerilimleri yüksek doğrulukla ölçebilen bir cihaz geliştirmiştir. Çalışmada, sistemin teorik altyapısı direnç-kapasitans (RC) paralel voltaj bölücü modeline dayandırılmış ve bu model üzerinden cihazın tepkisi analiz edilmiştir. Yapılan simülasyonlar, cihazın dinamik tepki karakteristiğini ortaya koymuş ve bu veriler deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Geliştirilen ölçüm yöntemi sayesinde cihazın DC sinyali ölçüm hatası ±%0,5, geçici voltaj sinyali ölçüm hatası ise ±%1'den daha düşük olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, hem doğruluk hem de tekrarlanabilirlik açısından yüksek performans göstermektedir. Ayrıca cihazın kalibrasyon süreci, geniş bir frekans aralığında ölçüm belirsizliğini en aza indirmeye yönelik olarak optimize edilmiştir [4]. Wang ve çalışma arkadaşları (2023), doğru akım (DC) yüksek gerilim bölücülerinin kalibrasyonundaki zorlukları ele alarak, dağıtılmış senkron ölçüm prensibine dayalı yeni bir ölçüm sistemi önermiştir. Geleneksel yöntemlerde, yüksek gerilimli DC bölücüler doğrudan karşılaştırma tekniğiyle kalibre edilememekte veya yüksek hata paylarıyla çalışmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, araştırmacılar doğru akım yüksek gerilim bölücüsünün düşük gerilim koluna entegre edilebilen dağıtılmış bir senkron ölçüm cihazı tasarlamıştır.

Bu çalışma, DC yüksek gerilim ölçümlerinde hassasiyet, güvenlik ve izlenebilirlik açısından önemli bir yenilik getirmiştir. Özellikle, dağıtılmış senkron örnekleme (distributed synchronous sampling) teknolojisinin kullanılması, gelecekte yüksek gerilim ölçüm ve kalibrasyon sistemlerinde daha yaygın bir uygulama alanı bulabileceğini göstermektedir [5]. Kato ve çalışma arkadaşları (2023), yüksek doğru akımların (High DC Currents) hassas ve güvenilir şekilde ölçülmesi için basit bir şönt modülü (Simple Shunt Module for High DC Current – SMHC) geliştirmiş ve performansını kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Çalışmanın temel amacı, DC gücünün verimli kullanımını destekleyecek şekilde düşük maliyetli, yüksek doğrulukta bir akım ölçüm çözümü sunmaktır. Araştırmada, ofset ve kazanç ayarlamaları kullanılarak ölçüm doğruluğu iyileştirilmiştir. 1000 A akım ölçümünde hata oranı, ±%1,0'dan ±%0,04'e düşürülmüştür. Ayrıca, gerçek zamanlı sıcaklık düzeltme

(Temperature Compensation – TC) fonksiyonu entegre edilerek sıcaklık kaynaklı sapmalar minimize edilmiştir. Doğrusallık değerlendirmesi sonuçları, 50 A ile 1000 A arasındaki akım ölçümlerinde bağıl sapmanın ±%0,06'dan küçük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yapılan belirsizlik analizi, 1000 A ölçümü için %95 güven aralığında genişletilmiş bağıl belirsizliğin yalnızca %0,20 olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, geliştirilen şönt modülünün hem laboratuvar hem de endüstriyel ortamlarda yüksek güvenilirlikte DC akım ölçümleri

yapabileceğini göstermektedir [6]. Voljc ve arkadaşları (2009), AC akım ölçümlerinde karmaşık ve zaman alıcı AC-DC transfer ölçümlerini önleyen bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, koaksiyel akım şöntlerinin AC gerilim düşüşü doğrudan ölçülerek, AC akımın hassas şekilde belirlenmesi sağlanmaktadır. Çalışmada özel olarak tasarlanmış koaksiyel akım şöntlerinin uzun vadeli sapma, kendi kendine ısınma etkileri ve ticari AC voltmetre ile yüklenme performansı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, AC akım metrologisi alanında koaksiyel şönt tabanlı doğrudan ölçüm tekniklerinin gelişimine önemli bir katkı sağlamaktadır ve hassas AC ölçümleri için uygulanabilir bir referans yaklaşım sunmaktadır [7]. Kimura ve arkadaşları (2011), güç elektroniği devrelerinde akım ölçümü için geleneksel şönt dirençler yerine MOS-FET anahtarlama cihazlarının kullanımını önermiştir. Şönt dirençler, düşük maliyetli ve yüksek güvenilirlikli olmalarına rağmen, sistemdeki bileşen sayısını artırarak maliyet ve karmaşıklığı yükseltebilir. Yazarlar, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları için maksimum güç noktası takibi (MPPT) uygulamalarında, gücün hassas ölçümünün kritik olmadığı durumlarda, MOS-FET'lerin hem akım ölçüm direnci hem de anahtarlama elemanı olarak kullanılmasının avantajlarını ortaya koymuştur [8]. Wenxuan ve arkadaşları (2008), geleneksel girdap akımı (eddy current) sensörlerinin hedef malzemelerin elektromanyetik özelliklerinden kaynaklanan sınırlamalarını aşmak amacıyla yeni bir ölçüm devresi tasarlamıştır. Tasarım, empedans vektörü yansıtma yöntemine dayanmakta olup, içinde dalga formu üreteci, empedans-gerilim dönüştürücü, X/R ortogonal çözücü, empedans normalizatörü ve doğrusal olmayan kompanzasyon elemanlarını içermektedir. Bu yaklaşım, farklı hedeflerin neden olduğu elektromanyetik etkileri minimize ederek ölçüm doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışma, özellikle girdap akımı sensörlerinde malzemeden bağımsız ölçüm sağlamaya yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmakta ve sensör doğruluğu ve esnekliği açısından önemli bir katkı sağlamaktadır [9]. Van Leeuwen ve arkadaşları (2020), orta ve yüksek gerilim (YG) uygulamalarında kullanılan akım trafolarının (AT) oran hatası ve faz kaymasının gerilim bağımlılığını incelemek için bir deney düzeneği geliştirmiştir. Test edilen AT'ye uygulanan gerilim için referans AT'yi korumak amacıyla ekranlı bir YG kablosu kullanılmıştır.

Çalışmada ilk adım olarak, kablodan geçen kaçak akımın, 24 kV'a kadar gerilimler için referans AT'nin oran hatası ve faz kayması üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve düzeltilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, yüksek gerilimlerde AT ölçüm doğruluğunu artırmak ve ölçüm standartlarını iyileştirmek için önem taşımaktadır. Araştırma, özellikle akım trafolarının gerilim bağımlılığı, kaçak akımlar ve faz kayması analizleri alanında hassas ölçüm tekniklerinin uygulanmasına yönelik bir referans sunmaktadır ve YG şebeke uygulamalarında güvenilir ölçümler sağlamak için kritik bir katkı sağlamaktadır [10]. Cai ve Wang (2007), yüksek gerilim akım sınırlayıcı sigortaların (current-limiting fuses) zaman-akım karakteristiklerini ölçmek için paralel rezonans devresi kullanımını açıklamaktadır. Makalede, devrenin tasarım prensipleri ve sigortaların zaman-akım karakteristiklerini ölçme metodolojisi detaylandırılmıştır.

Ayrıca, çalışmada güç kondansatörlerinin ve yüksek akım reaktörlerinin tasarımı ile paralel rezonans devresinin bu elemanlarla birlikte kullanımının ölçüm doğruluğu üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bu yöntem, yüksek gerilim uygulamalarında sigorta karakteristiklerinin hassas ve güvenilir ölçümü için bir temel sağlamaktadır ve özellikle endüstriyel ve enerji iletim sistemlerinde güvenlik ve sistem koruma tasarımlarına katkıda bulunmaktadır [11]. Ganz (1912) ve Hering'in çalışmaları, borularda akan kaçak akımların ölçümü için temel yöntemleri açıklamaktadır. Ölçüm yöntemi, boru uzunluğunun bir kısmını şönt olarak kullanmak, bu şönt boyunca oluşan voltaj düşüşünü hassas bir milivoltmetre ile ölçmek ve borunun varsayılan direncine dayanarak akımı hesaplamak üzerine kuruludur. Bu yaklaşım, Kirchhoff'un birinci yasasına dayanmaktadır; yani bir birleşme noktasına doğru akan akımların toplamı, noktadan uzaklaşan akımların toplamına eşittir.

Dr. Hering'in sunduğu yöntem, boru sistemlerinin gerçek direncini ölçerek akım hesaplamalarını hassaslaştırmakta ve Dr. Michalke'nin 1906 tarihli "Elektrikli Demiryollarından Kaçak Akımlar" kitabında belirtilen ilk prensiplere dayanmaktadır. Bu teknik, boru akımlarının ölçümünde güvenilir ve uygulanabilir bir yöntem olarak kabul edilmiştir ve özellikle elektroliz deneylerinde ve enerji iletim sistemlerinde kaçak akımların belirlenmesinde temel bir referans olmuştur [12]. Eroshenko ve arkadaşları (2017), yüksek gerilim şebekelerinde güçlü tüketim merkezlerinin yüksek kısa devre akımları sorununu ele almıştır. Bu durum, güç ekipmanlarının hasar görme riskini artırmakta ve birleşik güç sisteminin büyük bir kısmının kapalı devre modunda çalışmasını engellemektedir. Bu nedenle, kısa devre sınırlama önlemlerinin uygulanması kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Makale, mevcut kısa devre akımı sınırlama faaliyetlerinin olumlu ve olumsuz etkilerini özetlemekte ve IEC standart metodolojisine göre 110, 220 ve 500 kV gerilim seviyelerine sahip bir bölgesel güç sistemi üzerinde yapılan devre kesici montaj testlerini

sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, mevcut "normal" topolojinin kısa devre akımı sınırlama önlemleri açısından etkinliğini değerlendirmekte ve sistemin darboğaz trafo merkezleri için özel öneriler sunmaktadır.

Bu çalışma, yüksek gerilim güç sistemlerinde kısa devre akımlarının sınırlanması ve güvenli işletim stratejilerinin geliştirilmesi konusunda uygulamalı bir referans sunmakta ve sistem tasarımı ile ekipman koruması açısından önemli bilgiler sağlamaktadır [13]. Bu IEEE taslak standardı (2021), DC (Doğru Akım) güç kaynaklarından 50 V veya daha düşük gerilimle çalışan birden fazla DC yüke enerji ve iletişim sağlamak için gerekli Fiziksel Katman ve Orta Erişim Kontrolü (MAC) özelliklerini tanımlar. Standarda göre, her alıcının kendi fiziksel adresi (en az 4 bit) bulunur ve 1:n çoklu damla veri yolu veya ağaç topolojisi içinde bir çift güç hattı üzerinden (1 km veya daha kısa) vericiye bağlanır.

Verici, DC gücünü ve yükleri kontrol etmek için kontrol komutu/verileri ve hedef adres içeren iletişim paketlerini, kablo voltajını değiştirerek elektrik sinyalleri şeklinde iletir. Her alıcı, bu elektrik sinyallerinden kontrol verilerini çözer ve voltajı düzleştirilmiş DC güç ile DC yüküne enerji sağlar [14]. Kiess (1998) çalışmasında, DC gerilim sinyallerinin ölçümünde düşük istatistiksel belirsizlik elde etmek amacıyla hem zaman alanı hem de frekans alanı analiz yöntemlerini birleştiren bir ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerde yalnızca zaman ortalaması kullanılarak DC bileşen hesaplanırken, bu yaklaşım sinyallerdeki düşük frekanslı gürültü ve kararsızlıkların ölçüm doğruluğunu düşürmektedir.

Ayrıca, bu teknik sayesinde düşük frekanslı gürültü spektrumları ayrıntılı biçimde haritalanabilir. Bu durum, özellikle yüksek hassasiyetli DC voltmetrelerde, kalibrasyon sistemlerinde ve düşük seviyeli sinyal ölçümlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Çalışma, modern ölçüm teknolojilerinde gürültü azaltma ve doğruluk artırma yaklaşımlarına öncülük etmiştir [15]. Bouabana, Şanal ve Sourkounis (2016) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, akım, gerilim ve sıcaklık ölçümlerini tek bir yapıda birleştiren düşük maliyetli, evrensel bir sensör tasarımı tanıtılmıştır.

Sensörün en dikkat çekici özelliği, F-PWM (Frequency–Pulse Width Modulation) biçiminde dijital bir çıkış sinyali üretmesidir. Bu sayede sensör, uzak mesafelerde doğruluktan ödün vermeden veri iletimi gerçekleştirebilir. Çalışmada, üç farklı ölçüm topolojisinin (akım, gerilim ve sıcaklık) tek bir sensör yapısında birleştirilmesiyle elde edilen universal sensör mimarisi, hem maliyet hem de performans açısından verimli bir çözüm olarak sunulmuştur [16]. Guan ve çalışma arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen bu araştırmada, dış parazitlere karşı yüksek direnç gösteren temassız bir voltaj sensörü tasarlanmıştır. Sensör, ölçüm probu ile güç hattı arasında oluşan kapasitif kuplaj prensibine dayanmaktadır.

Çalışmada önerilen sensör, 100–800 V aralığında %1'in altında doğrusal olmayanlık değeriyle yüksek ölçüm doğruluğu sağlamıştır. Ayrıca, sensör 50 Hz frekansta kararlı voltaj hassasiyeti göstermiş ve -3 dB bant genişliği 10 Hz–10 kHz arasında ölçülmüştür. Bu sonuçlar, geri besleme devresi bulunmayan geleneksel temassız sensörlere kıyasla genişletilmiş frekans yanıtı ve gelişmiş gürültü bağışıklığı ortaya koymuştur [17]. O'Rourke (2024) bu bölümde, işlemsel yükselteçlerin (opamp) temel modelleri ve bu modellerin dirençli devrelerdeki davranışları üzerine odaklanmaktadır. Çalışma, elektronik devrelerin vazgeçilmez yapı taşlarından biri olan opamp'lerin idealleştirilmiş modelleme prensiplerini teorik bir çerçevede açıklamaktadır.

Yazar, ideal opamp modelinin iki temel özelliğine dikkat çekmektedir:
1-Giriş uçları arasında sıfır voltaj farkı, 2-Giriş akımının sıfır olması.

Bu yaklaşım, geleneksel devre kavramlarındaki "akım akışına izin veren kısa devre" anlayışına meydan okuyarak, ideal koşullar altında opamp'lerin davranışını soyut bir biçimde tanımlar. O'Rourke, ideal modelde sonsuz kazanç varsayımını, çıkışın giriş farkını sıfırda tutmak için "ne gerekiyorsa onu üretmesi" olarak tanımlamıştır.

Sonuç olarak O'Rourke, ideal opamp modelinin kullanımının devre topolojisine olan bağımlılığı azalttığını; örneğin ters çeviren yükselteçlerde, dirençlerin hangi terminale bağlandığından bağımsız olarak aynı davranışın gözlemlenebildiğini göstermiştir [18]. Faisal ve arkadaşları (2020), hem AC hem de DC gerilim ve akım ölçümü için düşük maliyetli bir ölçüm sistemi geliştirmiştir. Bu çalışma, özellikle mühendislik öğrencileri ve eğitim amaçlı

uygulamalar için uygun, ekonomik bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Geliştirilen sistem, hem alternatif akım (AC) hem de doğru akım (DC) ölçümlerini aynı platformda gerçekleştirebilmekte ve akıllı telefonlar üzerinden izlenebilirlik özelliğiyle kullanıcıya modern bir arayüz sunmaktadır.

ATmega328p'nin düşük güç tüketimi, geniş destekli çevrimiçi topluluğu ve Arduino platformlarıyla uyumluluğu, sistemin erişilebilirliğini artırmıştır.Elde edilen sonuçlar, sistemin yüksek doğrulukta ölçüm gerçekleştirdiğini, ancak maliyet açısından ticari cihazlara göre oldukça uygun fiyatlı bir alternatif sunduğunu göstermektedir [19]. Es-Saqy ve çalışma arkadaşları (2025), Arduino Uno tabanlı bir eğitim deney seti geliştirerek, öğrencilerin akım-gerilim (I-V) karakteristiklerini incelemelerini sağlayan düşük maliyetli ve etkili bir sistem önermiştir. Çalışma, özellikle fizik ve kimya eğitiminde deneysel öğrenmeyi desteklemeyi amaçlamakta ve laboratuvar ekipmanı eksikliğinden kaynaklanan sınırlamaları ortadan kaldırmayı hedeflemektedir.

Önerilen sistem, diyotlar ve ohmik iletkenler gibi temel devre bileşenlerinin akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesini sağlar. Arduino kartı, açık kaynak kodlu yapısı, uygun maliyeti ve çok işlevliliği sayesinde deney düzeneklerinin kolaylıkla programlanmasına ve kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, öğrenciler yalnızca deneysel ölçüm yapmayı değil, aynı zamanda programlama ve gömülü sistem mantığını da öğrenmektedir.

Sonuç olarak, çalışma Arduino tabanlı deneysel öğretim araçlarının, öğrencilerde hem teorik kavrayışı güçlendirmede hem de pratik mühendislik becerilerini geliştirmede önemli bir katkı sunduğunu vurgulamaktadır. Geliştirilen sistem, düşük maliyeti ve taşınabilirliği sayesinde okul laboratuvarlarının olanaklarını genişletme potansiyeline sahiptir[20].

METHOD

Araştırmalar incelendikten sonra bu projede gerilim ölçümü için, kaynak gerilimi ADC pininin ölçüm aralığına uygun olacak şekilde düşürülmüştür. Arduino Uno'nun ADC giriş aralığı 0–5 V arasındadır ve 10-bit çözünürlüğe sahiptir (0–1023 sayısal değer aralığı). Bu nedenle, gerilim bölücü devre kullanılarak ölçülmek istenen yüksek gerilim bu aralığa indirilmiştir. Akım ölçümü için 100 V ve 10 A dayanımına sahip alüminyum dirençler tercih edilmiştir. 1000 W gücünde alüminyum direnç temin edilemediği için, bunun yerine iki adet 500 W'lık direnç seri bağlanarak kullanılmıştır. 10 A'lik yük elde edildikten sonra, akım ölçümü amacıyla 0.02 Ω değerinde bir şönt direnç seçilmiştir. Şönt direncin uçlarındaki gerilim farkı oldukça düşük olduğundan, bu fark LM358 entegresi kullanılarak yaklaşık 10 kat yükseltilmiştir. Böylece ADC'nin okuyabileceği seviyeye getirilmiştir. Arduino Uno, bu iki ADC kanalından gelen verileri kullanarak gerilim ve akım hesaplamalarını algoritması içinde gerçekleştirir. Arduino'da 1 V, yaklaşık olarak 240 ADC birimine karşılık gelmektedir. Gerilim bölücüden ve şönt üzerinden elde edilen ölçüm değerleri bu oran dikkate alınarak hesaplanmıştır. Tüm bu adımların sonunda, kaynaktan gelen gerilim ve akım değerleri doğru bir şekilde ekranda görüntülenmiştir.

MATERYAL

LM358 Op-Amp, şekil 1'de gösterilmiştir.

- Giriş gerilimi: 3-32V
- Çalışma sıcaklığı: 0-70°C
- Çıkış akımı: 20 mA

Şekil 1: LM356 Op-Amp

Arduino UNO, şekil 2'de gösterilmiştir.

- Besleme voltajı: 5V
- Mikrodenetleyici: ATmega328P
- Analog giriş sayısı: 6
- Dijital giriş/çıkış pinleri: 14 (6 PWM çıkışı)

Şekil 2: Arduino UNO

Nextion HMI Dokunmatik Ekran, şekil 3'te gösterilmiştir.

- Ekran tipi: TFT LCD, 4 telli rezistif dokunmatik panel
- Ekran boyutu: 2.4 inç
- Çözünürlük: 320 × 240 piksel
- Güç tüketimi: 5 V / 90 mA
- Arabirim: 4 pinli TTL seri arayüz, Arduino gibi host cihazlara kolay bağlantı sağlar.

Şekil 3: Dokunmatik Ekran

XT60 Konnektör, şekil 4'te gösterilmiştir. • 30A kadar sürekli akıma dayanabilir.

- Anma gerilimi: DC 500V
- Devre yükünün, devre kartına bağlamak amacıyla kullanılacaktır.

Şekil 4: Konnektör

Devre Yükü, şekil 5'te gösterilmiştir.

- Rezistans telin seramik etrafında sarılmasıyla 10Ω/1000W değerinde direnç kullanılmıştır.

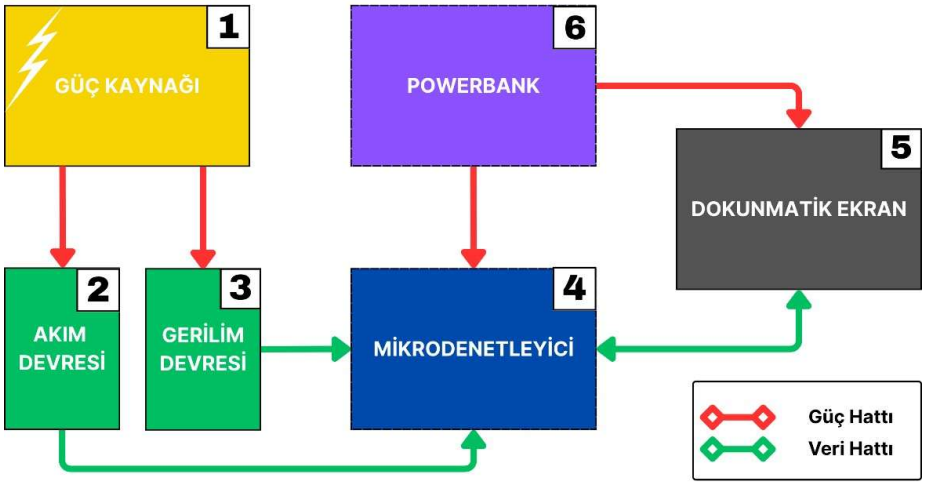
Şekil 5: Devre Yünü

Taş Direnç, şekil 6'da gösterilmiştir.

- 0.01Ω/5W değerindeki taş direnç, şönt direnç kullanılmıştır.

Şekil 6: Taş Direnç

PROJENİN BLOK ŞEMASI



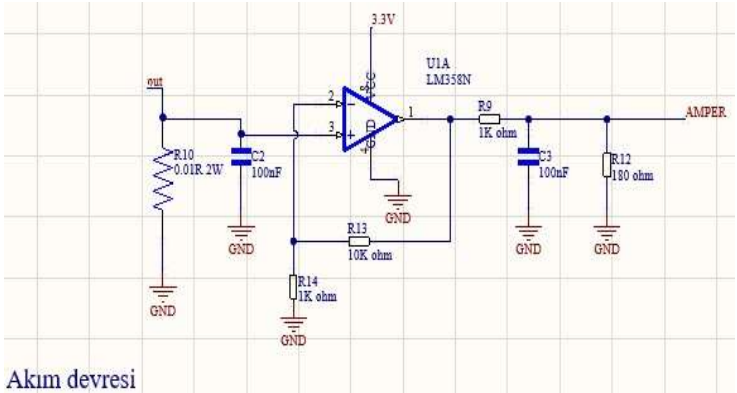
Şekil 7: Blok Şeması

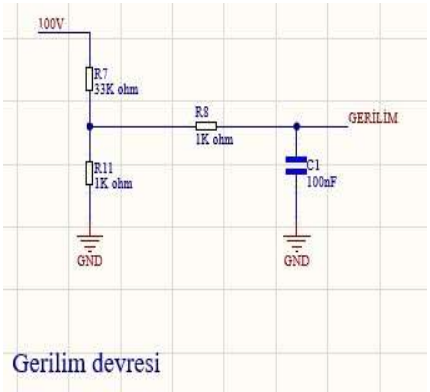
1-GÜÇ KAYNAĞI

0-10A akım ve 0-100V gerilim verebilen bir trafoyla sağlanacaktır.

2,3-AKIM-GERİLİM DEVRESİ

Akım, şönt direncin uçlarındaki gerilim farkıyla okunur. Bu değer çok küçük olduğundan LM358 entegreli yükselteç devresinde Arduino UNO'nun ADC pini için uygun gerilim aralığı olan 0-5V'a yükseltilecektir *Şekil 8*'deki gibi, gerilimin ise gerilim bölücü devresiyle uygun aralığa *Şekil 9*'daki gibi getirilip ölçülecektir.





Şekil 8: Akım devresi

Şekil 9: Gerilim devresi

4-MİKRODENETLEYİCİ

Arduino UNO mikrodenetleyicisinin ADC okuyan pinlerinden alınan veri, gerilim ve akım için hesaplanıp ekrana yazdırma yapılacaktır.

5-DOKUNMATİK EKRAN

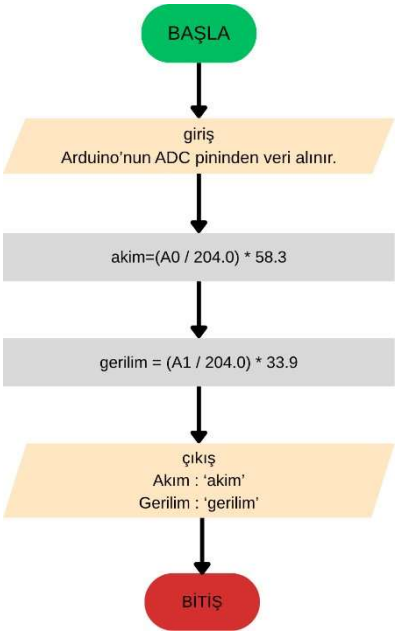
Arduino UNO ile uyumlu olan erkanda amper ve gerilim değerleri gösterilecektir.

6-POWERBANK

Şekil 7'de gösterildiği gibi mikrodenetleyici ve ekran için 5V besleme sağlayacaktır.

ALGORİTMA

Arduino IDE programında yazılan kodun algoritması *Şekil 10*'da gösterilmiştir. Algoritma, A0 ve A1 pinlerinden veri okunmasıyla başlar. Bu pinlerden gelen analog değerler, ADC (Analog–Dijital Dönüştürücü) tarafından sayısal değerlere çevrilir. Elde edilen ADC değeri, uygun katsayıyla çarpılarak voltaj cinsine dönüştürülür. Gerilim devresinde kullanılan gerilim bölücüyle ADC için uygun aralığa düşürülen değer, hesaplama aşamasında aynı oranla tekrar çarpılarak gerçek gerilim değeri elde edilir. Benzer şekilde, şönt direnç üzerinden okunan küçük gerilim farkı da yükseltilip koldan geçen akıma oranı burada çarpılır ve akım değeri hesaplanır. Sonuçlar, ekranda gerilim ve akım olarak gösterilir.



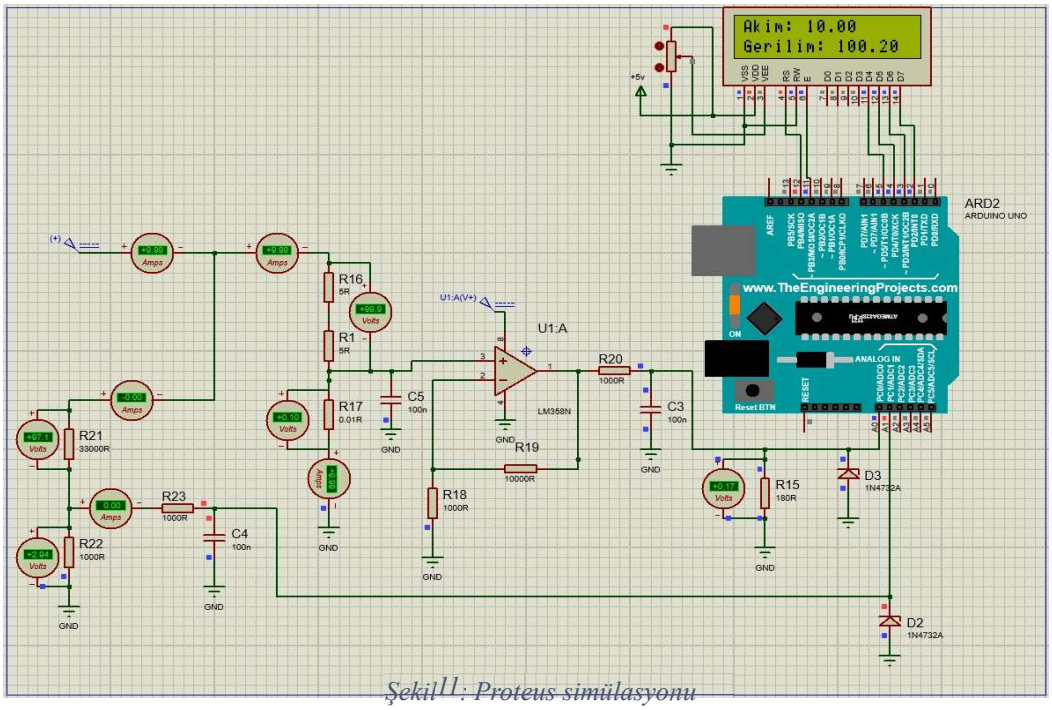
Şekil 10: Algoritma şeması

Bu işlemler, devreye güç verildiği sürece döngüsü içerisinde sürekli olarak tekrarlanır ve güncellenir.

SİMÜLASYON

Devre, Proteus programında çeşitli şekillerde test edilmiş ve son hali *Şekil 11*'de gösterilmiştir. Simülasyonda giriş gerilimi 100V DC uygulanmıştır. Op-amp beslemesi ise 3.3V olarak ayarlanmıştır. Gürültü önlemesi için seramik kondansatörler tercih edilmiştir. Olası bir ihtimalle ADC pinine fazla voltaj gitmemesi için 4.7V'luk zener diyotlar eklenmiştir. Devredeki akım yolları ve dirençler üzerindeki gerilim düşümleri, DC voltmetre ve ampermetre kullanılarak kontrol edilmiştir. Yazılan algoritmanın doğruluğunu test etmek amacıyla girişe bir potansiyometre bağlanmış, böylece farklı giriş değerlerinde elde edilen sonuçlar gözlemlenmiştir. Simülasyonda, sonuçların doğru hesaplanıp hesaplanmadığını kontrol etmek için bir LCD ekran kullanılmıştır. Bu ekranın bağlantı yapısı araştırılmış ve yalnızca simülasyon ortamında, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu teyit etmek amacıyla kullanılmıştır.

Gerilim bölücüyle gerilim hesaplaması: $V_{out} = V_{in} . [R_2/(R_1+R_2)]$. Opamp kazancı, Av = 1 + (Rf/Rl) formülüyle hesaplanmış olup devrenin kazancı 10 kat olarak bulunmuştur.



Şekil 11: Proteus simülasyonu

DOĞRULUK

Tablo 1: Akım Doğruluk Tablosu

	Hesaplanan	Ölçüm	Doğruluk
AKIM	9.99	10	%99.89
	8.99	8.86	%98.55
	7.99	8.00	%99.87
	7.00	6.86	%98
	6.00	6.00	%100
	5.00	5.14	%97.2
	4.00	4.00	%100
	3.00	3.14	%95.33
	2.00	2.00	%100
	1.00	1.14	%86

Tablo 2: Gerilim Doğruluk Tablosu

	Hesaplanan	Ölçüm	Doğruluk
GERİLİM	100.04	100.20	%99.84
	90.05	90.07	%99.97
	79.95	80.10	%99.81
	69.96	70.13	%99.75
	59.97	60.16	%99.68
	49.97	50.02	%99.89
	39.98	40.05	%99.82
	29.98	30.08	%99.66
	19.99	20.11	%99.39
	10.00	9.97	%99.7

Mutlak Hata = |Hesaplanan Değer – Ölçülen değer|

Bağıl Hata = 1- (Mutlak Hata / Ölçülen değer)

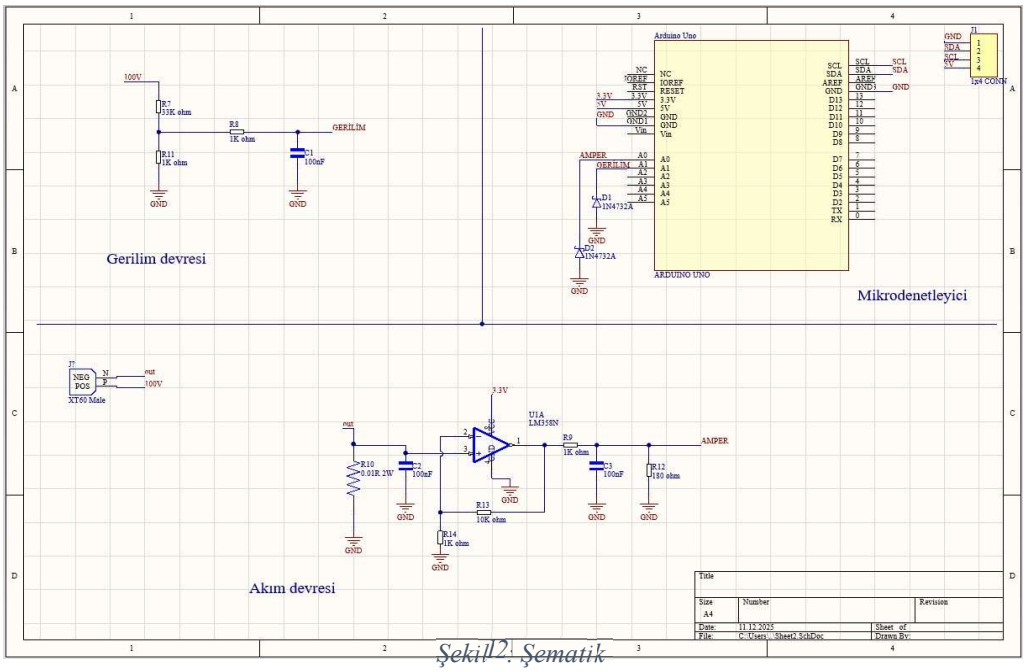
Yüzde Bağıl Hata = Bağıl Hata*100

Formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılıp doğruluk tablosu oluşturulmuştur. Bu durum sonucunda yapılan devrenin simülasyon ortamında doğruluk ortalaması Tablo 1'de akımın %97.48, Tablo 2'de ise gerilimin %99.75 olduğu hesaplanmıştır.

ŞEMATİK

Devrenin şematik çizimi Altium Designer programında yapılmıştır ve *şekil 12*'de gösterilmiştir. Şematik üç ana bölüme ayrılmıştır: gerilim ölçüm devresi, akım ölçüm devresi ve mikrodenetleyici. Şematik çizilirken yük bağlantısı

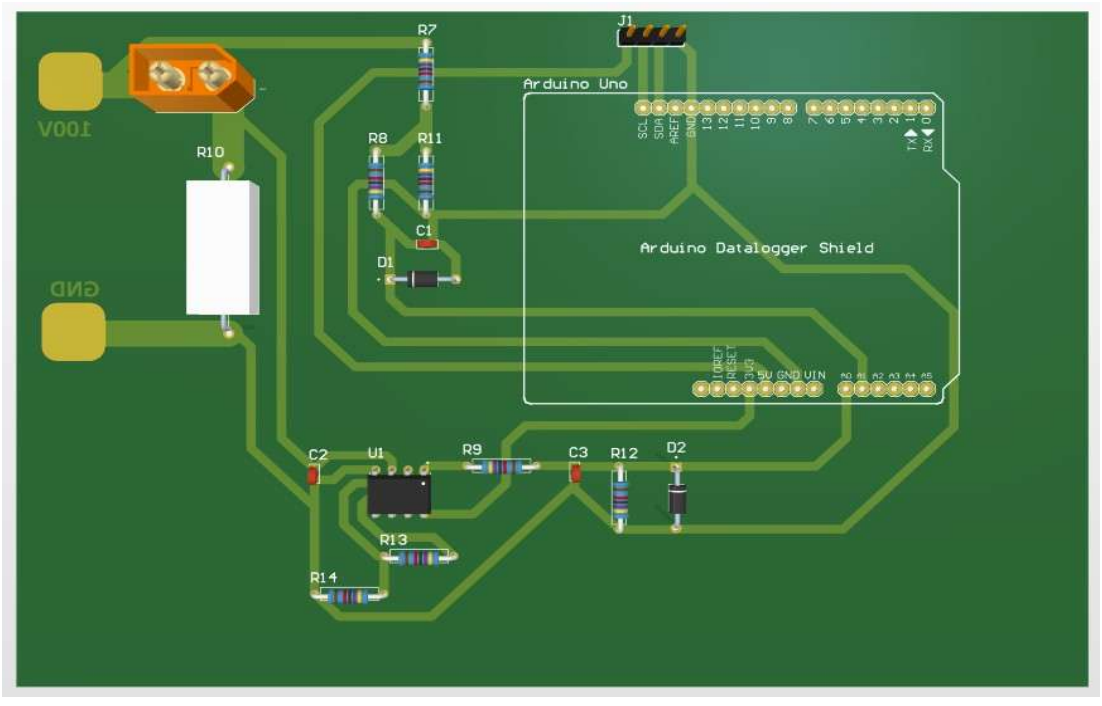
için bir adet konnektör eklenmiştir. Ayrıca, ekran ve mikrodenetleyici arasındaki bağlantıyı sağlamak amacıyla şematiğe 4 pinli bir konnektör eklenmiştir.



Şekil 12: Şematik

PCB

Şematik çizimin tamamlanmasının ardından, PCB tasarımı *şekil 13*'te gösterildiği gibi yapılmıştır. Bu bölümde, komponent bağlantıları yapılmıştır. Yollar çizilirken, taşıyacağı akım miktarına uygun genişlikte olmasına dikkat edilmiştir. Bu aşamada ayrıca lehimin nasıl yapılacağı düşünülmüş olup kullanım kolaylığı ve yerleşim düzeni açısından, devre elemanları **ve** devre yolları farklı yüzeylere yerleştirilmiştir. Bu durumdan dolayı, 100V ve GND metinleri de buna uygun olarak terslenmiştir.



Şekil 13: 3D devre

KAYNAKÇA

[1] N. L. Kusters and M. P. MacMartin, "A Direct-Current-Comparator Bridge for Measuring Shunts up to 20000 Amperes," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 18, no. 4, pp. 266–271, Dec. 1969, doi: 10.1109/TIM.1969.4313821.

[2] A. Merev and J. K. Hällström, "A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 1, pp. 184–189, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIM.2014.2338673

[3] Kraft, M. (2007). Measurement Techniques for Low-Value, High-Current, Single-Range Current Shunts from 15 to 3000 Amperes. NCSLI Measure, vol. 2, no. 1, pp. 44–49. doi: 10.1080/19315775.2007.11721357.

[4] Hu, K. ve diğerleri (2025). Research on Measurement Device and Method for Low-Voltage DC Superimposed Transient Voltage. 2025 IEEE 8th International Conference on Electrical and Energy (CIEEC), Changsha, China, pp. 2550–2553. doi: 10.1109/CIEEC64805.2025.11116531.

[5] Wang, J., Wang, X. ve Wang, J. (2023). Research on DC High-Voltage Divider Based on Distributed Synchronous Measurement. 2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), Dali, China, pp. 743–747. doi: 10.1109/EEPS58791.2023.10256811.

[6] H. Kato et al., "Development and Evaluation of a Simple Shunt Module for High DC Current Measurement," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 3, pp. 1656-1664, June 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3224072.

[7] Voljc, B., Lindic, M., & Lapuh, R. (2009). Direct Measurement of AC Current by Measuring the Voltage Drop on the Coaxial Current Shunt. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 4, pp. 863–867, April 2009. doi: 10.1109/TIM.2008.2007074.

[8] Kimura, N., Sakoda, Y., & Morizane, T. (2011). DC-DC Converter Current Measurement for MPPT Control. 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia, Jeju, Korea (South), pp. 1548–1551. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944514.

[9] Wenxuan, D., Pingan, D., Yating, Y., & Lichuan, X. (2008). Design and Implementation of Functional Measuring Circuit for Material-Independent Eddy Current Sensor. 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, pp. 319–323. doi: 10.1109/ICMA.2008.4798773.

[10] Van Leeuwen, R., van den Brom, H., Rietveld, G., Houtzager, E., & Hoogenboom, D. (2020). Measuring the Voltage Dependence of Current Transformers. 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Denver, CO, USA, pp. 1–2. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191845.

[11] Cai, J., & Wang, J. (2007). Using a Parallel Resonance Circuit to Measure Time-Current Characteristics of High Voltage Current-Limiting Fuses. 2007 8th International Conference on Electric Fuses and their Applications, Ceyrat, France, pp. 11–15. doi: 10.1109/ICEFA.2007.4419959.

[12] "Discussion on "Measuring Stray Currents in Underground Pipes" (Hering), Boston, Mass., June 28, 1912." Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 31, no. 12, pp. 2373–2391, Dec. 1912. doi: 10.1109/PAIEE.1912.6661118.

[13] Eroshenko, S. A., Egorov, A. O., Senyuk, M. D., & Khalyasmaa, A. I. (2017). Practical Experience in Short-Circuit Current Limiting Measures Implementation. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, pp. 1326–1331. doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910812.

[14] "IEEE Draft Standard for DC Power Transmission and Communication to DC Loads," in P2847/D2, May 2021 , vol., no., pp.1-87, 23 June 2021. keywords: {IEEE Standards;DC machines;Power distribution;Power transmission lines;Signal processing;Communication systems;Power line communication;PLC;DC;DC power;DC power line communication;DC power transmission;DC loads;Differential signal;Differential signal communication;High power differential signal power line communication},

[15] T. E. Kiess, "Noise filtering of DC voltages in both the time and frequency domain," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 47, no. 3, pp. 674–679, June 1998.

[16] A. Bouabana, E. Şanal ve C. Sourkounis, "Development of a low cost universal sensor for an accurate measurement of current, voltage and temperature," 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, 2016, pp. 391–395.

[17] M. Guan et al., "An External Interference-Resistant Noncontact Voltage Sensor With Negative Feedback Design," IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 10, pp. 17040–17044, 15 May 2024.

[18] Robert O'Rourke, "Opamp Models and Resistive Circuits," in First and Second Order Circuits and Equations: TECHNICAL Background and Insights, IEEE, 2024, pp. 39–43.

[19] F. Faisal, A. Karim, M. Z. Hasan, B. Shanmugam, M. Mahdi ve N. N. Moon, "Low Cost Voltage and Current Measurement Technique using ATmega328p," 2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, India, 2020, pp. 1063-1068, doi: 10.1109/I-SMAC49090.2020.9243404.

[20] A. Es-Saqy, S.-E. Didi, M. Fattah, S. Mazer ve M. El Bekkali, "Construction of a Current-Voltage Characteristic Tracer Using Microcontroller-Based Experimental Equipment for Educational Purposes," 2025 International Conference on Circuit, Systems and Communication (ICCSC), Fez, Morocco, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCSC66714.2025.11135124.

USE OF BLOCKCHAİN TECHNOLOGY İN DATA SECURİTY AND AUTHENTİCATİON

Taybe ALABED[1], Hakan TERZİOĞLU[2]

[1] Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
[2] Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

(248273002006@ogr.selcuk.edu.tr)
(hterzioglu@selcuk.edu.tr)

Abstract — Today, social media, banking applications, and emerging technologies are causing devices to generate vast amounts of data. The control, management, and secure sharing of this data are becoming increasingly important. Under the leadership of the financial sector, new perspectives and technologies are constantly being introduced into the fields of data storage and data management. One of the most recent and popular examples of this is Blockchain technology. Although it gained its greatest popularity through the cryptocurrency Bitcoin, it is evident that blockchain is not merely a virtual currency technology. This article provides an in-depth examination of blockchain technology, exploring its types, architecture, working principles, and areas of application. The findings of the study suggest that rapid adaptation to this security-focused, decentralized technology is essential.

Keywords— Blockchain, authentication, security, database, Cryptography, Digital Identity Management

INTRODUCTION

In the contemporary digital era, data security and identity authentication rank among the foremost priorities for both individuals and organizations. The widespread use of the Internet and digital services has created an environment where user data is shared more extensively than ever before. This has brought critical attention to issues such as the protection of personal data, the secure verification of identity information, and the prevention of unauthorized access. However, the vulnerabilities of existing centralized systems such as data breaches, identity theft, and security flaws have made it necessary to seek more secure alternative solutions.

We are living in a world undergoing a profound transformation driven by data[1]. Traditional database management systems have certain advantages and limitations, and these features have been extensively examined in numerous studies to date. Protecting data, especially against third-party access, has become a critical priority for both public institutions and the private sector. However, malicious actors' attack methods are constantly evolving, and even in systems considered secure, vulnerabilities are emerging[2]. As described by Nakamoto, blockchain is a distributed system in which every transaction is securely recorded and made accessible to all nodes within the network[3]. The concept of blockchain first emerged with the publication of the Bitcoin whitepaper on October 31, 2008 [4]. The term "blockchain" was first introduced in the article Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System[5], authored by Satoshi Nakamoto, whose real identity remains unknown. Considering its unique characteristics and the high level of security it offers, it can be argued that this technology stands ahead of others[6]. Blockchain is not merely a foundation for digital currencies like Bitcoin, but a transformative infrastructure that enables the secure and traceable transfer of any digital asset without the need for a centralized authority[7]

Defined as a decentralized protocol, blockchain allows data to be transferred securely and directly between parties, eliminating the need for third-party involvement[6]. The system is fundamentally composed of data blocks, each of which validates the preceding block to form a continuous blockchain structure[8]. Once the blocks are added to the chain, they cannot be altered or deleted by any single actor. Instead, they are verified and governed through automation and shared governance protocols[9]. The architecture of blockchain ensures that data, once recorded, cannot be altered retroactively. This immutability, combined with its decentralized nature, makes blockchain inherently secure[2]

Blockchain technology has garnered growing attention in recent years, owing to its inherent properties including decentralization, transparency, tamper-resistance, and the ability to ensure traceable and verifiable data[10]. Blockchain should not be viewed as a self-contained technology, but as a composite system built from diverse tools and techniques aimed at solving targeted issues[11]. Bitcoin is the first known application of blockchain technology, which forms the backbone of its decentralized transaction ledger[12]. Bitcoin utilizes the concept of blockchain as a solution to the absence of trusted third parties or intermediaries, such as financial institutions. This concept is grounded in Distributed Ledger Technology (DLT), which allows every participant in the network to access and verify the data recorded on the blockchain[13]. Furthermore, the emergence of innovative applications such as NFTs, DeFi, GameFi, and the Metaverse has significantly increased both the usage and perceived value of blockchain technology. In light of these developments, it is projected that blockchain will generate over USD 176 billion in business value by 2025, with this figure expected to rise to USD 3.1 trillion by 2030[14]. Blockchain is considered by many scholars and practitioners to have remarkable potential in both academic inquiry and industrial practice[15]. Blockchain is a system that verifies and stores all transactions between users through the network, ensuring data integrity and transparency. This technology can also be applied to the Internet of Things (IoT) domain[16]. However, low security levels and high operational and maintenance costs continue to hinder the development of the Internet of Things (IoT). Blockchain can communicate with various IoT-related devices, minimizing these challenges by enabling the implementation of a more secure and efficient smart architecture[17]. The blockchain network is utilized for data storage through a distributed structure. In contrast, traditional centralized computing systems typically store data in a single location. Although backups may exist at multiple points, this does not change the fact that the original data resides in a centralized system. Furthermore, backup systems generally contain snapshots of data considered valid only at specific intervals[18]. Blockchain technology ensures data security through cryptographic methods, offering a higher level of protection compared to conventional solutions. All interactions between devices within the network are secured, meaning that the data recorded in blocks is tamper-proof. Moreover, the use of public key infrastructure (PKI) provides enhanced protection, while the absence of a central server significantly reduces the risk of external attacks, thereby establishing a more reliable and resilient framework[14]. In addition, blockchain technology can be utilized to establish a secure identity verification system. This system enables the authentication of users based on their personal and biometric data[19]. Blockchain technology enables the creation of self-sovereign digital identities, allowing individuals to retain control over their personal data, enhance privacy, and reduce the risks of fraud and unauthorized access inherent in traditional centralized systems[20]. Blockchain technology offers groundbreaking innovations in identity verification processes. In particular, advanced techniques such as zero-knowledge proofs (ZKPs) most notably zk-SNARKs enable users to verify their identities without disclosing any personal information. This ensures that authentication can be performed securely while preserving user privacy and behavioral confidentiality[21]. Within the zero-trust paradigm, blockchain-based digital identity systems offer a secure and interoperable framework for user authentication, enabling real-time identity verification and privacy preservation across multi-organizational networks [22]. Rather than serving as a purpose-driven tool within specific sectors, digital identity management is rapidly evolving into a foundational infrastructure for digital interaction, with blockchain playing a central role in enabling this shift[23].

This article provides a comprehensive analysis of blockchain technology by first exploring its fundamental structure, operational principles, and application architecture. It then evaluates the technology's potential in enhancing data security and strengthening identity authentication systems through decentralized, tamper-resistant mechanisms. By doing so, the study aims to demonstrate how blockchain-based solutions can effectively address the limitations of traditional centralized systems in securing personal data and verifying digital identities..

LITERATURE REVIEW

The literature review has examined publications related to the use of blockchain technology in data security and identity verification. The findings indicate that blockchain not only has the potential to transform existing business domains but also to serve as the foundation for numerous new business opportunities in the future. The reviewed studies highlight the advantages, opportunities, and innovative applications offered by this emerging technology.

Blockchain has been rapidly adopted in sectors requiring decentralized data sharing, such as energy, finance, e-government, and cloud storage. Akleylek and Seyhan compare permissioned and permissionless blockchain types, emphasizing the benefits of transparency and immutability, while also acknowledging scalability and privacy challenges inherent to the technology[24] emphasize that blockchain technology is not limited to digital currencies, but also has significant applications in areas such as data security, transparency, and smart contracts. The study highlights that the true potential of blockchain has not yet been fully understood, and stresses the need for the development and widespread adoption of correct and effective implementations[3].

When comparing blockchain to traditional database systems, Yapıcı and colleagues find that blockchain offers superior transparency, security, fault tolerance, and transaction speed, despite some weaknesses in privacy compared to centralized databases. Their multi-criteria decision-making analysis positions blockchain as the most favorable alternative [25]. Furthermore, Ünal and Uluyol underline blockchain's advantages in transparency, security, and data integrity, noting its increasing use in healthcare, real estate, and public services beyond finance[2]. In public administration, blockchain has shown promise in reducing costs, enhancing security, and improving transparency, especially through the digitalization of government services. Babaoğlu and Karasoy observe a growing adoption of blockchain in digital identity management and data sharing within this sector [9]. Ceylan and Işık confirm blockchain's expanding role across finance, public services, healthcare, and e-government, highlighting its decentralized nature as a key factor for improved security, transparency, and efficiency. They also emphasize blockchain's effectiveness in supply chain management and protecting healthcare data [14]. A bibliometric analysis by Önder reveals a significant rise in blockchain-related auditing research since 2019, with China and the United States leading contributions. This study emphasizes blockchain's ability to enhance financial data accuracy via improved security, transparency, and automation in auditing [26].

Blockchain's role in decentralized identity verification has gained substantial attention. Liu et al. propose a system that combines zero-knowledge proofs (ZKPs) with peer review and multi-party audit frameworks to maintain user data "visible yet private," thus enhancing security and privacy [27]. Song and colleagues (2022) also highlight zkSNARKs as effective tools for privacy-preserving digital identity verification, enabling authentication without revealing personal details and mitigating identity fraud[21] Riadi et al. discuss blockchain's encryption and hashed data storage mechanisms, supported by smart contracts that facilitate automated and flexible identity verification[28] Li further explores integrating blockchain with various authentication methods, including password verification, PKI, and biometrics, to address vulnerabilities in traditional identity systems[29]. McCabe et al. develop an Ethereum-based authentication method to overcome weaknesses of conventional two-factor authentication, reinforcing digital security by recording user interactions directly on the blockchain[30]. Khanna, Gupta, and Sharma emphasize the

importance of decentralized digital identities enabled by blockchain, pointing out how transparency, security, and user control are enhanced while also identifying ongoing TECHNICAL challenges and future research directions[31].

The application of blockchain in IoT is increasingly studied. Sert proposes a blockchain-based IoT system for border security that ensures authentication and data integrity within wireless sensor networks[32]. Similarly, Türker and Tanyeri demonstrate blockchain's ability to secure data privacy and integrity in smart home IoT environments, preventing data loss during communications[33]. In the educational field, Amitkumar, Sanni, and Apriliasari suggest that blockchain can address centralized identity system vulnerabilities by providing secure, immutable, and transparent management of educational records, fostering trust among stakeholders[34]. Prethija et al. also explore blockchain's role in enhancing data protection during file transfers, combining AES encryption and SHA-256 hashing to prevent fraud, while critically acknowledging certain limitations[35]

The reviewed literature collectively acknowledges blockchain as a powerful tool for improving data security and identity verification across diverse domains. While its advantages in transparency, immutability, and decentralization are well-documented, ongoing challenges related to scalability, privacy, and regulatory compliance highlight areas for further research.

FUNDAMENTALS OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

Blockchain technology first emerged with the publication of the Bitcoin whitepaper in 2008 by an individual or group under the pseudonym Satoshi Nakamoto. The release of the first Bitcoin software in 2009 marked the practical implementation of this concept, combining the principles of distributed and decentralized systems with the idea of digital currency, thereby laying the foundation for blockchain technology[4]. A blockchain is a secure, shared, and distributed digital ledger that enables the recording and tracking of resources without relying on a centralized trusted authority. It facilitates peer-to-peer interactions in which transactions and decisions are validated collectively by the majority of network participants, rather than being controlled by a single centralized entity[36]. The concept of blockchain often associated with digital currencies resembles the transformative impact of the Internet, which emerged in the late 20th century. It is essential to understand blockchain not only in the context of digital money, but also through its core characteristics such as a distributed architecture, data security, and transparency, especially when combined with enabling technologies like consensus protocols, security mechanisms, and smart contracts[3].

One of the foundational aspects of blockchain technology is its decentralized and distributed architecture. The illustration below highlights the structural differences between centralized, decentralized, and distributed systems. While centralized systems rely on a single point of control posing significant risks of failure or attack distributed systems ensure that each node has equal access and authority over the data. This distributed structure enhances security, transparency, and data integrity, making blockchain a robust solution against unauthorized access and tampering.

Figure 1. Structural comparison of centralized, decentralized and distributed systems[37].

Blockchain technology is a protocol through which every contract, transaction, or payment can be digitally identified, verified, recorded, and shared. This system eliminates the need for centralized servers by directly connecting computers that facilitate information exchange between parties[38]. Each block in the blockchain contains three essential components: the cryptographic hash of the previous block, a timestamp, and the transaction data. Once the data is recorded, it becomes immutable and cannot be altered retroactively without modifying all subsequent blocks in the chain[39]. The transaction data stored on a local system is secured using blockchain technology through hashing. The generated hash is further protected by splitting it and storing the parts in two separate locations. During validation, one portion of the hash is retrieved from local storage, while the other is downloaded from the cloud. A new hash is then generated from the current IoT data and compared against the stored hash. If the hashes do not match, the data is considered invalid[39].

The blockchain system relies on a consensus mechanism to ensure that data is securely processed within a decentralized network. This mechanism enables nodes in the network to reach a common agreement without the need for a central authority. Additionally, similar consensus processes are employed in the lower layers of the system to maintain consistency. Through this system, a transaction is not considered valid unless it is verified and approved by other participating nodes in the network. Without consensus, the transaction is not added to the blockchain and is treated as invalid. Blockchain technology utilizes multiple distributed nodes to generate and update data, employs cryptographic techniques to ensure secure data transmission and access, and integrates smart contracts to regulate, restrict, and automate data interactions[34]. In this process, data is processed by different nodes within the network and recorded into blocks. To ensure overall system consistency, a consensus must be reached among the participating nodes regarding the validity of these blocks.

Each node participating in the blockchain network maintains a complete copy of the ledger. Even if certain nodes experience service anomalies or failures, the system as a whole can continue to function normally, ensuring operational resilience and data integrity[34]. His architecture prevents faults or malicious attacks on a single node from compromising the overall security of the system. The distributed structure of blockchain relies on the principle of majority consensus to maintain consistency, making the network highly resistant to censorship and manipulation.
.

THE ROLE OF BLOCKCHAIN IN DATA SECURITY

Blockchain technology introduces innovative solutions that go beyond traditional methods in ensuring data security. With its decentralized architecture, transparent transaction records, and immutability, it offers a robust alternative to address the vulnerabilities present in current digital systems. This section provides a comprehensive analysis of blockchain's impact on data security, focusing particularly on encryption techniques, security protocols, and resistance to data tampering. Through this examination, the reasons behind blockchain's growing reputation as a highly secure infrastructure compared to conventional systems will be explored.

Blockchain technology introduces innovative solutions that go beyond traditional methods in ensuring data security. With its decentralized architecture, transparent transaction records, and immutability, it offers a robust alternative to address the vulnerabilities present in current digital systems.

Blockchain Based Encryption and Protocols

Blockchain technology offers one of its greatest strengths through a robust cryptographic security infrastructure, enhancing the trustworthiness of both authentication mechanisms and data transfer operations. Hashed encryption

enables the storage of information in a secure, tamper-resistant cryptographic format, effectively safeguarding it from unauthorized access. This encryption method also facilitates efficient verification of data integrity, thereby enhancing the system's overall reliability and trust. In this regard, blockchain technology offers an ideal platform for managing Identity and Access Management (IAM) data while maintaining the highest levels of data security[40].

In addition, the data privacy provided by blockchain relies not only on encryption algorithms but also on advanced anonymization techniques and evidence-based security systems. Blockchain technology enables data anonymization and protection against tampering. In addition to its inherent cryptographic structure, various privacy-preserving technologies—such as side-channel protection, zero-knowledge proofs, homomorphic encryption, K-anonymity, secure multiparty computation, trusted execution environments, ring signatures, and differential privacy can be integrated to further enhance data security[41].

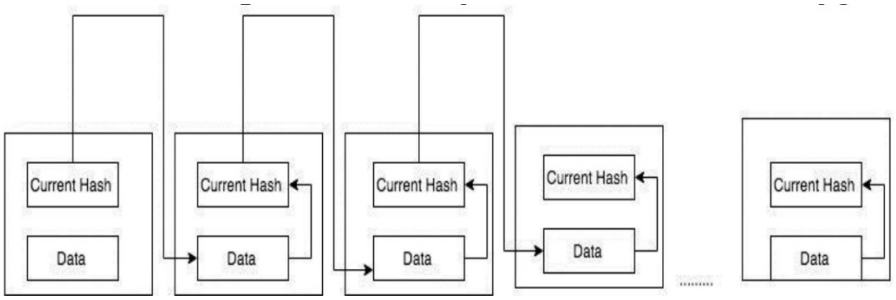
Encryption techniques are broadly classified into two main categories: symmetric and asymmetric algorithms. These two methods provide flexibility and adaptability across different data processing and security scenarios, depending on the specific requirements of the system. Symmetric encryption algorithms use the same key for both encryption and decryption processes. Common examples include DES, AES, and IDEA. In contrast, asymmetric encryption algorithms utilize a pair of keys a public key for encryption and a private key for decryption. Notable examples include RSA, ECC, and DSA. In the financial sector, blockchain technology is widely used to secure transactions and facilitate encrypted authentication in electronic payment systems[29]. The protection offered by Public Key Infrastructure (PKI) is particularly effective in preventing unauthorized access to financial data. By enabling authentication and integrity checks during data transmission, PKI contributes significantly to the establishment of secure communication environments. Cryptographic Security blockchain employs robust cryptographic methods to secure transactions and protect sensitive financial data. Transactions are encrypted using advanced algorithms to ensure confidentiality and integrity. The use of public-private key cryptography guarantees that only authorized parties can access and validate transactions, thereby significantly enhancing the privacy and security of financial information[42].

Moreover, blockchain-based identity authentication systems rely on strong cryptographic foundations, using asymmetric keys and digital signatures to ensure high levels of security. User data is not stored in any database controlled by a centralized authority. Instead, it is encrypted and stored on a decentralized blockchain, protected with strong security mechanisms and a transaction-specific hash value[43]. Similarly, encrypting digital identity components with private keys and reinforcing them with mechanisms such as zero-knowledge proofs not only limits data access but also places the user at the center of the authentication process.
Our approach uniquely integrates Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) to safeguard user data in contexts where plaintext interaction is unnecessary. The incorporation of ZKPs into Self-Sovereign Identity (SSI) mechanisms strengthens privacy during multiparty computations, ensuring that data remains usable yet invisible throughout its transmission and application[27]. Blockchain utilizes cryptographic techniques to secure data transmission and access, while smart contracts are employed to control and automate data operations. Identity data associated with a public key may include basic identifiers such as a name or email address, which can be cryptographically linked to more sensitive or detailed information stored within a private key[40].

Blockchain's Resistance to Data Tampering

Blockchain technology is considered one of the most resilient systems against data manipulation among current technologies. This resilience stems not only from cryptographic algorithms but also from the distributed, transparent, and immutable architecture of the system. Data is replicated and validated by all nodes in the network, and each transaction is permanently recorded by being cryptographically linked via a hash to the previous block. The chain is tamper-proof because each block is securely connected to its predecessor. One of the core mechanisms that ensures

the integrity and tamper-resistance of blockchain is the cryptographic linkage between blocks. Each block contains a hash of the previous block, creating a continuous and immutable chain. This structure makes it practically impossible to alter any recorded data without modifying all subsequent blocks, which would require consensus from the entire network.



Hash-Based Structure of Blockchain[35]

Due to this chained structure, once a transaction is added to the blockchain, it cannot be altered retroactively. Each transaction record is created solely through the consensus of all participating nodes in the network. The immutable ledger characteristic of blockchain guarantees that financial transactions remain tamper-proof and cannot be altered once recorded. As transactions can neither be modified nor deleted without achieving network consensus, blockchain significantly enhances the auditability, transparency, and accountability of financial operations[42].

Digital signatures play a crucial role in maintaining data integrity within the blockchain. Each transaction is digitally signed by the transaction owner using their private key, creating a unique and verifiable record within the system. To prevent double-spending attacks, digital signatures and transaction verification protocols serve as effective defense mechanisms. By assigning a unique digital signature to each transaction, the system ensures that a transaction can be executed only once by the sender, thereby maintaining the integrity of the blockchain[41]. Blockchain is a distributed ledger technology that enables data to be stored in a tamper-resistant and decentralized manner. Identity management systems built on blockchain enhance privacy and security by preserving data integrity and reducing reliance on centralized authorities[31]. The integration of IAM (Identity and Access Management) data into the blockchain through hashed encryption represents an effective method for securely maintaining historical access records. This approach enables seamless verification of data integrity, thereby enhancing the overall reliability and trustworthiness of the system.[40].

Blockchain technology benefits not only financial transactions but also personal data management. Within this decentralized architecture, user identity is securely stored in encrypted form, ensuring effective protection against unauthorized access.

Through this structure, no institution or third party can directly interfere with user data. As a result, trust within the system shifts from centralized authorities to individuals, meaning that trust is distributed across participants in the network. Users have full control over their identity data, with the ability to decide when, how, and with whom to share their personal information. Blockchain technology is particularly well-suited to support this model of user-centric identity management[27]. Moreover, the system not only serves for authentication purposes but also plays a crucial role in preserving user privacy, thereby offering a secure and privacy-focused digital identity infrastructure. Data manipulation is prevented not only at the content level but also in terms of access control. Through blockchain infrastructure, both the integrity of the data is maintained and unauthorized access is effectively restricted.

Blockchain ensures data immutability and fosters trust among participants by recording transactions with precise timestamps and digital signatures. Each block is cryptographically linked to its predecessor, and any attempt to alter data becomes immediately detectable, rendering tampering nearly impossible[44]. Finally, once a transaction is recorded on the ledger, its immutability is preserved both mathematically through cryptographic algorithms and

structurally through the network's consensus protocol. The hash of the previous block, combined with the current timestamp, forms a chronological chain of records. Any modification to the data in a previous block alters its hash, thereby breaking the continuity of the chain and rendering it invalid.

Applications of Blockchain in Healthcare, Finance, and Public Sector

In the financial sector, the high accuracy and transparency offered by blockchain technology fundamentally redefine transaction security, surpassing the limitations of traditional financial infrastructures. Global payment systems such as RippleNet actively utilize this technology to enable fast, reliable, and cost-efficient transaction processing.

RippleNet leverages blockchain technology along with its native cryptocurrency, XRP, to facilitate fast, cost-efficient, and transparent international transactions. The secure infrastructure of blockchain ensures the integrity of cross-border payments, thereby reinforcingtrust and confidence in the global financial ecosystem[29]. The manual KYC process, currently prevalent in the banking sector, is increasingly criticized for being costly, time-consuming, and redundant, issues which can be significantly mitigated through the adoption of blockchain technology[45]

In the healthcare sector, blockchain-based systems protect the privacy of patient information while enabling secure and transparent data sharing across different e-health services. As noted in recent studies, blockchain-based identity authentication is applied to verify and encrypt personal information and health records[29]. Due to its decentralized nature, blockchain technology provides a secure and efficient solution for managing electronic health records (EHRs), allowing patients and healthcare providers to exchange sensitive data without relying on a third party[46]

The COVID-19 pandemic exposed the limitations of centralized healthcare infrastructures, while simultaneously highlighting the potential of blockchain technology to offer decentralized and secure solutions for telehealth and remote diagnostic systems. Although the pandemic accelerated the adoption of remote eHealth technologies such as Telehealth, their centralized identity management structures hinder the interoperability of patient and healthcare provider identities across different platforms[27].

These identity authentication systems allow both patients and healthcare professionals to safely and transparently authenticate themselves across various eHealth platforms. Decentralized authentication within a distributed healthcare network, enabled by blockchain, ensures secure identity verification across diverse systems[43].

In public services, blockchain strengthens the security of open data systems by enhancing data accuracy, access control, and institutional transparency. Companies are protecting personal identities and business data by ensuring that only the right individuals receive appropriate access rights. In this context, blockchain offers the potential to deliver highly secure, accessible, and cost-efficient identity and access management processes compared to existing centralized solutions[42]. Moreover, in public sector operations, secure and tamper-proof chains of records play a critical role in preventing data manipulation. Blockchain may provide trust to third parties overseeing transactions between buyers and sellers by verifying the authenticity of data and information, thus contributing to process transparency and accountability[28].

In the field of education, blockchain technology enables the secure storage of student records and ensures transparent verification processes. As demonstrated in recent studies, the integration of cryptographic technologies with a blockchain-based infrastructure can function effectively in managing transactional data within school systems[28].

In the public sector, blockchain offers significant potential for enhancing transparency, reducing corruption, and improving the efficiency of administrative processes.

Blockchain's decentralized and immutable infrastructure enables public organizations to enhance data security, streamline operations, and introduce innovative services, making it a potential catalyst for digital transformation in the public sector[47]. With applications spanning across sectors such as finance, healthcare, logistics, and education, blockchain technology has emerged as one of the most reliable tools for data protection and verification, owing to its decentralized trust architecture.

THE ROLE OF BLOCKCHAIN IN IDENTITY VERIFICATION

As digital interactions become increasingly integrated into daily life, the limitations of traditional identity verification systems such as centralized control, susceptibility to breaches, and lack of user autonomy have become more apparent. In response to these challenges, blockchain technology offers a promising framework for secure, decentralized, and privacy-preserving identity verification. This section explores how blockchain supports modern identity management models, focusing on Decentralized Identity (DID), Self-Sovereign Identity (SSI), and the efficiency and privacy gains achievable through blockchain-based authentication systems.

Understanding Decentralized Identity (DID)

Traditional identity authentication systems rely heavily on centralized infrastructures, which introduce numerous risks such as data breaches, single points of failure, and high administrative costs.
As a response to these challenges, Decentralized Identity (DID) systems have been developed, enabling individuals to create and verify their identities without depending on a central authority.

In this context, blockchain technology provides an ideal infrastructure for DID, as it allows data to be stored in a secure, immutable, and verifiable manner through its decentralized ledger architecture. Decentralized identity verification involves using personally identifiable information (PII) and other credentials to generate identity data, which is stored in a decentralized system. Blockchain provides an ideal infrastructure for storing such identity data in a verifiable and tamper-resistant manner, ensuring trust without reliance on a central authority[43].

This model allows users to share only the necessary amount of information, thereby preserving the principles of data minimization and privacy. Decentralized identity management has gained significant attention in both academia and industry, as it enables individuals to share only the relevant portions of their personally identifiable information with service providers for the purpose of digital identity verification[43].

In the DID infrastructure, the user is both the owner and controller of their digital identity. Each individual manages their own private key, chooses when and with whom to share their identity, and retains the ability to revoke access at any time. In this regard, blockchain technology offers a robust solution to the challenge of creating a secure, tamper-stant, and user-owned digital identity[44].

To fully understand how Decentralized Identifiers (DIDs) function, it is essential to examine their underlying architecture. A DID system is composed of several interconnected components including the DID subject, the DID document, and the verifiable data registry where the identifier and its metadata are recorded. These components work together to ensure that identity information can be securely verified, referenced, and controlled without relying on centralized intermediaries. The diagram below provides a simplified illustration of how these elements interact within a decentralized identity framework.

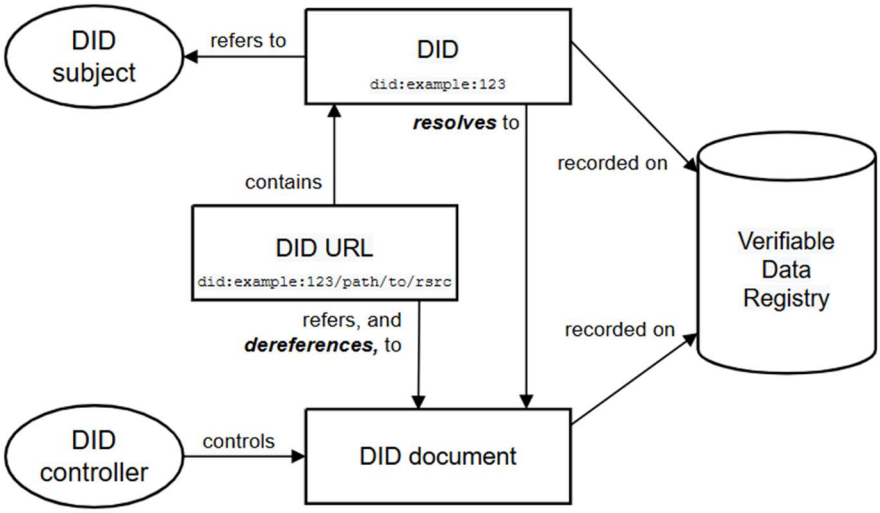


Figure 2. Structural overview of a Decentralized Identifier (DID) system[48].

The transparency, immutability, and cryptographic security provided by blockchain constitute the foundational pillars of Decentralized Identity (DID) systems. As a result, users gain the ability to manage, authenticate, and control their digital identities without reliance on a centralized identity provider.

Self-Sovereign Identity

Self-Sovereign Identity (SSI) represents a more advanced stage of decentralized identity, granting individuals full ownership and control over their identity data. Unlike traditional identity verification systems that rely on centralized authorities and are prone to privacy risks and data breaches, blockchain enables self-sovereign identity models where users retain complete control over their personal data[49]. Through this framework, users determine what information is shared, with whom, when, and to what extent without any centralized authority overseeing or managing the process. Self-sovereign identity (SSI) refers to the concept of a lifetime portable identity controlled entirely by the individual. Users decide who can access specific parts of their identity data. For instance, a credential proving age can be selectively disclosed without revealing any additional personal information such as name or address[40]

In SSI systems, identity data is typically stored locally on the user's device or in a secure location defined by the user, which enhances both privacy and access efficiency. The core principles of SSI include decentralization, user autonomy, and privacy protection. Blockchain technology emerges as a suitable and reliable infrastructure to fulfill these requirements. Systems such as uPort and Sovrin represent practical implementations of the Self-Sovereign Identity (SSI) framework. uPort is an application built on the Ethereum blockchain that enables users to create, store, and manage their own digital identities. Users have full control over the creation of their uPortID and can decide when, how, and with whom to share their personal information, while retaining continuous access to their data at all times[27].

Sovrin is a system built entirely upon the philosophy of self-sovereign identity, providing an infrastructure where digital identities cannot be revoked by any central authority. By utilizing blockchain to store distributed identity data, Sovrin ensures that the keys to identity credentials are generated and stored on the client side. This architecture makes the system immune to censorship, as no centralized entity has the power to interfere with or revoke user identities[27]. Self-Sovereign Identity (SSI) is a revolutionary approach to identity management that empowers individuals with full ownership and control over their personal data in the digital age. The TECHNICAL foundation

of this paradigm is provided by blockchain technology, with its secure, decentralized, and tamper-resistant architecture.

To better understand the structure and functionality of Self-Sovereign Identity (SSI) systems, it is important to explore the conceptual and operational dimensions that define them. SSI encompasses a range of functional and non-functional requirements, credential management processes, and system design principles, all of which aim to place the user at the center of digital identity control. The taxonomy presented below categorizes these elements into a comprehensive framework, highlighting the key TECHNICAL and theoretical pillars that support SSI implementation.

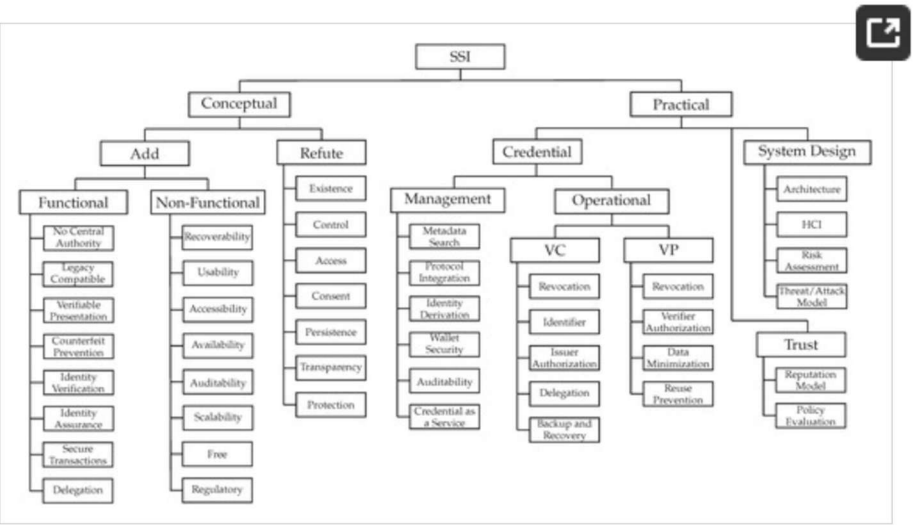


Figure 3. Taxonomy of Self-Sovereign Identity (SSI)[50]

Efficiency and Privacy in Blockchain-Based Identity Systems

Blockchain technology underpins identity authentication systems that prioritize not only security but also speed and privacy. In these decentralized models, personal data is retained by the user, and transactions proceed only through selective disclosure of permissioned data. As noted in [43] Blockchain-based decentralized identity systems ensure that users are not identified by a centralized third party... enabling secure identity verification in distributed systems.

Users and institutions can mutually perform identity verification through encrypted hashes. This method eliminates data leaks and delays commonly observed in traditional systems. ShoCard is a blockchain-based digital identity and verification platform. Users' identity information is stored on the blockchain as signed encrypted hashes This method allows users and third-party entities to securely and verifiably confirm each other's identities[27]. Blockchain-based identity verification systems are built around cryptographic principles that allow individuals to securely authenticate without compromising sensitive data. Blockchain-based identity verification systems offer a more secure, efficient, and privacy-preserving solution compared to traditional methods, by enabling individuals to manage and control their own personal data without relying on centralized authorities

As illustrated in Figure 4, blockchain-based KYC processes enable users to store identity documents on a decentralized ledger and authorize institutions to access this data through permissioned, tamper-proof interactions. Once a bank verifies the KYC data and stores its status on the blockchain, other institutions can seamlessly retrieve

and verify the same data with user consent. This approach not only streamlines the verification process but also enhances data privacy and interoperability across platforms.

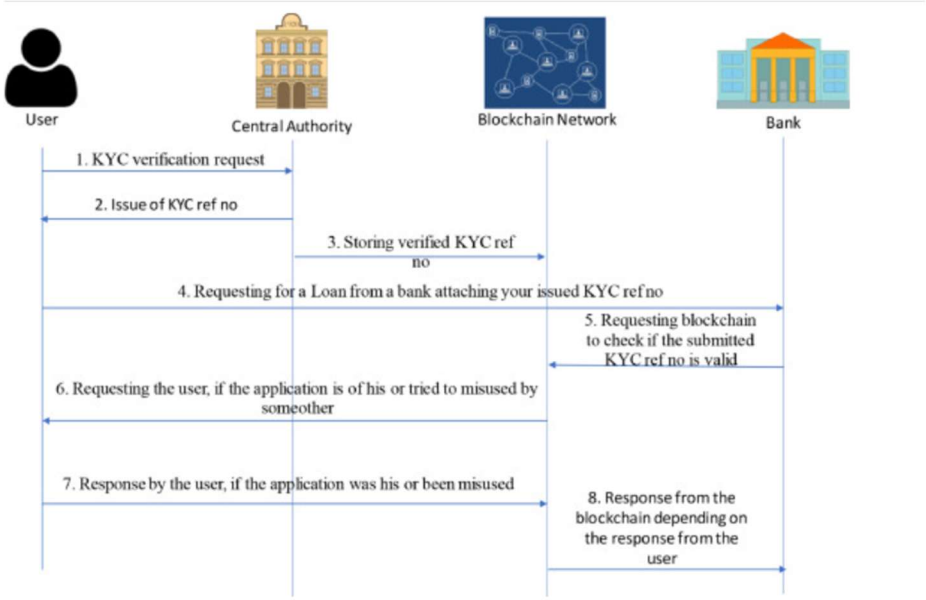


Figure 4. Decentralized KYC verification using blockchain[51]

The cryptographic proofs used in this process ensure that the data remains both accurate and confidential. In particular, this structure is directly controlled by the user under the Self-Sovereign Identity (SSI) model. In the Self-Sovereign Identity (SSI) model, identity management is fundamentally restructured around individual control and cryptographic assurance. Rather than relying on centralized entities, SSI systems allow users to store and share verifiable credentials using decentralized technologies. As noted in recent literature, The SSI model... provides cryptographic evidence of the entire issuance and usage process. The use of strong cryptography ensures that the ownership and control of this identity remain with the individual[40]. This model not only enhances privacy and data integrity but also empowers individuals to selectively disclose information while maintaining full control over their digital identities.

One of the most practical benefits of decentralized identity systems is speed. Unlike traditional Single Sign-On (SSO) solutions that rely on a central identity provider, blockchain-based models allow users to authenticate across multiple platforms using a single identity structure instantly and without delay. As noted in the literature, An SSO mechanism using blockchain could be based around a similar principle to OpenID, however there would be no central identity provider[40]. This not only reduces authentication latency but also removes a critical point of failure, enhancing both efficiency and security.

Thus, blockchain enables a user-centered identity framework and delivers an authentication infrastructure that surpasses conventional systems in terms of security, speed, and scalability.

ADVANTAGES AND CHALLENGES OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

While blockchain technology is often praised for its promise of enhanced security, transparency, and decentralization, it is not without its complications. From performance bottlenecks to regulatory uncertainty, several barriers still hinder its seamless integration into mainstream systems. The following analysis delves into both the merits and the critical shortcomings of blockchain, offering a comprehensive perspective on its practical viability.

Data Security and Authentication Advantages

Blockchain technology plays a revolutionary role in the domains of data security and identity authentication. Its decentralized architecture, combined with immutable recordkeeping and cryptographic signing mechanisms, significantly enhances data protection for both individuals and institutions. One of its most notable advantages is the ability to store personal information securely without reliance on a centralized authority. Indeed, blockchain-based solutions offer a secure and user-centric approach to identity management and authentication. When applied to identity systems, blockchain can greatly improve the efficiency, security, and privacy of financial transactions. Common vulnerabilities of traditional centralized identity systems such as identity theft, system breaches, and data loss can largely be mitigated through the distributed and encrypted structure offered by blockchain technology. Blockchain is a distributed ledger system that enables decentralized and tamper-resistant management and storage of data. This approach makes it possible to establish user-centered, transparent, and secure digital identities[31]. For example, the BioZero protocol demonstrates that decentralized biometric authentication on open blockchains can achieve both high security and efficiency, while preserving user privacy through cryptographic techniques such as Pedersen commitments and zero-knowledge proofs[52]. Blockchain technology, with its transparency, immutability, and decentralization, offers a robust solution to the long-standing issues in identity management systems, including data insecurity, fragmented digital identities, and the prevalence of fake identities[53].

The benefits of blockchain-based identity management extend beyond security; they also include significant improvements in user control, data portability, and interoperability across platforms. This enables individuals to safely utilize their identities across various systems, retain full ownership, and transfer their data as needed without dependency on centralized providers . Users maintain full control over their personal data and have the authority to determine who can access which information. This approach significantly enhances user autonomy and privacy, thereby empowering individuals in the management of their digital identity[31]. By leveraging blockchain's decentralized and tamper-proof architecture, identity authentication systems can offer enhanced privacy and data integrity, especially in environments where secure personal verification is critical[54]. The proposed blockchain-based authentication framework significantly reduces dependency on centralized certificate authorities, enabling rapid identity verification and revocation through a shared ledger architecture that enhances scalability, efficiency, and privacy in vehicular networks[55].

In the financial sector, the benefits of blockchain technology are particularly evident. It helps reduce fraud attempts and enhances inter-institutional trust through its ability to record transparent transaction histories. Indeed, the application of blockchain in financial systems has the potential to usher in a new era of trust, transparency, and efficiency in financial transactions[42].

Limitations Related to Performance, Sustainability, and Legal Compliance

Despite its numerous advantages, blockchain technology faces significant challenges in terms of scalability and practical deployment in large-scale systems. As the number of transactions increases, network congestion may occur, leading to delays, higher transaction fees, and reduced efficiency. Furthermore, the energy-intensive nature of certain consensus mechanisms raises environmental concerns, particularly regarding sustainability[42].

In systems with high workloads, blockchain networks often experience performance bottlenecks due to network congestion. This presents a particular challenge in applications that require rapid transaction processing, such as identity authentication. Moreover, the integration of additional security mechanisms may further increase the complexity and resource demands of blockchain-based systems[41]. Energy consumption remains a critical concern in blockchain technologies. Consensus mechanisms such as Proof-of-Work (PoW) require immense computational

power, contributing to a larger carbon footprint and posing risks to environmental sustainability. Research indicates that blockchain-based data storage could demand 1 to 10^3 times more storage capacity than current systems[40].

Regulatory challenges remain a significant barrier to the widespread adoption of blockchain technology. In particular, achieving full compliance with data protection laws such as the General Data Protection Regulation (GDPR) and financial oversight regulations proves difficult due to the decentralized and immutable nature of blockchain systems. Furthermore, the absence of clear and consistent regulatory frameworks in many jurisdictions hinders the advancement and adoption of blockchain in critical sectors such as finance. Therefore, policymakers must collaborate closely with industry stakeholders to develop comprehensive and practical legal frameworks[42].

The General Data Protection Regulation (GDPR) of the European Union emphasizes individual control over personal data. In particular, Articles 17 to 21 grant EU citizens extensive rights, including the ability to rectify, restrict, port, and erase their personal data also known as the "right to be forgotten. However, these rights conflict directly with one of blockchain's core features: immutability. As a result, achieving full GDPR compliance represents one of the most significant challenges for blockchain-based systems[40].

In this context, the future success of blockchain technology will depend not only on TECHNICAL advancements, but also on the development of innovative and viable solutions in areas such as legal compliance, environmental sustainability, and decentralized governance.

CONCLUSION

In this study, the basic structure of blockchain technology, its working principles and especially its role in data security and identity verification processes have been examined in detail. This technology, which stands out with its decentralized, transparent and unchangeable structure, has the potential to significantly reduce the security vulnerabilities faced by traditional systems. Blockchain protects data integrity and prevents unauthorized access thanks to cryptographic algorithms and distributed ledger architecture.

Innovative approaches such as Self-Sovereign Identity (SSI) and Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) offered by blockchain technology in identity verification processes offer secure and user-centered solutions by prioritizing user privacy. Thus, individuals can share only the necessary information while fully controlling their personal data. The application areas covered in the article finance, healthcare, public services and education—reveal the sectoral diversity and future potential of blockchain technology. However, significant challenges such as performance constraints, energy consumption and compliance with legal regulations also draw attention. In particular, the contradictions between the European Union's GDPR regulations and the immutability principle of blockchain necessitate further investigation of the legal dimension of this technology.

As a result, blockchain technology offers revolutionary solutions in data security and identity verification processes. However, the full realization of this potential requires simultaneous advances in areas such as sustainability, regulatory compliance and the establishment of global standards, as well as TECHNICAL developments.

REFERENCES

1. Shrier, D., W. Wu, and A. Pentland, *Blockchain & infrastructure (identity, data security).* Massachusetts Institute of Technology-Connection Science, 2016. **1**(3): p. 1-19.

2. Ünal, G. and Ç. Uluyol, *Blok zinciri teknolojisi.* Bilişim Teknolojileri Dergisi, 2020. **13**(2): p. 167-175.
3. Tanrıverdi, M., M. Uysal, and M.T. Üstündağ, *Blokzinciri teknolojisi nedir? ne değildir?: alanyazın incelemesi.* Bilişim Teknolojileri Dergisi, 2019. **12**(3): p. 203-217.
4. Ünsal, E. and Ö. Kocaoğlu, *Blok zinciri teknolojisi: Kullanım alanları, açık noktaları ve gelecek beklentileri.* Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2018(13): p. 54-64.
5. Nakamoto, S., *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.* 2008.
6. Ber, A.S., *Blokzincir (Blockchain) Teknolojisi Kapsamında Elektronik Çek.* Journal of Marine and Engineering Technology, 2022. **2**(1): p. 1-20.
7. Kırbaş, İ., *Blokzinciri teknolojisi ve yakın gelecekteki uygulama alanları.* Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2018. **9**(1): p. 75-82.
8. Usta, A. and S. Doğantekin, *Blockchain 101 v2.* İstanbul: Bankalararası Kart Merkezi, 2018.
9. Babaoğlu, C. and H. Karasoy, *Kamu yönetiminde blokzincir: kullanım alanları ve örnek uygulamalar.* Sosyoekonomi, 2022. **30**(52): p. 283-297.
10. and Communication Networks, S., *Retracted:: Digital Identity Verification and Management System of Blockchain-Based Verifiable Certificate with the Privacy Protection of Identity and Behavior*. 2024, Hindawi.
11. Rejeb, A., E. Sűle, and J. G Keogh, *Exploring new technologies in procurement.* 2018.
12. Milković, M., J. Samardžija, and M. Ognjan, *Application of blockchain technology in media ecology.* Croatian Scientific Bibliography, 2020. **26**(1): p. 29-52.
13. Rejeb, A. and K. Rejeb, *Blockchain and supply chain sustainability.* Logforum, 2020. **16**(3).
14. Ceylan, O. and A.H. Isık, *BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ VE UYGULAMA ALANLARI.* Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi, 2023. **6**(1): p. 129-154.
15. Monrat, A.A., O. Schelén, and K. Andersson, *A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities.* Ieee Access, 2019. **7**: p. 117134-117151.
16. Singh, S., A.S. Hosen, and B. Yoon, *Blockchain security attacks, challenges, and solutions for the future distributed iot network.* Ieee Access, 2021. **9**: p. 13938-13959.
17. Mendi, A.F., *Blokzincir mimarisi ve getirdiği fırsatlar.* Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2021(29): p. 181-186.
18. Beştaş, M., *Elektronik Posta Sistemine Üçüncü Taraf Güveni Gerektirmeyen Bir Çözüm Önerisi.* İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi, 2023. **12**(1): p. 393-418.
19. Yalçınkaya, B., et al., *Bilgi Yönetimi Ve Bilgi Güvenliği: eBelge-eArşiv-eDevlet-Bulut Bilişim-Büyük Veri-Yapay Zekâ.* 2019.
20. Hernández, V.G.S., *Blockchain and the Future of Secure Digital Identity.* 2018.
21. Song, Z., et al., *[Retracted] Digital Identity Verification and Management System of Blockchain-Based Verifiable Certificate with the Privacy Protection of Identity and Behavior.* Security and Communication Networks, 2022. **2022**(1): p. 6800938.
22. Wang, F., Y. Gai, and H. Zhang, *Blockchain user digital identity big data and information security process protection based on network trust.* Journal of King Saud UNIVERSITY-Computer and Information Sciences, 2024. **36**(4): p. 102031.
23. Zwitter, A.J., O.J. Gstrein, and E. Yap, *Digital identity and the blockchain: universal identity management and the concept of the "Self-Sovereign" individual.* Frontiers in Blockchain, 2020. **3**: p. 26.
24. Akleylek, S. and K. Seyhan, *Blok Zinciri Bileşenleri ve Uygulamaları Üzerine Bir Derleme.* İnformasiya Təhlükəsizliyinin Aktual Multidissiplinar Elmi-Praktiki Problemləri, IV Respublika Konfransı Bildiri Kitabı, 2018.
25. Yapıcı, S., et al., *BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ İLE MERKEZİ VE DAĞITIK VERİ TABANININ KARŞILAŞTIRILMASI.* Endüstri Mühendisliği, 2021. **32**(3): p. 457-472.
26. Önder, Ş., *BLOK ZİNCİR VE DENETİM ÜZERİNE YAPILMIŞ MAKALELERİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ.* Ida Academia Muhasebe ve Maliye Dergisi, 2025. **8**(1): p. 1-12.
27. Liu, J., Z. Liang, and Q. Lyu, *Empowering Privacy Through Peer-Supervised Self-Sovereign Identity: Integrating Zero-Knowledge Proofs, Blockchain Oversight, and Peer Review Mechanism.* Sensors, 2024. **24**(24): p. 8136.
28. Riadi, I., A. Ifani, and R. Kusuma, *Optimization and Evaluation of Authentication System using Blockchain Technology.* Emerging Science Journal, 2022. **4**: p. 225-240.
29. Zhang, S., C. Tian, and B. Li, *A review of identity authentication based on blockchain technology.* Comput. Sci, 2023. **50**: p. 329-347.
30. McCabe, C., A.I.C. Mohideen, and R. Singh, *A Blockchain-Based Authentication Mechanism for Enhanced Security.* Sensors, 2024. **24**(17): p. 5830.
31. Khanna, H., G. Gupta, and H. Sharma, *Investigating Identity Management and Authentication Solutions Using Blockchain Technology.* Available at SSRN 4922025, 2024.
32. Sert, S.A., *Sınır güvenliği için etkin ve güvenli bir çözüm–Blokzincir tabanlı nesnelerin interneti.* Savunma Bilimleri Dergisi, 2023. **2**(43): p. 493-517.

33. Türker, G.F. and K. Tanyeri, *Blokzincir Teknolojisi ile Nesnelerin İnterneti Tabanlı (IoT) Sistemlerin Veri Güvenliğinin Sağlanması.* Gazi UNIVERSITY Journal of Science Part C: Design and Technology, 2024: p. 1-1.
34. Sanni, M.I. and D. Apriliasari, *Blockchain technology application: Authentication system in digital education.* Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT), 2021. **3**(2): p. 151-163.
35. Nivethini, P., et al., *Data security using blockchain technology.* International Journal of Advanced Networking and Applications, 2019: p. 279-282.
36. Salman, T., et al., *Security services using blockchains: A state of the art survey.* IEEE communications surveys & tutorials, 2018. **21**(1): p. 858-880.
37. Baars, D., *Towards self-sovereign identity using blockchain technology*. 2016, UNIVERSITY of Twente.
38. Topcu, B.A. and S.S. Sarıgül, *Dünyada ve Türkiye'de blok zinciri teknolojisi: finans sektörü, dış ticaret ve vergisel düzenlemeler üzerine genel bir değerlendirme.* Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2020: p. 27-39.
39. Kumari, S. and S. Farheen. *Blockchain based data security for financial transaction system*. in *2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. 2020. IEEE.
40. Ghadge, N., *Use of blockchain technology to strengthen identity and access management (IAM).* International Journal of Information TechnologyMarch, 2024. **1**(3).
41. Xu, Y., et al., *A survey of the fusion of traditional data security technology and blockchain.* Expert Systems with Applications, 2024: p. 124151.
42. Jimmy, F., *Enhancing Data Security in Financial Institutions With Blockchain Technology.* Journal of Artificial Intelligence General science (JAIGS) ISSN: 3006-4023, 2024. **5**(1): p. 424-437.
43. Sultanpure, K.A.G., Subham; Gawale, Sudarshan; Walunj, Harshal; Shivsharan, Gauri, *Blockchain Based Decentralized User Identity Verification System.* International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2024. **12**: p. 1935–1939.
44. Gunuganti, A., *Blockchain-Based Identity Verification (Decentralized Identity Verification).* International Journal of Core Engineering & Management, 2023. **7**(7): p. 1-13.
45. Patil, P. and M. Sangeetha, *Blockchain-based decentralized KYC verification framework for banks.* Procedia Computer Science, 2022. **215**: p. 529-536.
46. Ghosh, P.K., et al., *Blockchain application in healthcare systems: a review.* Systems, 2023. **11**(1): p. 38.
47. Sousa, M.J., *Blockchain as a driver for transformations in the public sector.* Policy Design and Practice, 2023. **6**(4): p. 415-432.
48. Reed, D., et al., *Decentralized identifiers (dids) v1. 0.* Draft Community Group Report, 2020.
49. Mandru, S., *BLOCKCHAIN-BASED IDENTITY VERIFICATION (DECENTRALIZED IDENTITY VERIFICATION).* International Journal of Core Engineering & Management, 2020. **6**(10).
50. Schardong, F. and R. Custódio, *Self-sovereign identity: a systematic review, mapping and taxonomy.* Sensors, 2022. **22**(15): p. 5641.
51. Sai, B.D.S., et al., *A decentralised KYC based approach for microfinance using blockchain technology.* Cyber Security and Applications, 2023. **1**: p. 100009.
52. Lai, J., et al., *BioZero: An Efficient and Privacy-Preserving Decentralized Biometric Authentication Protocol on Open Blockchain.* arXiv preprint arXiv:2409.17509, 2024.
53. Dash, B. and P. Sharma, *Digital Identity and Authentication in the Blockchain Era.* Available at SSRN 4567733, 2021.
54. Li, J., *A review of identity authentication based on blockchain technology.* Applied and Computational Engineering, 2024. **30**: p. 173-178.
55. Malik, N., et al. *Blockchain based secured identity authentication and expeditious revocation framework for vehicular networks*. in *2018 17th IEEE international conference on trust, security and privacy in computing and communications/12th IEEE international conference on big data science and engineering (TrustCom/BigDataSE)*. 2018. IEEE.

A COMPREHENSIVE REVIEW OF THE HARRIS HAWKS OPTIMIZATION ALGORITHM: STRUCTURE, APPLICATIONS AND ETHICAL PERSPECTIVES

Taybe ALABED[1], Hakan TERZİOĞLU[2]

[1] Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
[2] Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

(248273002006@ogr.selcuk.edu.tr)
(hterzioglu@selcuk.edu.tr)

Abstract - The Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm, inspired by the cooperative hunting strategy of Harris hawks, has garnered considerable attention for its effectiveness in addressing complex, nonlinear, and multidimensional optimization problems. Since its introduction in 2019, numerous enhanced variants have been proposed to overcome limitations such as premature convergence and entrapment in local optima. This comprehensive review systematically examines the theoretical foundations, dynamic mechanisms, and mathematical structure of the original HHO algorithm, alongside a wide array of its improved versions. It synthesizes findings from over 70 peer reviewed studies, highlighting applications in engineering design, machine learning, image processing, energy systems, and wireless sensor networks. Special attention is paid to multi-objective extensions and hybrid models, which demonstrate superior performance in real-world scenarios. Furthermore, the paper provides a critical ethical assessment of HHO related literature, evaluating transparency, citation integrity, methodological fairness, and reproducibility. The insights gained serve as a foundation for future research and cross disciplinary algorithmic development.

Keywords - Harris Hawks Optimization (HHO), Swarm Intelligence, Hybrid Optimization Models, Benchmarks, Engineering Design

INTRODUCTİON

In contemporary science and engineering, numerous problems exhibit nonlinear, multidimensional, constrained, or uncertain characteristics, rendering them difficult to solve using classical deterministic algorithms. The limitations of traditional techniques become particularly evident when such problems involve multiple solution spaces and local minima[1]. In this context, nature-inspired metaheuristic algorithms have garnered increasing attention in recent years due to their ability to effectively address these complex optimization problems [2, 3].

Metaheuristic algorithms, typically population-based and stochastic in nature, are designed by drawing inspiration from biological, physical, or social systems found in nature. Their primary advantages include independence from prior problem-specific knowledge, no requirement for derivative information, and flexibility in solving both discrete and continuous problems[4]. Recently, numerous nature-based algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO)[5], Grey Wolf Optimization (GWO)[6], Genetic Algorithms (GA)[7], Sine-Cosine Algorithm (SCA)[8], Slime Mould Algorithm (SSA)[9] and Harris Hawks Optimization (HHO)[1] have been proposed and have shown promising results [10, 11]

A significant subset of these nature-inspired methods is swarm intelligence algorithms, which are modeled after collective behaviors emerging from simple interactions among individuals. The central philosophy behind these algorithms is that complex tasks can be solved through information sharing among the members (agents) of a population [12]. One of the core strengths of swarm

intelligence approaches is their ability to balance exploration and exploitation effectively, allowing for comprehensive search space coverage[2]. Among these, the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm proposed in 2019 by Ali Asghar Heidari and his colleagues stands out as a powerful technique that mathematically models the cooperative hunting behavior of predatory Harris hawks[1]. The HHO algorithm incorporates both exploration and exploitation phases within a dynamic framework. The hawks' ability to adapt their strategy based on the prey's energy level provides the algorithm with a flexible balancing mechanism [3]. Featuring four distinct attack strategies (e.g., soft besiege, hard besiege, soft besiege with progressive rapid dives), the algorithm demonstrates strong capability in attaining both local and global optima[12]. Despite the original HHO algorithm's effectiveness across numerous benchmark functions, it has shown some limitations, such as premature convergence and entrapment in local minima. To overcome these drawbacks, various improved variants have been proposed in the literature. Approaches such as Gaussian chaotic mapping, sine-cosine strategies, SSA integration, and quasi-reflected learning have enhanced convergence speed and solution accuracy[4, 13, 14]. The HHO algorithm has demonstrated applicability across a wide range of domains, including engineering design, renewable energy systems, biomedical signal processing, image segmentation, hyperparameter optimization in deep learning networks, and feature selection for complex problems[2, 10].

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents a detailed literature review, including improved variants of the HHO algorithm, its multi-objective adaptations, and engineering applications. Section 3 explains the behavioral and mathematical foundations of the original HHO algorithm, covering its exploration and exploitation strategies. Section 4 discusses recent applications in machine learning, image processing, networking, and energy systems, along with comparative benchmark analyses. Section 5 addresses ethical considerations in HHO-related studies, emphasizing transparency, fairness, and reproducibility. Finally, the paper concludes with a summary of key insights and proposes future research directions.

2. Literature Review

2.1. Improved Variants of HHO

The core structure of the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm is based on maintaining a balance between exploration and exploitation phases. However, in order to enhance the performance of the original algorithm, various improved variants have been proposed. For instance, the Gaussian HHO (GHHO) algorithm introduced by Chong and Yuan integrates Gaussian chaotic mapping and cosine strategies to initialize the population more uniformly, thereby improving convergence performance [13]. Gezici and Livatyali contributed by integrating different chaotic maps into HHO, increasing exploration diversity and boosting efficiency in engineering problems[15]. Another variant, CM-HHO, aims to reduce the problem of local optima entrapment through the incorporation of Cauchy mutation[16]. The HHO-IE variant, which embeds an information exchange-based approach into the algorithm, has yielded more balanced and stable solutions in engineering design tasks by facilitating inter-agent solution sharing[17].

Among other enhanced versions, Dynamic HHO with Mutation improves the exploration-exploitation trade-off via dynamic mutation mechanisms and has demonstrated success particularly in image segmentation tasks involving satellite and oil spill imagery[18]. The Hybrid HHO-DE variant utilizes parallel subpopulation training with Differential Evolution (DE), achieving high accuracy in complex tasks like multi-level image segmentation [19]. Targeting feature selection problems specifically, the HHOBSA algorithm enhances search depth and global optimality by employing bit-level selection and simulated annealing techniques[20]. Notable models such as Elite OBL-HHO (EOBL-HHO) and Hybrid OBL-HHO have utilized opposition-based learning strategies to guide the population more swiftly toward optimal solutions, achieving superior performance in dimensionality reduction tasks [21, 22]. Furthermore, hybrid variants such as QRHHO, hHHO-SCA, and hHHO-IGWO integrated with QRBL, SCA, and IGWO respectively have demonstrated improved exploration-exploitation balance across 23 to 65

benchmark functions [10, 23, 24]. Additional variants like Salp Swarm HHO[4], Boosted HHO[25], Improved HHO[26] and Hybrid GWO-HHO[27] have combined the HHO framework with techniques such as Salp optimization, flower pollination, simulated annealing, deterministic location selection, and grey wolf optimization, showing applicability across diverse engineering and energy system domains. Particularly, the CMDHHO (Chaotic Multi-strategy DE-HHO) model merges particle swarm optimization, chaotic maps, and mutation operators to address the issue of local minima, showing effectiveness across 30 benchmark functions and 8 real-world datasets [28]. The HHO-FORM model has been applied in reliability analysis within structural engineering, while the HHO-MCE-MCET algorithm has been developed to determine optimal thresholding in image processing problems[29, 30]. Additional variants such as MOHHO[31], CHHO[32], GBHHO[33], HHO-ConvNet[34], HHO-RF[35] and MHHGWO[27] have been employed in environmental modeling, classification, geoTECHNICAL engineering, solar energy systems, and ANFIS optimization. Compared to the classical HHO, these versions generally deliver higher accuracy, lower error rates, and faster convergence speeds.

The variety and abundance of these improved versions clearly illustrate the flexibility of HHO and its ability to be readily adapted to diverse problem types.

2.2. Multi-objective Optimization

Real-world problems often involve multiple objective functions, making multi-objective optimization algorithms increasingly essential. In this context, the multi-objective versions of the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm have shown significant advancements. Du et al developed a multi-objective version of HHO (MOHHO) to simultaneously forecast PM2.5 and PM10 particulate levels. Compared to conventional algorithms, the solutions obtained through this approach exhibited a broader and more balanced Pareto front[31]. Additionally, the H-MOHHO algorithm, developed using non-elitist sorting techniques, delivered promising results across several multi-objective benchmark functions[36]. The multi-objective extensions of HHO offer robust alternatives in domains that require multi-criteria decision-making, particularly in energy management, environmental modeling, and healthcare systems.

2.3. Applications in Engineering Design Problems

The Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm has demonstrated extensive applicability in real-world engineering design problems. Initially introduced by Heidari et al. in 2019, the original HHO algorithm has been tested on classical engineering problems such as welded beam design, pressure vessel optimization, spring design, and tension/compression bar problems. Experimental results have shown that HHO outperforms widely used heuristic algorithms such as Grey Wolf Optimizer (GWO), Differential Evolution (DE), and Particle Swarm Optimization (PSO) in terms of solution quality and convergence speed. The energy-based hunting strategies of HHO are particularly effective in constrained and highly variable design spaces, offering a better balance between exploration and exploitation phases[1]. In 2023, Abualigah et al. proposed an enhanced version named Improved Gradual Change-based HHO (HHSC), which was tested on the CEC2019 benchmark functions and five typical engineering design problems. By incorporating sine and cosine-based strategies, this variant achieved faster convergence and higher solution quality compared to the classical HHO[37, 38]. In a similar direction, the Modified HHO (m-HHO) algorithm combined strategies such as PRD (Progressive Random Distribution), OBL (Opposition-Based Learning), and GSM (Global Search Mechanism) to improve solution diversity and search stability in engineering contexts. When evaluated across 33 benchmark problems, m-HHO produced fewer infeasible solutions and delivered higher accuracy, particularly in constrained design scenarios[39]. **The** HHO-FORM variant has been proposed for high-dimensional reliability analysis in engineering, merging HHO with the First Order Reliability Method (FORM) to optimize complex safety factors in design parameters[40]. Ouyang et al. (2024) introduced the Integrated Improved HHO (IIHHO) model, which tackled two different engineering and energy system applications. Through the use of sequential energy regulation, evolutionary vector tuning, and Levy flight kinematics, the model demonstrated

robustness against aggressive local optimum traps[41]. On another front, the ANFIS-HHO model was employed for optimizing quality and durability in Friction Stir Welding (FSW) processes. Analysis on experimental datasets helped determine the most suitable ANFIS architecture for performance enhancement[42]. These applications collectively demonstrate that the HHO algorithm is not only effective in classical benchmark functions but is also highly applicable to real-world, industrial-scale engineering optimization problems.

3. Harris Hawks Optimization Algorithm

3.1 Origins and Behavioral Foundations

The Harris hawk is considered one of the most intelligent bird species, particularly in terms of its hunting and feeding behaviors[43]. Native to the southern regions of Arizona in the United States[44] this raptor species exhibits a social structure that favors group-based activity. Observations in ethology have shown that Harris hawks do not hunt individually, but instead engage in cooperative hunting strategies. Unlike many other birds of prey that typically hunt alone, Harris hawks collaborate during the detection, pursuit, capture, and consumption phases of hunting. Such intra-group cooperation is especially prevalent outside the breeding season.

Figure 1. Harris's hawk and their behaviors

As illustrated in Figure 1, Harris hawks employ a "surprise attack" tactic during hunting. This strategy, often referred to in the literature as "seven kills," is aimed at physically exhausting the prey before neutralizing it. The method involves several sequential steps: initially, one hawk from the group launches a swift and unexpected strike to startle the prey. Subsequently, other members take turns performing rapid, short-range dives to apply pressure and surround the prey. This tactical harassment confuses and tires the prey. Ultimately, the most adept hawk captures it, and the prey is then shared among all members of the group.

3.2 Harris Hawks Optimization

Harris Hawks Optimization (HHO), developed by Heidari et al., is a nature-inspired, innovative optimization algorithm [1]. It presents a swarm-based approach that is known for its fast and efficient performance. Although its exploration and exploitation strategies may appear simple, they yield highly effective results. Furthermore, the algorithm possesses a dynamic structure that makes it well-suited for solving continuous optimization problems [45].

HHO is a population-based metaheuristic method built upon the mathematical modeling of natural phenomena. The primary inspiration behind the algorithm lies in the coordinated hunting behavior of Harris hawks, which track their prey collectively and launch surprise attacks[46]. Simultaneous attacks from multiple directions catch the prey off-guard and induce confusion [47]. In each iteration, the HHO algorithm updates the positions of candidate solutions using search parameters, the prey's location (exploration phase), a transition mechanism from exploration to exploitation, and three distinct operators for the exploitation phase. The fundamental steps of the HHO algorithm are illustrated in Figure 2.

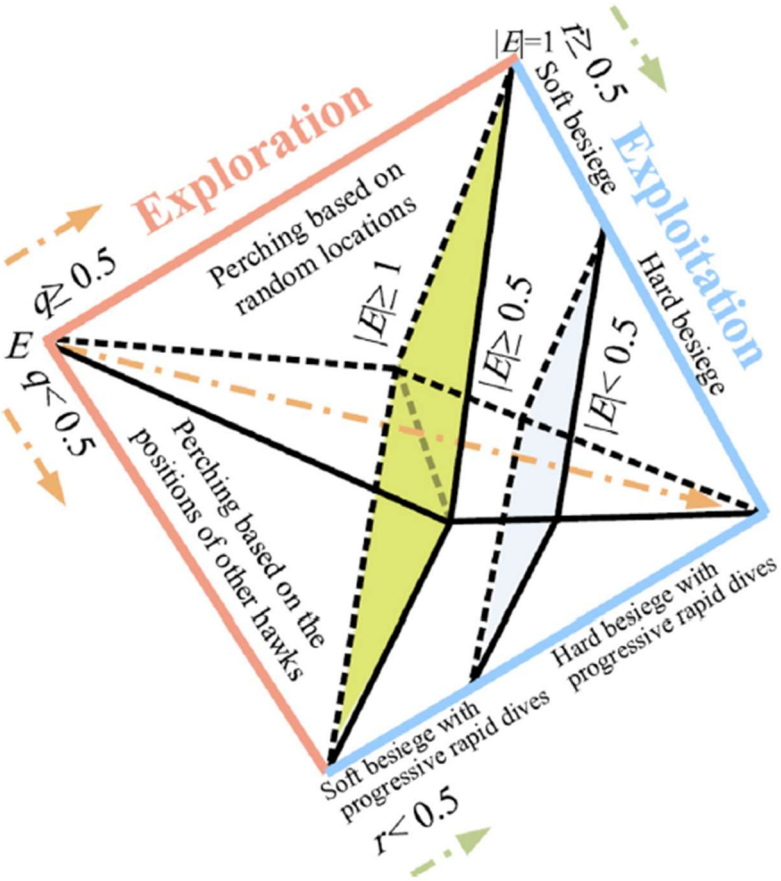


Figure 2. Different phases of HHO. [48]

In the exploration phase of the HHO algorithm, Harris hawks position themselves randomly across the search space to observe potential targets. The two main strategies applied in this stage mimic the hawks' behavior of spreading out to locate prey from various vantage points. The mathematical modeling techniques used by the algorithm to explore the search space during this phase are expressed in Equation (1).[49]

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1\left|X_{rand}(t) - 2_{r_2}X(t)\right| & q \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3\left(LB + r_4(BU - LB)\right)_q & q < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

In this context, $X(t+1)$ denotes the position vector of a hawk at the upcoming iteration, while $(X_{rabbit}(t)$ indicates the current location of the rabbit. The current position of each hawk is represented by $X(t)$. Random coefficients r_1,

r_2, r_3, r_4, and q are generated anew within the range (0,1) at every iteration to introduce stochastic behavior into the search process. The variables LB and UB correspond to the lower and upper bounds of the search space, respectively. $X_{rand}(t)$ signifies the position of a randomly selected hawk within the population, and X_m refers to the mean position of all hawks[50]. This average posture is formally expressed by Equation (2).

$$X_m(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i(t) \quad (2)$$

Where N is the count of Hawks and $X_i(t)$ is its position at iterasion t.

3.2.2. The transformation from exploration to exploitation

In the HHO algorithm, exploration and exploitation represent two distinct operational phases. The transition between these phases is governed by the prey's energy level, which is mathematically expressed using Equation (3).

$$E = 2E_0\left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (3)$$

In this model, the variable E represents the prey's energy during its escape attempts, while T, denotes the total number of maximum iterations of the algorithm. The initial energy E_0 is randomly generated within the range (-1, 1) at each iteration. The dynamic change in energy is further modeled by Equation (4).

$$E_0 = 2 * rand - 1 \quad (4)$$

3.2.3. Exploitation phase

During the transition from exploration to exploitation in the HHO algorithm, Harris hawks attempt to neutralize their prey through sudden and surprise attacks. In this phase, the prey (typically modeled as a rabbit) tries to escape in order to survive. To successfully complete the hunt, hawks employ different pursuit strategies based on the prey's behavior. Harris hawks utilize four distinct attack strategies to subdue their target. The selection of these strategies depends on the prey's escape probability and energy level.

In the model, the variable r represents the likelihood that the prey will successfully evade the hawks. If this probability is equal to or greater than 0.5, the hawks apply either the soft besiege or hard besiege strategy. In contrast, if the prey's energy level drops below 0.5, the hawks switch to more aggressive techniquessoft besiege with progressive rapid dives or hard besiege with progressive rapid dives to increase the chances of capture[51].

Soft besiege

If the rabbit's escape probability r and energy |E| satisfy the condition $|E| \leq 0.5$, it indicates that the rabbit has relatively high endurance, thus increasing its chances of evading capture. In such a scenario, Harris hawks avoid launching a direct attack and instead employ a strategic approach by slowly encircling the prey. This encirclement is eventually concluded with a sudden strike. This behavioral dynamic is mathematically modeled in the algorithm using Equations (5) and (6).

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E|JX_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (5)$$

Where $J = 2 * (1 - r_5)$

$$\Delta X(t) = X_{rabbit}(t) - X(t) \quad (6)$$

In the algorithm, **ΔX(t)** represents the vector difference between the rabbit's current position and the hawk's position. The parameter $\mathbf{r_5}$, is a randomly generated value within the interval [0, 1] at each iteration. The variable **J** symbolizes the jump strength demonstrated by the rabbit during its escape, capturing the stochastic nature of its movement.

Hard besiege

If the rabbit's escape probability is $\mathbf{r \leq 0.5}$ and its energy level satisfies $\mathbf{|E| \geq 0.5}$, the prey still retains a high level of energy and therefore has a reasonable chance of escaping. In this scenario, Harris hawks have a limited window to surround the prey. Consequently, they attempt to subdue the target through a fast and aggressive attack. This dynamic is mathematically formulated in the algorithm through Equation (7).

$$\Delta X(t) = X_{rabbit}(t) - E|\Delta X(t)| \quad (7)$$

A simple example illustrating this behavior with a single hawk is presented in Figure 3.

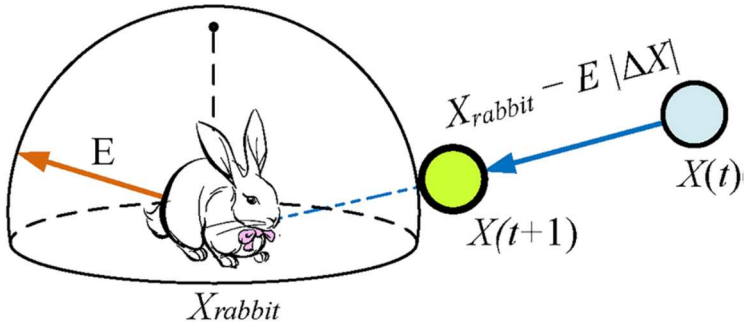


Figure 3. Example of overall vectors in the case of hard besiege

3.Soft besiege with progressive rapid dives

When the escape probability of the rabbit satisfies $r \leq 0.5$ and its energy level is $|E| \leq 0.5$ the prey, while still alive, has essentially lost its ability to escape. In this scenario, the hawks' attack simulates the prey's erratic, zigzag-like movement and the hawks' attempt to pursue it through chaotic dives. This unique escape behavior is modeled in the HHO algorithm using the Levy flight principle, mathematically expressed in Equation (8).

$$Y = X_{rabbit}(t) - E|JX_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (8)$$

Following this movement, the hawks evaluate whether the resulting dive leads to a better solution by comparing it with their previous dive. Based on this assessment, they perform a new dive as defined by Equation (9).

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (9)$$

where D denotes the problem dimension, S denotes a random vector of size $1 \times D$, and LF denotes the levy flight function, which is computed using Eq. (10).

$$LF(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}, \sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

In this model, **u** ve **v** are randomly generated numbers in the interval [0, 1] at each iteration, and the constant β is typically set to 1.5. Based on this behavior, the final strategy employed by Harris hawks to update their positions during the soft besiege phase is defined by Equation (11).

$$X(t+1) = \begin{Bmatrix} Y \; if \; F(Y) < F\big(X(t)\big) \\ Z \; if \; F(Z) < F(X(t)) \end{Bmatrix} \qquad (11)$$

A visual representation of this mechanism is illustrated in Figure 4, depicting how hawks explore the vicinity of the prey by generating chaotic dives and evaluating the resulting positions based on fitness:

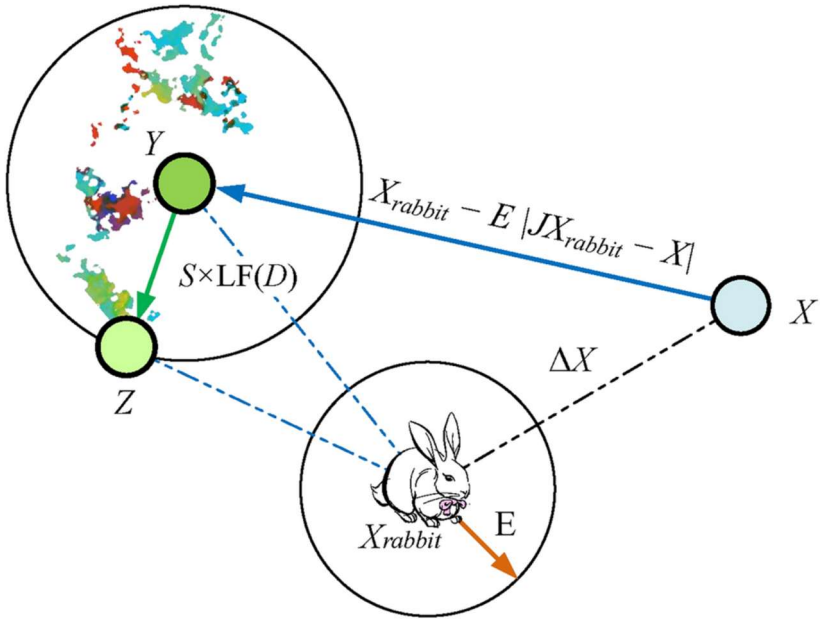


Figure 4. Example of overall vectors in the case of soft besiege with progressive rapid dives

Hard besiege with progressive rapid dives

When the model conditions r ≤ 0.5 and |E| ≤ 0.5 are satisfied, the rabbit has reached a completely depleted energy level and thus loses its capacity to escape. In this scenario, Harris hawks aim to minimize the distances between one another in order to increase pressure on the prey. This collective contraction maneuver is mathematically defined in the algorithm by Equation (12).

$$X(t+1) = \begin{Bmatrix} Y \; if \; F(Y) < F\big(X(t)\big) \\ Z \; if \; F(Z) < F(X(t)) \end{Bmatrix} \qquad (12)$$

where Y and Z are calculated according to new principles in Eq. (13) and Eq. (14).

$$Y = X_{rabbit}(t) - E|JX_{rabbit}(t) - X(t)| \qquad (13)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \qquad (14)$$

In these equations, S denotes a randomly generated vector and $LF(D)$ represents a Levy flight function based on the problem dimension. The average position $X_m(t)$ is obtained by solving Equation (2)

The behavior described in this phase is also supported by the pseudo-code structure of the HHO algorithm, provided in Algorithm 1, which outlines the complete operational flow of the traditional HHO framework.

Inputs: The population size N and maximum number of iterations T
Outputs: The location of rabbit and its fitness value
Initialize the random population $X_i(i = 1, 2, \ldots, N)$
while (stopping condition is not met) **do**
  Calculate the fitness values of hawks
  Set X_{rabbit} as the location of rabbit (best location)
  for (each hawk (X_i)) **do**
    Update the initial energy E_0 and jump strength J
      $E_0 = 2 * rand - 1, \quad J = 2(1 - rand)$
    Update E using Eq. (3)
    if ($|E| \geq 1$) **then** ▷ Exploration phase
      Update the location vector using Eq. (1)
    if ($|E| < 1$) **then** ▷ Exploitation phase
      if ($r \geq 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** ▷ Soft besiege
        Update the location vector using Eq. (5)
      else if ($r \geq 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** ▷ Hard besiege
        Update the location vector using Eq. (7)
      else if ($r < 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** ▷ Soft besiege with progressive rapid dives
        Update the location vector using Eq. (11)
      else if ($r < 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** ▷ Hard besiege with progressive rapid dives
        Update the location vector using Eq. (12)
Return X_{rabbit}

Algorithm 1. Pseudo-code of HHO algorithm

4 Harris Hawks Optimization Applications

This section highlights prominent and emerging application areas where the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm has been effectively employed. Additionally, it presents brief comparative analyses to illustrate HHO's performance advantages and limitations relative to other optimization techniques found in the literature. As summarized in Table 1, the Harris Hawks Optimization algorithm demonstrates superior adaptability and performance across a wide range of domains, including machine learning, wireless networks, image processing, and energy systems.

4.1 Machine Learning Applications of HHO

Recent studies have demonstrated the potential of the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm in enhancing machine learning models across various domains. For instance, Tikhamarine et al.[52] proposed a hybrid model integrating HHO with Multi-Layer Perceptron (MLP) neural networks and Least Squares Support Vector Machines (LSSVM) to predict rainfall-runoff dynamics. Their findings indicated that the HHO-based model outperformed other hybrid approaches such as LSSVM-PSO in terms of predictive accuracy. In another study[53] an improved HHO framework was employed for COVID-19 prediction, incorporating feature selection based on SHapley Additive exPlanations (SHAP). The hybrid model, combining HHO with Extreme Gradient Boosting (HHOXGB), was applied to a publicly available COVID-19 dataset and achieved a high prediction accuracy of 92.38%, slightly surpassing HHOXGB's 92.23%. The results emphasized the superiority of the proposed model over conventional machine learning techniques.

Similarly, Wei et al.[33] introduced a hybrid model named GBHHO-KELM, which couples HHO with Gaussian barebone mechanisms to enhance global-local search efficiency, and integrates this with a Kernel-based Extreme Learning Machine (KELM). Experiments on the CEC2014 benchmark suite showed that this model delivered more stable and accurate classification results than other optimization-driven machine learning methods.

Additionally, a binary version of HHO incorporating specular reflection learning was used for feature selection in early-stage COVID-19 diagnosis from blood sample data[54]. When compared to other swarm intelligence algorithms, the proposed method demonstrated superior performance in terms of classification accuracy, sensitivity, specificity, and computational efficiency.

4.2 Network Applications of HHO

The Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm has been widely adopted across networking domains, particularly in the area of Wireless Sensor Networks (WSNs). Houssein et al.[55] addressed the sensor placement problem in Large-Scale Wireless Sensor Networks (LSWSNs). Their simulation results revealed that HHO outperformed algorithms such as PSO, GWO, FPA, and WOA, delivering superior performance in terms of minimizing localization error, reducing energy consumption, and extending network lifespan. Similarly, Srinivas and Amgoth[56] developed a hybrid approach that integrates HHO with the Salp Swarm Algorithm (Hybrid HH-SS) for cluster head (CH) selection in WSNs. Additionally, an adaptive ant colony optimization (AACO) strategy was employed to establish optimal routing paths between mobile sinks and CHs. The proposed method showed significant improvements in energy efficiency, packet delivery, throughput, and end-to-end delay.

To further improve localization accuracy in WSNs, Bhat and Venkata [57] introduced the HHO-based Area Minimization (HHO-AM) technique. Their results demonstrated lower localization error and enhanced stability compared to traditional methods like DV-Hop and DV-maxHop. Beyond WSNs, HHO has also been employed in broader network and service composition challenges. Given the heterogeneous nature of sensor hardware, Service-Oriented Computing (SOC) and Service-Oriented Architecture (SOA) paradigms have been adopted to address adaptability in WSNs[58, 59]. In this context, Li et al. [89] proposed a chaotic-enhanced HHO (CHHO) model that integrates logical chaotic sequences for Quality of Service (QoS)-aware web service composition in large-scale networks. Experimental findings confirmed CHHO's superiority over competing methods in optimizing service selection and composition.

Additionally, HHO has been adapted for Internet of Things (IoT) systems. Seyfollahi and Ghaffari[60] proposed an enhanced version of HHO for reliable and secure data aggregation, routing, and diffusion in IoT environments. Their model improved several performance metrics, including delivery ratio, delay, reliability, and energy efficiency. As IoT networks continue to expand, the emergence of Fog computing has introduced new task scheduling challenges due to power consumption constraints. Here, HHO-based solutions offer promising directions for efficient resource management in intermediate Fog layers between cloud infrastructures and smart IoT devices.

4.3 Performance on Benchmark Functions

Fan et al. [10] proposed an improved variant of the HHO algorithm named Quasi-Reflected HHO (QRHHO), designed to address global optimization problems more efficiently. This method integrates Harris Hawks Optimization with the Quasi-Reflection-Based Learning (QRBL) strategy. QRBL is applied in both the initialization phase to enhance population diversity and during the update phase to accelerate convergence. The effectiveness of QRHHO was evaluated across 23 benchmark functions [61] and results indicated superior speed and solution quality compared to other HHO variants and swarm-based metaheuristics.

Qu et al.[17] introduced the Information Exchange-based HHO (IEHHO), aiming to improve performance in both numerical and real-world engineering problems. This model enhances convergence by enabling controlled information sharing among hawks during the exploration stage. Additionally, chaotic perturbation techniques were integrated through an exploitation-exploration (EE) balancing factor. Despite its strong performance in terms of precision, robustness, and convergence speed, IEHHO is noted to be sensitive to parameter settings and may encounter issues with generalized random search. In another contribution [62], a new hybrid model called HHMV (HHO with Multi-Verse Optimizer) was introduced to address the slow convergence behavior observed in the classical HHO. By combining HHO with the Multi-Verse Optimizer (MVO), the new approach was tested on classical and CEC2019 benchmark functions across various dimensions. Experimental findings revealed that HHMV outperformed several contemporary algorithms reported in the literature in terms of accuracy and convergence reliability.

4.4 Applications in Image Processing

The Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm has been increasingly adopted in the field of image processing, particularly for tasks such as multilevel image thresholding and noise reduction. Wunnava et al.[63] proposed an enhanced version of HHO called Differential Evolution Adaptive HHO (DEAHHO), which integrates differential evolution mechanisms in place of traditional perching and escaping strategies. Additionally, the authors introduced a novel two-dimensional Masi entropy function tailored for multilevel image segmentation. When benchmarked against other algorithms such as classical HHO, PSO, DE, CS[64], FA [65], and STOA [66], DEAHHO exhibited superior convergence behavior.

In a similar line of work, Bao et al. [19] introduced HHO-DE, a hybrid approach that distributes the initial population across two subpopulations one for HHO and the other for DE. These subpopulations collaboratively update candidate solutions throughout the optimization process. Experimental analysis demonstrated that the HHO-DE algorithm achieved competitive performance compared to various state-of-the-art techniques. Jia et al. [18] presented a hybrid method named Dynamic HHO Mutation (DHHOM), designed specifically for satellite image segmentation. By introducing a dynamic parameter adjustment strategy within the mutation mechanism, the model aimed to avoid premature convergence and enhance search efficiency. Experimental evaluations confirmed the method's effectiveness across multiple metrics, including statistical tests, fitness evaluations, and visual segmentation quality.

In another contribution, the HHO algorithm was applied to optimize the parameters of a Pulse Coupled Neural Network (PCNN) for image segmentation [67]. This model, named HHO-PCNN, reduced the dimensionality of the search space while using interactive and image entropy functions as fitness criteria. Comparative analysis showed that HHO-PCNN achieved superior segmentation results against other PCNN-based hybrid models and demonstrated potential for broader object segmentation applications. Additionally, Golilarz et al. [68] proposed a novel method for satellite image denoising called CMDHHO Chaotic Multi-strategy Differential Evolution-assisted HHO. This variant integrates three core enhancements into the base HHO: multi-population structure, differential evolution mechanisms, and chaotic perturbations. When tested against other optimizers such as DE, PSO, SSA and the original HHO, CMDHHO exhibited improved performance both qualitatively and quantitatively.

4.5 Applications in Energy and Power Flow Optimization

The Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm has been widely utilized in the domain of energy systems, particularly for optimizing the parameters of power system controllers and devices. These optimization tasks typically aim to improve performance metrics such as power output, operational cost, load regulation, and system stability.

Due to its ability to efficiently navigate highly nonlinear search spaces and reduce the risk of premature convergence, HHO has emerged as a promising solution in this area.

It is noteworthy that energy-related problems constitute the largest body of HHO applications in the literature. This prevalence is driven by the increasing global focus on renewable energy technologies and the fact that the original HHO study was applied to photovoltaic (PV) systems [69]. In one study [70], the classical HHO algorithm was applied to enhance the load frequency control (LFC) performance in a two-area interconnected power system. By optimizing the parameters of the control mechanism, the model successfully minimized frequency oscillations and improved tie-line power stability. Simulation results in MATLAB revealed a 2% improvement in response under step load perturbations, confirming the method's effectiveness in damping oscillations across both regions.

In another contribution [71], a modified version of HHO, referred to as MHHO, was developed to fine-tune the parameters of power oscillation damping devices, specifically Static Synchronous Compensators (STATCOM). This modification involved replacing the original linear exploitation-exploration (EE) energy decay model with a squared decay formulation. The goal was to improve convergence behavior in high-energy search environments. The objective function used in this case aimed to maximize the system's minimum damping ratio. Comparative analysis involving ALO, WOA, and the standard HHO indicated that MHHO significantly improved damping performance across varying load conditions, including both heavy and light scenarios. In [72], the classical HHO algorithm was employed to minimize generation costs and power losses within an IEEE-30 bus system benchmark. MATLAB-based simulations compared the results with several metaheuristic algorithms, including GWO, ALO, SSA, WOA, Moth Flame Optimizer (MFO), and Bacterial Foraging Algorithm (BFA). The findings demonstrated that HHO delivered consistently reliable and competitive outcomes, outperforming the other methods in terms of cost efficiency and loss minimization.

Yousri et al. [73] utilized HHO to fine-tune the parameters of a Proportional-Integral (PI) controller used in load frequency control (LFC). Their study focused on a multi-interconnected power system comprising conventional thermal generators as well as renewable energy sources (RESs), such as wind turbines and photovoltaic panels. The objective function was defined as the Integral Time Absolute Error (ITAE) of system frequency and tie-line power. Simulations conducted in MATLAB/SIMULINK across three interconnected scenarios demonstrated that HHO-based optimization led to significantly improved system stability. The HHO-optimized PI controller exhibited rapid damping of oscillations, minimal overshoot, and shorter settling times under varying load disturbances.

Finally, In [74], an improved variant of the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm was proposed, integrating two complementary learning strategies: General Optimization-Based Learning (GOBL) and Orthogonal Learning (OL). The OL mechanism was designed to enhance the accuracy and convergence speed by guiding the search towards more promising regions of the solution space. Subsequently, GOBL was employed to increase population diversity by generating reverse solutions during each iteration. These opposite solutions were evaluated against the current population using a fitness function, and the best-performing individuals were retained to form the next generation. The enhanced HHO model was implemented and tested in MATLAB, where its performance was benchmarked against experimental data from both single-diode and double-diode photovoltaic (PV) cell models, as well as a complete PV module. Based on average Root Mean Square Error (RMSE) values, the results demonstrated that the modified algorithm achieved faster convergence and higher solution accuracy compared to the original HHO.

Table 1. Comparative Summary of HHO Applications Across Domains

Application Area	HHO Variants / Approaches Used	Achievements / Outcomes	Comparisons / Advantages

Machine Learning	- HHO-MLP-LSSVM - HHOXGB - GBHHO-KELM - Binary-HHO (with SHAP feature selection)	- High prediction accuracy (>92%) - Improved classification robustness	Outperformed LSSVM-PSO, PSO, and traditional ML methods
Networking (WSN, IoT)	- HHO-AM - Hybrid HH-SS - CHHO - HHO-based routing and clustering	- Reduced energy consumption and delay - Higher packet delivery and stability	Superior to PSO, GWO, FPA, WOA in wireless applications
Benchmark Functions	- QRHHO - IEHHO - HHMV	- Faster convergence - Higher solution accuracy across many test functions	Outperformed other swarm-based metaheuristics
Image Processing	- DEAHHO - HHO-DE - DHHOM - HHO-PCNN - CMDHHO	- Effective thresholding and noise removal - High segmentation accuracy	Better than PSO, DE, CS, FA, and other segmentation tools
Energy & Power Systems	- MHHO - Classical HHO - HHO-OL-GOBL - PI-HHO controllers	- Optimized LFC and STATCOM tuning - Improved PV system accuracy (RMSE drop)	Outperformed ALO, SSA, WOA in energy system optimization

5. Ethical Considerations in the Literature

Scientific research and publication ethics form the foundation of academic production. In the literature review on the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm, it was observed that many studies generally adhere to ethical principles, though certain shortcomings still exist. This section evaluates the literature analyzed in this paper in terms of transparency, citation ethics, fairness in comparisons, and reproducibility, which are key ethical dimensions in scientific work.

5.1 Transparency and Methodological Clarity

In the reviewed studies, the core structure of the HHO algorithm is generally well-defined, and its mathematical formulation is clearly presented. In particular, fundamental works such as Heidari et al. (2019) [1] and Fan et al. (2020) [10] provide detailed explanations of algorithm phases and parameter definitions. However, in some advanced variants such as IEHHO [17] and CHHO [32] important experimental settings such as the range of hyperparameter values or the number of algorithm runs are either omitted or vaguely mentioned. This compromises the clarity and transparency of the study and hinders its reproducibility. Especially in works involving parameter sensitivity analysis, providing such details is essential from an ethical standpoint.

5.2 Citation Practices and Attribution Ethics

Most HHO-related studies include extensive bibliographies. For instance, Alabool et al. (2021)[3] present a comprehensive survey with well-organized references. Nevertheless, some applied research articles such as HHO-ConvNet [34] and HHO-RF [35] fail to cite the original version of the HHO algorithm by Heidari et al. (2019) explicitly, or only refer to it indirectly. This reflects a lack of proper attribution, which can undermine academic integrity. Furthermore, in some comparative studies, datasets and reference algorithms are used without clearly citing their sources, raising concerns about ethical consistency in acknowledging contributions.

5.3 Fairness in Comparative Methods

Comparative analysis is a common practice in algorithm-based studies to validate performance. Many HHO studies employ such evaluations, for instance, the HHSC model proposed by Abualigah et al. (2023)[37], which benchmarks HHO against other metaheuristics on CEC2019 functions and standard engineering problems. However, in certain cases (e.g., QRHHO [10], HHMV [62]), comparison algorithms are run with default settings or without clearly stated parameters, limiting the validity of the comparison. This compromises fairness and can introduce methodological bias. Ethical comparison requires that all algorithms are tested under equal conditions, with transparent parameter settings and statistical significance analysis.

5.4 Reproducibility and Open Science Principles

The scientific value of research lies not only in its findings but also in the ability of independent researchers to reproduce the results. In several HHO-related studies, particularly in fields such as machine learning and image processing (e.g., HHO-PCNN [67], DHHOM [18]), neither source codes nor datasets are provided. This conflicts with the principles of open science. However, some exceptions exist; for example, the work of Tikhamarine et al. [52] clearly shares its dataset and experimental setup, contributing to reproducibility. Overall, while the adoption of open science practices in HHO research is still limited, positive efforts can be observed in certain cases.

Conclusion and future work

This comprehensive review has systematically explored the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm in terms of its theoretical underpinnings, behavioral modeling, structural enhancements, and wide-ranging applications. Since its introduction by Heidari et al. in 2019, HHO has emerged as a highly competitive metaheuristic, offering a dynamic balance between exploration and exploitation phases through biologically inspired strategies. Its four distinct attack mechanisms and energy-driven transition model have enabled successful application across various domains, including engineering, image processing, machine learning, and power systems.

However, like many population-based algorithms, the classical HHO faces certain limitations, such as premature convergence and stagnation in local optima especially in complex, multimodal, and high-dimensional search spaces. To overcome these issues, researchers have proposed a broad spectrum of improvements, including chaos-based initialization (GHHO, CHHO), opposition-based learning (EOBL-HHO), hybridizations with other metaheuristics e.g., DE, SCA, GWO, and multi-population strategies (CMDHHO). These variants have shown significant enhancements in convergence speed, search accuracy, and robustness. In multi-objective scenarios, extensions like MOHHO and H-MOHHO have successfully addressed problems requiring the simultaneous optimization of conflicting objectives, with notable success in energy planning, environmental modeling, and engineering design. The algorithm's adaptability is further demonstrated through its integration with neural networks, feature selection techniques, and IoT-based systems, offering competitive performance in both academic benchmarks and real-world datasets.

For future research, several directions remain promising. One key area involves developing adaptive and self-tuning variants of HHO that can automatically adjust control parameters during runtime, enhancing generalization in dynamic or noisy environments. Integration with emerging paradigms such as quantum-inspired optimization, federated learning, or explainable AI could further broaden the algorithm's relevance. In addition, deeper theoretical analysis regarding convergence behavior and complexity is needed to strengthen the mathematical foundations of HHO and its variants.

Finally, promoting ethical research practices such as detailed parameter disclosure, fair benchmarking protocols, and open access to code and data will play a vital role in increasing transparency, reproducibility, and collaboration within the optimization community. Expanding HHO's application scope to include sustainability, healthcare diagnostics, and intelligent infrastructure systems may help translate its computational success into real-world societal impact.

REFERENCES

1. Heidari, A.A., et al., *Harris hawks optimization: Algorithm and applications.* Future generation computer systems, 2019. **97**: p. 849-872.
2. Hussien, A.G., et al., *Recent advances in harris hawks optimization: A comparative study and applications.* Electronics, 2022. **11**(12): p. 1919.
3. Alabool, H.M., et al., *Harris hawks optimization: a comprehensive review of recent variants and applications.* Neural computing and applications, 2021. **33**: p. 8939-8980.
4. Zhang, Y., et al., *Boosted binary Harris hawks optimizer and feature selection.* Engineering with Computers, 2021. **37**: p. 3741-3770.
5. Mohammed, H.M., S.U. Umar, and T.A. Rashid, *A systematic and meta-analysis survey of whale optimization algorithm.* Computational intelligence and neuroscience, 2019. **2019**(1): p. 8718571.
6. Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, and A. Lewis, *Grey wolf optimizer.* Advances in engineering software, 2014. **69**: p. 46-61.
7. Mirjalili, S. and S. Mirjalili, *Genetic algorithm.* Evolutionary algorithms and neural networks: Theory and applications, 2019: p. 43-55.
8. Mirjalili, S., *SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems.* Knowledge-based systems, 2016. **96**: p. 120-133.
9. Houssein, E.H., I.E. Mohamed, and Y.M. Wazery, *Salp swarm algorithm: a comprehensive review.* Applications of Hybrid Metaheuristic Algorithms for Image Processing, 2020: p. 285-308.
10. Fan, Q., Z. Chen, and Z. Xia, *A novel quasi-reflected Harris hawks optimization algorithm for global optimization problems.* Soft Computing, 2020. **24**: p. 14825-14843.
11. Shehab, M., et al., *Harris hawks optimization algorithm: variants and applications.* Archives of Computational Methods in Engineering, 2022. **29**(7): p. 5579-5603.
12. Tripathy, B., et al., *Harris hawk optimization: a survey onvariants and applications.* Computational Intelligence and Neuroscience, 2022. **2022**(1): p. 2218594.
13. Chong, G. and Y. Yongliang, *An Improved Harris Hawk Optimization Algorithm.* Mechanical Engineering Science, 2024. **6**(1).
14. Akl, D.T., et al., *IHHO: an improved Harris Hawks optimization algorithm for solving engineering problems.* Neural Computing and Applications, 2024. **36**(20): p. 12185-12298.
15. Gezici, H. and H. Livatyalı, *Chaotic Harris hawks optimization algorithm.* Journal of Computational Design and Engineering, 2022. **9**(1): p. 216-245.
16. Shan, W., et al., *Cauchy mutation boosted Harris hawk algorithm: Optimal performance design and engineering applications.* Journal of Computational Design and Engineering, 2023. **10**(2): p. 503-526.
17. Qu, C., et al., *Harris hawks optimization with information exchange.* Applied mathematical modelling, 2020. **84**: p. 52-75.
18. Jia, H., et al., *Dynamic harris hawks optimization with mutation mechanism for satellite image segmentation.* Remote sensing, 2019. **11**(12): p. 1421.
19. Bao, X., H. Jia, and C. Lang, *A novel hybrid harris hawks optimization for color image multilevel thresholding segmentation.* Ieee Access, 2019. **7**: p. 76529-76546.
20. Abdel-Basset, M., W. Ding, and D. El-Shahat, *A hybrid Harris Hawks optimization algorithm with simulated annealing for feature selection.* Artificial Intelligence Review, 2021. **54**(1): p. 593-637.

21. Ismael, O.M., O.S. Qasim, and Z.Y. Algamal, *Improving Harris hawks optimization algorithm for hyperparameters estimation and feature selection in v-support vector regression based on opposition-based learning.* Journal of Chemometrics, 2020. **34**(11): p. e3311.
22. Sihwail, R., et al., *Improved harris hawks optimization using elite opposition-based learning and novel search mechanism for feature selection.* Ieee Access, 2020. **8**: p. 121127-121145.
23. Kamboj, V.K., et al., *An intensify Harris Hawks optimizer for numerical and engineering optimization problems.* Applied Soft Computing, 2020. **89**: p. 106018.
24. Dhawale, D. and V.K. Kamboj. *Hhho-igwo: a new hybrid Harris Hawks optimizer for solving global optimization problems*. in *2020 international conference on computation, automation and knowledge management (ICCAKM)*. 2020. IEEE.
25. Ridha, H.M., et al., *Boosted mutation-based Harris hawks optimizer for parameters identification of single-diode solar cell models.* Energy Conversion and Management, 2020. **209**: p. 112660.
26. Selim, A., et al., *Optimal placement of DGs in distribution system using an improved harris hawks optimizer based on single-and multi-objective approaches.* IEEE Access, 2020. **8**: p. 52815-52829.
27. Fu, W., et al., *A composite framework coupling multiple feature selection, compound prediction models and novel hybrid swarm optimizer-based synchronization optimization strategy for multi-step ahead short-term wind speed forecasting.* Energy Conversion and Management, 2020. **205**: p. 112461.
28. Chen, H., et al., *Multi-population differential evolution-assisted Harris hawks optimization: Framework and case studies.* Future Generation Computer Systems, 2020. **111**: p. 175-198.
29. Moayedi, H., et al., *Herding Behaviors of grasshopper and Harris hawk for hybridizing the neural network in predicting the soil compression coefficient.* Measurement, 2020. **152**: p. 107389.
30. Rodríguez-Esparza, E., et al., *An efficient Harris hawks-inspired image segmentation method.* Expert Systems with Applications, 2020. **155**: p. 113428.
31. Du, P., et al., *A novel hybrid model based on multi-objective Harris hawks optimization algorithm for daily PM2. 5 and PM10 forecasting.* Applied Soft Computing, 2020. **96**: p. 106620.
32. Zheng-Ming, G., Z. Juan, and H. Yu-Rong. *The improved Harris hawk optimization algorithm with the Tent map*. in *2019 3rd International conference on electronic information technology and computer engineering (EITCE)*. 2019. IEEE.
33. Wei, Y., et al., *Predicting entrepreneurial intention of students: an extreme learning machine with Gaussian barebone Harris hawks optimizer.* Ieee Access, 2020. **8**: p. 76841-76855.
34. Golilarz, N.A., et al., *A new automatic method for control chart patterns recognition based on ConvNet and harris hawks meta heuristic optimization algorithm.* Ieee Access, 2019. **7**: p. 149398-149405.
35. Yu, Z., et al., *Effective assessment of blast-induced ground vibration using an optimized random forest model based on a Harris hawks optimization algorithm.* Applied Sciences, 2020. **10**(4): p. 1403.
36. Wang, M., et al., *Hybrid multi-objective Harris Hawk optimization algorithm based on elite non-dominated sorting and grid index mechanism.* Advances in Engineering Software, 2022. **172**: p. 103218.
37. Abualigah, L., et al., *Improved gradual change-based Harris Hawks optimization for real-world engineering design problems.* Engineering with Computers, 2023. **39**(3): p. 1843-1883.
38. Song, M., et al., *Modified harris hawks optimization algorithm with exploration factor and random walk strategy.* Computational intelligence and neuroscience, 2022. **2022**(1): p. 4673665.
39. Gupta, S., et al., *Opposition-based learning Harris hawks optimization with advanced transition rules: principles and analysis.* Expert Systems with Applications, 2020. **158**: p. 113510.
40. Zhong, C., et al., *First-order reliability method based on Harris Hawks Optimization for high-dimensional reliability analysis.* Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020. **62**(4): p. 1951-1968.
41. Ouyang, C., et al., *Integrated improved Harris hawks optimization for global and engineering optimization.* Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 7445.
42. Shehabeldeen, T.A., et al., *Modeling of friction stir welding process using adaptive neuro-fuzzy inference system integrated with harris hawks optimizer.* Journal of Materials Research and Technology, 2019. **8**(6): p. 5882-5892.
43. Sol, D., et al., *Big brains, enhanced cognition, and response of birds to novel environments.* Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005. **102**(15): p. 5460-5465.
44. Bednarz, J.C., *Cooperative hunting Harris' hawks (Parabuteo unicinctus).* Science, 1988. **239**(4847): p. 1525-1527.
45. Thaher, T., et al., *Binary Harris Hawks optimizer for high-dimensional, low sample size feature selection.* Evolutionary machine learning techniques: algorithms and applications, 2020: p. 251-272.
46. Balaha, H.M., E.M. El-Gendy, and M.M. Saafan, *CovH2SD: A COVID-19 detection approach based on Harris Hawks Optimization and stacked deep learning.* Expert systems with applications, 2021. **186**: p. 115805.
47. Golilarz, N.A., H. Gao, and H. Demirel, *Satellite image de-noising with Harris hawks meta heuristic optimization algorithm and improved adaptive generalized gaussian distribution threshold function.* Ieee Access, 2019. **7**: p. 57459-57468.

48. Houssein, E.H., et al., *A hybrid Harris Hawks Optimization with Support Vector Regression for air quality forecasting.* Scientific Reports, 2025. **15**(1): p. 2275.
49. Gezici, H. and H. Livatyali, *An improved Harris Hawks Optimization algorithm for continuous and discrete optimization problems.* Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022. **113**: p. 104952.
50. Khalifeh, S., et al., *Optimization of water distribution of network systems using the Harris Hawks optimization algorithm (Case study: Homashahr city).* MethodsX, 2020. **7**: p. 100948.
51. Tian, F., J. Wang, and F. Chu, *Improved multi-strategy harris hawks optimization and its application in engineering problems.* Mathematics, 2023. **11**(6): p. 1525.
52. Tikhamarine, Y., et al., *Rainfall-runoff modelling using improved machine learning methods: Harris hawks optimizer vs. particle swarm optimization.* Journal of Hydrology, 2020. **589**: p. 125133.
53. Debjit, K., et al., *An improved machine-learning approach for COVID-19 prediction using Harris Hawks optimization and feature analysis using SHAP.* Diagnostics, 2022. **12**(5): p. 1023.
54. Hu, J., et al., *Detection of COVID-19 severity using blood gas analysis parameters and Harris hawks optimized extreme learning machine.* Computers in Biology and Medicine, 2022. **142**: p. 105166.
55. Houssein, E.H., et al., *Optimal Sink Node Placement in Large Scale Wireless Sensor Networks Based on Harris' Hawk Optimization Algorithm.* IEEE Access, 2020. **8**(99): p. 19381-19397.
56. Srinivas, M. and T. Amgoth, *EE-hHHSS: Energy-efficient wireless sensor network with mobile sink strategy using hybrid Harris hawk-salp swarm optimization algorithm.* International Journal of Communication Systems, 2020. **33**(16): p. e4569.
57. Bhat, S.J. and S.K. Venkata, *An optimization based localization with area minimization for heterogeneous wireless sensor networks in anisotropic fields.* Computer Networks, 2020. **179**: p. 107371.
58. Alsaryrah, O., I. Mashal, and T.-Y. Chung, *Bi-objective optimization for energy aware Internet of Things service composition.* IEEE Access, 2018. **6**: p. 26809-26819.
59. Alsaryrah, O., I. Mashal, and T.-Y. Chung. *Energy-aware services composition for Internet of Things*. in *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. 2018. IEEE.
60. Seyfollahi, A. and A. Ghaffari, *Reliable data dissemination for the Internet of Things using Harris hawks optimization.* Peer-to-Peer Networking and Applications, 2020. **13**(6): p. 1886-1902.
61. Abualigah, L., et al., *Efficient text document clustering approach using multi-search Arithmetic Optimization Algorithm.* Knowledge-Based Systems, 2022. **248**: p. 108833.
62. Abualigah, L., et al., *Boosted Harris Hawks gravitational force algorithm for global optimization and industrial engineering problems.* Journal of Intelligent Manufacturing, 2023. **34**(6): p. 2693-2728.
63. Wunnava, A., et al., *A differential evolutionary adaptive Harris hawks optimization for two dimensional practical Masi entropy-based multilevel image thresholding.* Journal of King Saud UNIVERSITY-Computer and Information Sciences, 2022. **34**(6): p. 3011-3024.
64. Yang, X.-S. and S. Deb, *Cuckoo search: recent advances and applications.* Neural Computing and applications, 2014. **24**: p. 169-174.
65. Yang, X.-S. *Firefly algorithms for multimodal optimization*. in *International symposium on stochastic algorithms*. 2009. Springer.
66. Dhiman, G. and A. Kaur, *STOA: a bio-inspired based optimization algorithm for industrial engineering problems.* Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019. **82**: p. 148-174.
67. Jia, H., et al., *Pulse coupled neural network based on Harris hawks optimization algorithm for image segmentation.* Multimedia Tools and Applications, 2020. **79**: p. 28369-28392.
68. Golilarz, N.A., et al., *Optimized wavelet-based satellite image de-noising with multi-population differential evolution-assisted harris hawks optimization algorithm.* Ieee Access, 2020. **8**: p. 133076-133085.
69. Heidari, M., *Improving efficiency of photovoltaic system by using neural network MPPT and predictive control of converter.* International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2016. **6**(4): p. 1524-1529.
70. HA, E.A., et al. *Application of harris hawks algorithm for frequency response enhancement of two-area interconnected power system with DFIG based wind turbine*. in *2019 21st international middle east power systems conference (MEPCON)*. 2019. IEEE.
71. Devarapalli, R. and B. Bhattacharyya. *Application of modified harris hawks optimization in power system oscillations damping controller design*. in *2019 8th international conference on power systems (ICPS)*. 2019. IEEE.
72. Islam, M.Z., et al. *Optimal power flow using a novel Harris hawk optimization algorithm to minimize fuel cost and power loss*. in *2019 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technologies (CSUDET)*. 2019. IEEE.
73. Yousri, D., T.S. Babu, and A. Fathy, *Recent methodology based Harris Hawks optimizer for designing load frequency control incorporated in multi-interconnected renewable energy plants.* Sustainable Energy, Grids and Networks, 2020. **22**: p. 100352.

74. Jiao, S., et al., *Orthogonally adapted Harris hawks optimization for parameter estimation of photovoltaic models.* Energy, 2020. **203**: p. 117804.

FROM TEXT TO SCENT: A NATURAL LANGUAGE PROCESSİNG APPROACH TO PERFUME RECOMMENDATİON

İlayda BALAL[1*], Ceren CEYHAN[2], Ali ÇETİNKAYA[3]

[1] Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
[2] Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya [3] Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya
[*](223311018@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract – This study developed an intelligent perfume recommendation system that leverages natural language processing and API integration to match user preferences with suitable scents. The system analyzes user descriptions of desired perfume characteristics using advanced language models and performs similarity matching against a comprehensive perfume database. To ensure optimal performance and cost efficiency, a thorough comparative analysis of different large language models was conducted. Each model was evaluated based on note extraction accuracy, response time, and API costs, ultimately leading to the selection of the most suitable model with a superior price-to-performance ratio. The perfume database, which includes thousands of fragrances with detailed note compositions, was created using custom web scraping techniques rather than relying on preexisting datasets, ensuring comprehensive and up-to-date information. The system architecture consists of a Flask-based backend that processes user input through API integration, extracts perfume notes in English, and performs intelligent matching using normalized similarity algorithms. The frontend provides an intuitive interface where users describe their preferences in natural language, and the system returns ranked recommendations with similarity scores, highlighted matching notes, and detailed fragrance profiles. Future developments are planned to include dynamic database updates that automatically incorporate new scents and market trends. This real-world applicable system demonstrates the practical integration of AI APIs in e-commerce and shows significant potential for deployment in the fragrance industry by offering personalized shopping experiences and reducing decision fatigue for consumers.

Keywords – API Integration, Cost-Efficiency Analysis, E-commerce, Fragrance Note Extraction, Large Language Models (LLM), Natural Language Processing (NLP), Perfume Recommendation System, Personalized Shopping Experience, Web Scraping.

INTRODUCTION

The fragrance industry faces a significant challenge in guiding consumers through the overwhelming variety of perfume options available in today's market. In an environment with thousands of fragrances with complex note compositions, consumers frequently experience decision fatigue while trying to find scents that match their preferences. Traditional perfume selection methods largely rely on in-store testing or vague category descriptions, which can be time-consuming and inefficient, especially in the growing e-commerce sector.

Natural Language Processing (NLP) has emerged as a powerful tool for bridging the gap between human language and computational systems, enabling machines to understand and process textual descriptions of user preferences. Recent advances in Large Language Models (LLMs) have demonstrated extraordinary capabilities in extracting structured information from unstructured text, making these models particularly suitable for analyzing fragrance preferences expressed in natural language. These models can understand nuanced descriptions such as "warm vanilla with woody undertones" and extract specific perfume notes that align with the user's intent.

This study addresses the fragrance discovery problem by developing an intelligent perfume recommendation system that combines NLP techniques with API-based LLM integration. The system allows users to describe their desired fragrance characteristics in natural language, automatically extracts perfume notes from these descriptions, and matches them with a database containing detailed note compositions. A critical aspect of this research is conducting

a comparative analysis of seven different LLMs to determine the optimal model for note extraction, balancing accuracy and API costs.

The primary objectives of this research are threefold: First, to develop a functional perfume recommendation system that accurately interprets user preferences and provides relevant fragrance recommendations. Second, to conduct a comprehensive performance evaluation of multiple LLMs (gpt-4o-mini, gpt-oss-20b, gpt-oss-120b, kimik2-instruct-0905, llama-3.3-70b, llama-4-scout, and qwen3-32b) specifically for the perfume note extraction task.

Third, to perform a cost-effectiveness analysis that identifies the most economically viable model for production deployment, considering both accuracy metrics and API pricing structures.

The system architecture utilizes a Flask-based backend that processes user input through API integration with the selected LLM, extracts perfume notes in English, and performs intelligent matching using normalized similarity algorithms. The perfume database was created using web scraping techniques rather than relying on pre-existing datasets, thus providing comprehensive and up-to-date information including detailed note compositions for each fragrance. The frontend provides an intuitive interface where users describe their preferences in natural language, and the system returns ranked recommendations with highlighted matching notes, similarity scores, and detailed fragrance profiles.

To evaluate model performance, a standardized test set of 200 user comments was created, representing diverse fragrance preferences and note combinations. Each of the seven LLMs was tested on this identical dataset to ensure fair comparison. The evaluation employed multiple metrics: note extraction accuracy (exact match), Mean Absolute Error (MAE) to measure average deviation in note count predictions, Root Mean Square Error (RMSE) to penalize larger errors more heavily, and a novel Weighted Accuracy Score that accounts for the magnitude of prediction errors. This multi-metric approach ensures a comprehensive understanding of each model's performance beyond simple binary accuracy measurements.

The cost analysis incorporated real API pricing from the Groq platform and calculated total costs based on input and output token consumption for processing all 200 test comments. This economic evaluation is crucial for determining real-world deployment feasibility, as even small differences in per-request costs can accumulate significantly at scale. The study identified models that provide the best value proposition for production deployment by considering not only raw accuracy but also the accuracy-to-cost ratio.

This research contributes to the growing body of work on practical AI applications in e-commerce by demonstrating how modern LLMs can be effectively deployed to solve domain-specific problems. The findings provide actionable insights for developers and businesses looking to implement similar NLP-based recommendation systems, particularly regarding model selection strategies that balance performance requirements with budget constraints. Additionally, the methodology developed for comparative LLM evaluation can be adapted to other domains requiring structured information extraction from natural language inputs.

MATERIALS AND METHOD

The methodology of this study focused on the development of an intelligent recommendation system capable of transforming complex fragrance preferences expressed by users in natural language into structured perfume notes, and matching these notes to the most relevant perfumes in the database. The method consists of three main components: System Architecture and Data Flow, Comprehensive Performance Evaluation of Seven Different Large Language Models (LLMs), and the Precise Database Matching Mechanism.

System Architecture and Technological Infrastructure

The core infrastructure of the recommendation system was established using the Python programming language and the Flask web framework to provide a lightweight, modular, and high-performance backend. The textual input received from the user is processed via a dedicated API KEY on the Flask server. For the most critical function of the system, natural language analysis, API integration with various LLMs was provided through the Groq platform, which stands out with its inference capabilities. This integration is crucial for the system to respond to real-time user requests with low latency. The user's input preference (e.g., "warm vanilla with woody undertones") is passed to the selected LLM via the API, and the model is instructed to return the fragrance components extracted from this input only in English and in a standard list format to facilitate matching. This is a fundamental step that guarantees language consistency in the system's data flow.

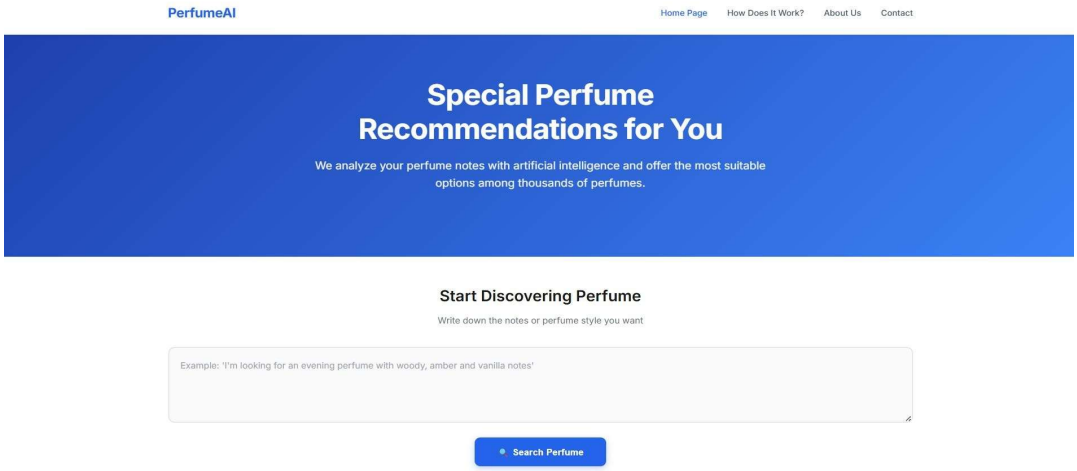


Figure 1. Project UI Page

Comprehensive Performance Evaluation of Large Language Models (LLMs)

The main objective of the project was to identify the LLM that is not only technically accurate but also the most operationally cost-efficient for the note extraction task. Therefore, seven different LLMs (gpt-4o-mini, gpt-oss-20b, gpt-oss-120b, kimi-k2-instruct, llama-3.3-70b, llama-4-scout, and qwen3-32b) were subjected to a systematic comparative analysis. The analysis was conducted using a standardized and human-labeled test set consisting of 200 user comments representing a wide spectrum of scent preferences. All seven models were tested on this identical dataset to ensure a fair and repeatable benchmark. To move model performance evaluation beyond a single pass/fail measurement, four different evaluation metrics were adopted:

1. **Exact Match Rate:** The Exact Match Rate measures the percentage of comments where the model made a perfect prediction. The calculation is quite straightforward: For each comment, the number of notes extracted by the model is compared against the actual number of notes in the Gold Standard. If these two values are exactly equal, it counts as an exact match. The ratio of the total number of exact matches to the total number of comments gives us the Exact Match Rate. This metric provides only a binary result (correct or incorrect) and does not take the magnitude of the error into account. That is, a model extracting 9 notes instead of 10 is considered "incorrect" in the same way as a model extracting 1 note instead of 10.Weighted Accuracy Score: A composite metric that accounts for the number of correctly extracted notes, as well as the addition of unnecessary notes (false positives) and the omission of necessary notes (false negatives), indicating the model's ability in both coverage and precision.
2. **Mean Absolute Error (MAE):** MAE expresses the average amount of error made by the model in terms of the number of notes, and it's calculated by taking the average of the absolute differences between the

prediction and the actual value. For each comment, the positive value (absolute value) of the difference between the model's predicted note count and the actual note count is found. All these absolute errors are summed up and divided by the total number of comments. Due to a specific rule in your code, if the model extracts 0 notes, the error amount is considered directly equal to the actual note count. Consequently, MAE provides information on how many notes the model was wrong by on average; for example, an MAE of 1.5 indicates the model made an average error of 1.5 notes.

3. **Root Mean Square Error (RMSE):** RMSE measures the average error similar to MAE, but it uses the square of the error in its calculation and then takes the square root of the result. This method particularly penalizes large errors more heavily, making them stand out more critically. For the calculation, the square of the error amount for each comment is taken, these squares are summed up, and their average is found (this is the Mean Squared Error - MSE). Finally, the square root of this average is taken to get the RMSE. If the RMSE value is significantly higher than the MAE value, it indicates that the model has made large deviations (e.g., extracting 2 notes instead of 10) in note counting, even if infrequently.
4. **Weighted Accuracy Score:** The Weighted Accuracy Score evaluates the model's performance in a more nuanced way by scoring based on the distance of the error. A certain score is assigned based on the magnitude of the error made by the model: 0 error earns 100 points, 1 error 75 points, 2 errors 50 points, 3 errors 25 points, and 4 or more errors yield 0 points. The critical "New Rule" in your code dictates that in all cases where the model extracts 0 notes, a score of 0 points is given directly, regardless of the actual error magnitude. This severely penalizes the model for completely failing to extract any notes. The total weighted score collected from all comments is then ratioed against the maximum possible total score to form the Weighted Accuracy percentage. This score is the most comprehensive metric, balancing both accuracy and the smallness (precision) of the model's errors.

To determine the real-world deployment feasibility of the system, the total cost for each model was calculated, considering the token consumption required to process all 200 test comments and the current API pricing of the Groq platform. This cost was combined with the obtained accuracy scores to derive the Accuracy per Dollar metric. This analysis was the cornerstone for identifying the model with the highest cost-effectiveness—the one that provides the optimal balance between performance and budget constraints, rather than just the one with the highest raw accuracy.

Database Matching and Recommendation Mechanism

The structured English notes obtained from the LLM ultimately interact with the database to find perfumes that match the user's request. The perfume database was created using web scraping techniques to avoid dependence on pre-existing commercial sets, and it is stored locally in JSON file format, containing rich composition information for each perfume, including detailed Top, Middle, Base notes, and a combined list of these (all_notes). Normalization is a mandatory step to prevent errors and inconsistencies in the matching process. The normalize_note() function converts both the notes in the LLM output and the notes in the database to all lowercase and removes unnecessary separators or spaces. The find_matching_perfumes() function scans all perfumes in the database and sorts the list based on matching notes. The final recommendation list presented to the user is created by prioritizing perfumes with the highest note match. Additionally, to reinforce visual feedback, the notes sought by the user are highlighted within the recommended perfume's note list via the highlight_matching_notes function using HTML tags, transparently presenting the rationale for the recommendation.

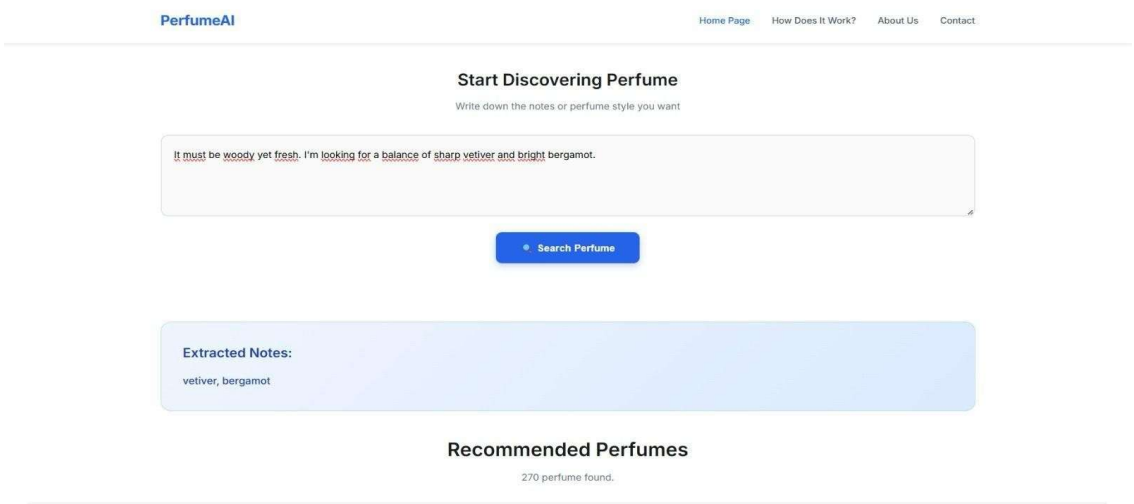


Figure 2. Fragrance Note Extraction from Text

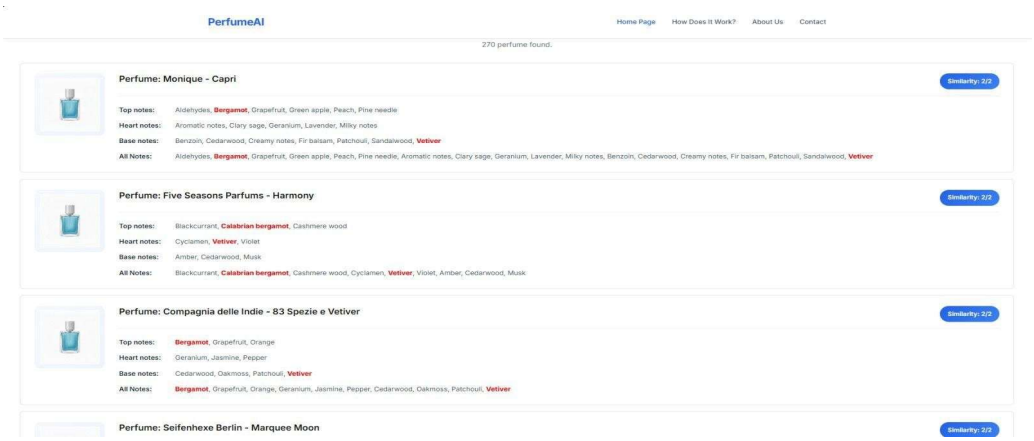


Figure 3. Perfumes Recommended Based on Note Match

In Figure 4, those who are managed in general are mentioned.

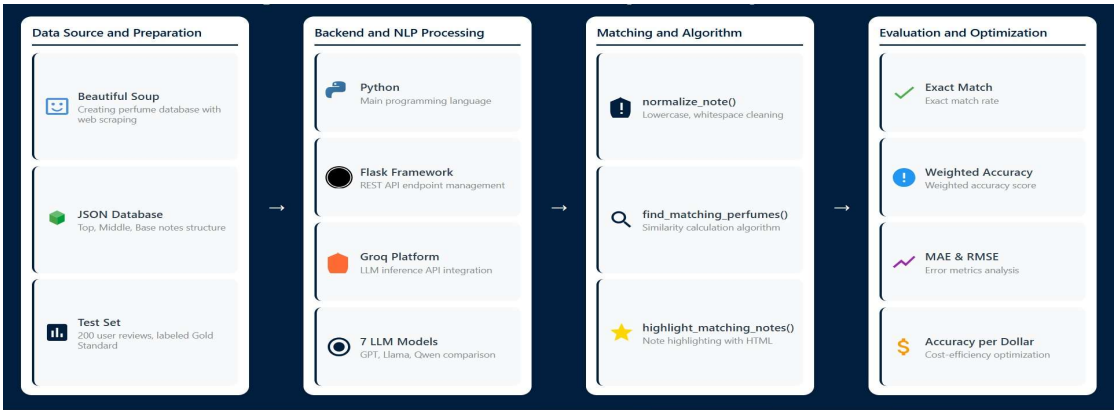


Figure 4. Perfume Recommendation System - Project Framework

RESULTS AND DISCUSSIONS

This study has successfully proven the feasibility and effectiveness of an intelligent fragrance recommendation system that works by translating complex scent preferences expressed by users in natural language into structured perfume notes in real-time. The LLM comparative analysis and the precise database matching mechanism that form the foundation of our methodology ensured both the TECHNICAL accuracy and operational efficiency of the system.

Evaluation of Large Language Model (LLM) Performance

A comprehensive benchmarking analysis involving seven different LLMs was critical in identifying the most suitable model for the task of converting natural language inputs into structured note lists. The results obtained from a standardized 200-review test set demonstrated clear performance differences among the models:

- **Highest Raw Accuracy:** The llama-3.3-70b model achieved the highest Exact Match rate at 85.50%. This indicates the model's superior ability to correctly reproduce the desired format and all Gold Standard notes.
- **Best Overall Performance:** llama-3.3-70b scored the highest Weighted Accuracy at 95.25%. This metric provides the most comprehensive measure of the models' overall consistency and reliability, as it also accounts for error distance and, crucially, the heaviest penalty for zero-note extraction errors.
- **Error Consistency:** The RMSE (Root Mean Square Error) metrics measured model reliability by heavily penalizing large deviations (extracting too many or too few notes). The llama-3.3-70b model produced the most consistent outputs, demonstrated by the lowest RMSE value of 0.50. This is critical for user experience, as overly long or short note lists can disrupt the matching mechanism.

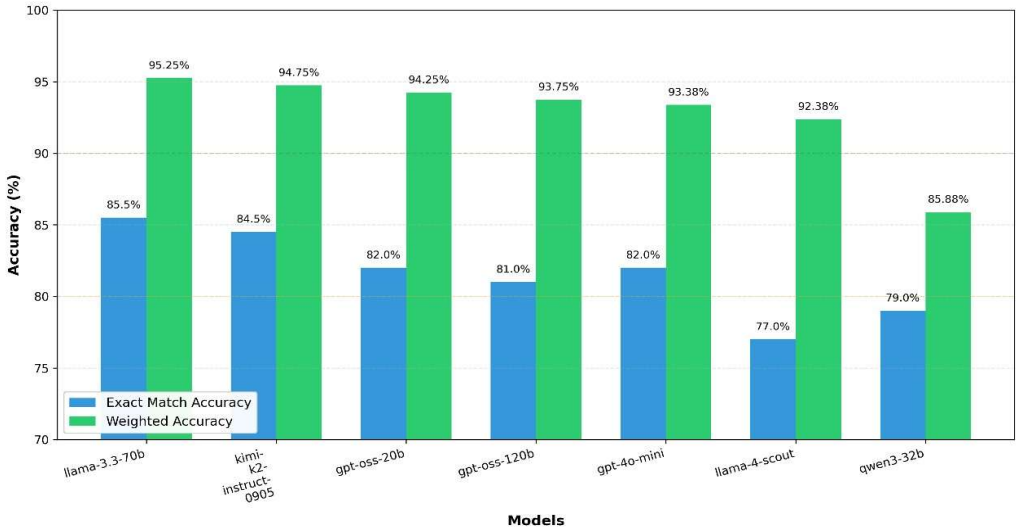


Figure 5. Exact Match and Weighted Accuracy

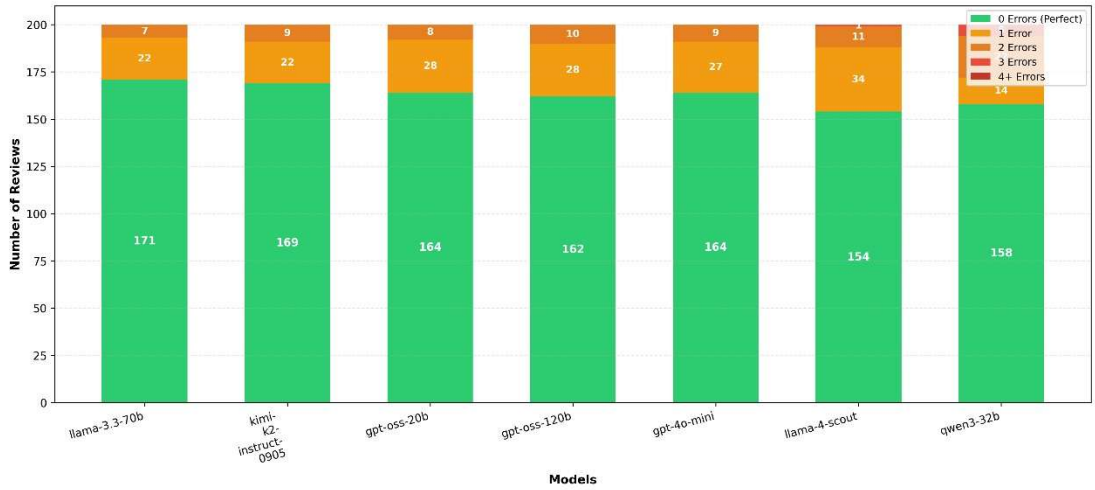


Figure 6. Error Distribution Across Models

The Accuracy per Dollar metric, the most decisive factor for the system's real-time commercial deployment, yielded the following result:

- **Highest Cost-Efficiency:** The gpt-oss-20b model achieved the highest Accuracy per Dollar score by a clear margin, at 8,976.19. This result demonstrated that even though this model did not score the highest in raw accuracy, its low token cost combined with the low latency offered by the Groq platform made it the most operationally sustainable and efficient choice.
- **Discussion:** This finding emphasizes the importance of striking an optimal balance between task-specific accuracy and cost-effectiveness in the development of commercial AI systems, rather than focusing solely on the "largest" or "highest-performing" LLMs. The high speed and competitive pricing provided by the Groq platform offered a critical technological advantage in meeting the system's real-time recommendation requirements.

The comprehensive benchmark revealed a dichotomy in optimal model selection. The **llama-3.3-70b** model clearly demonstrated superior performance in **accuracy and reliability**, achieving the highest Exact Match (85.50%) and Weighted Accuracy (95.25%), along with the most consistent output (lowest RMSE of 0.50). However, when the decisive factor of **commercial viability** was considered, the **gpt-oss-20b** model emerged as the chosen option. This model delivered the highest **Accuracy per Dollar** score (8,976.19) by a significant margin. Despite not having the highest raw accuracy, its low token cost and the low latency provided by the Groq platform ultimately rendered it the most operationally sustainable and efficient choice for real-time commercial deployment.

Table 1. Comparison of LLM Performance, Cost, and Speed Metrics

ID	Model	Total Cost ($)	Exact Match (%)	Weighted Accuracy (%)	Accuracy per Dollar	Speed (TPS)
1	gpt-oss-20b	$0,0105	82,00%	94,25%	8.976,19	1.000
2	llama-4-scout	$0,0124	77,00%	92,38%	7.450,00	594
3	gpt-oss-120b	$0,0210	81,00%	93,75%	4.464,29	500
4	gpt-4o-mini	$0,0210	82,00%	93,38%	4.446,67	500
5	qwen3-32b	$0,0235	79,00%	85,88%	3.654,47	662

6	llama-3.370b	$0,0355	85,50%	95,25%	2.683,10	394
7	kimi-k2instruct-0905	$0,1100	84,50%	94,75%	861,36	200

Effectiveness of the Database Matching Mechanism

Matching the structured notes obtained from the LLM against the database is the final step where the system delivers value to the user. The developed system demonstrated a high success rate in converting users' complex, subjective scent preferences into quantitative, structured data. The system's fundamental success lies in its lowlatency response capability achieved using the Groq platform and cost-effective LLMs.

Future Work:

- **Weighting Mechanism:** The current system only uses the number of note matches. In the future, recommendation sensitivity can be increased by integrating weighting algorithms such as TF-IDF that consider the importance of notes (e.g., higher weight if "vanilla" is a main note) or a structure that assigns different weights to Top/Middle/Base notes.
- **User Feedback:** The system can be enriched with a machine learning component that continuously improves its performance by collecting real user feedback (e.g., liked/disliked recommendations) and adding a Scoring or Rating Mechanism.
- **More Comprehensive Database:** A dynamic database connection can be provided, specifically to include niche brands and newly released perfumes.

In conclusion, this study has laid the foundation for an innovative and commercially viable perfume recommendation system that combines natural language processing with traditional database lookups, optimized for cost and performance.

REFERENCES

[1] Wu L, Zheng Y, Chen X, et al. A Survey on Large Language Models for Recommendation. arXiv preprint arXiv:2305.19860 2024.
[2] Geng S, Liu S, Fu Z, Ge Y, Zhang Y. Recommendation as Language Processing (RLP): A Unified Pretrain, Personalized Prompt & Predict Paradigm (P5). In: RecSys '22: Proceedings of the 16th ACM Conference on Recommender Systems; 2022. p. 299-315.
[3] Saito H, Nakayama T, Watanabe K. An NLP-Based Perfume Note Estimation Based on Descriptive Sentences. Appl Sci 2024;14(20):9293.
[4] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention Is All You Need. In: Advances in Neural Information Processing Systems 30; 2017. p. 5998-6008.
[5] Devlin J, Chang MW, Lee K, Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In: Proceedings of NAACL-HLT; 2019. p. 4171-4186.
[6] Reimers N, Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. In: Proceedings of EMNLP-IJCNLP; 2019. p. 3982-3992.
[7] Manning CD, Raghavan P, Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge UNIVERSITY Press; 2008.
[8] Salton G, McGill MJ. Introduction to Modern Information Retrieval. New York: McGraw-Hill; 1983.
[9] Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. J Mach Learn Res 2011;12:2825-2830.
[10] Grinberg M. Flask Web Development: Developing Web Applications with Python. 2nd ed. O'Reilly Media; 2018.
[11] Fielding RT. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral dissertation. UNIVERSITY of California, Irvine; 2000.
[12] Zhang S, Yao L, Sun A, Tay Y. Deep Learning Based Recommender System: A Survey and New Perspectives. ACM Comput Surv 2019;52(1):1-38.

[13] Bobadilla J, Ortega F, Hernando A, Gutiérrez A. Recommender Systems Survey. Knowl-Based Syst 2013;46:109-132.
[14] Mikolov T, Chen K, Corrado G, Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. In: Proceedings of Workshop at ICLR; 2013.
[15] Raschka S, Patterson J, Nolet C. Machine Learning in Python: Main Developments and Technology Trends in Data Science, Machine Learning, and Artificial Intelligence. Information 2020;11(4):193.
[16] Nikitina L, Furuoka F. Words of Scents: A Linguistic Analysis of Online Perfume Reviews. Int J Appl Linguist 2023;33(2):367-384.
[17] Brown TB, Mann B, Ryder N, et al. Language Models are Few-Shot Learners. In: Advances in Neural Information Processing Systems 33; 2020. p. 1877-1901.
[18] Raffel C, Shazeer N, Roberts A, et al. Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer. J Mach Learn Res 2020;21(140):1-67.
[19] Mitchell R, McKenna E. Web Scraping with Python: Collecting More Data from the Modern Web. 2nd ed. O'Reilly Media; 2019.

RECYCLING OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES

Muhammed Said KOÇAK
Department of Automotive Engineering, Selcuk UNIVERSITY Institute of Sciences, Selçuklu, Konya
(248263002002@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract – The use of internal combustion engine vehicles is gradually decreasing due to the decrease in fossil fuel reserves and environmental impacts (climate change, air pollution, etc.) caused by high emission values. This situation has led the automotive sector towards electric vehicles and initiated a transformation supported by incentive policies in many countries. However, the demand for electric vehicles and the increase in their use bring new environmental problems, especially the management of end-of-life lithium-ion battery waste. In this context, battery recycling processes play a critical role in recovering precious metals, reducing the environmental impact of waste and developing circular economy models. In addition to supporting the sustainable use of resources, recycling activities also contribute to the cost-effectiveness of electric vehicles and increase green employment opportunities.

Keywords – Electric Vehicles, Battery Waste, Recycling, Waste Management, Green Employment

GİRİŞ

Elektrikli araçlar, günümüz ulaşım sistemlerinde çevresel olumsuzlukları azaltmada önemli rol oynamaktadır. Egzoz emisyonu üretmemeleri, hem hava kirliliğinin önlenmesine hem de küresel iklim değişikliğiyle mücadeleye önemli katkı sağlamaktadır. Konvansiyonel motorlu araçlarla yapılan karşılaştırmalı analizler, bu araçların yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkardığı zararlı emisyonlarının belirgin şekilde daha düşük olduğunu göstermektedir. (Ambrose ve O'Dea, 2021). Bununla beraber diğer çevresel etkiler de dikkate alındığı takdirde iki teknoloji arasında belirgin bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. Çevresel etkilerin eşit ağırlıklandırma yöntemiyle değerlendirilmesi durumunda, çevresel etki bakımından elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre %4 oranında daha yüksek bir etkisinin olduğu belirtilmiştir (Üçtuğ, 2022).

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sonunda oluşturacağı atık miktarının 2040 yılı itibarıyla yılda 340.000 tona ulaşması beklendiği düşünülmektedir. Bu artış, kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar için farklı tipte atık yönetim sistemlerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Kullanım ömrü olan bataryaların farklı alanlarda yeniden kullanımı, kıymetli malzemelerin geri dönüşümü ve düşük değere sahip malzemelerin güvenli bertarafı olmak üzere çok yönlü bir atık yönetim stratejisini zorunlu kılmaktadır. Ancak, özellikle kobalt içermeyen düşük değerli batarya türlerinde, geri dönüşümün ekonomik açıdan sürdürülebilirliği zayıftır. Bataryaların çevresel riskleri (organik elektrolit sızıntısı, ağır metal ve reaktif madde içeriği) dikkate alındığında, geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Atık miktarının gelecekteki büyüklüğü kesin olarak öngörülememektedir. Ancak bu husuta gerekli altyapı çalışmalarının yapılması, proaktif adımların atılması ve küresel politikaların vakit kaybetmeden oluşturulması kritik bir ihtiyaç olduğu öngörülmektedir (Richa ve ark., 2014).

Söz konusu bu çalışmada kullanım ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının; küresel iklim değişikliği ile mücadele, sürdürülebilir kaynak yönetimi ve döngüsel ekonomiye destek sağlanması maksadıyla lityum iyon bataryaların geri kazanım süreçleri hakkında yapılan çalışmalar değerlendirilerek, bilgilendirme yapılması hedeflenmektedir.

2. Elektrikli Araçların Konvansiyonel Araçlara Göre Avantajları

Konvansiyonel taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorlar (ICE), fosil yakıtların yanması sonucu karbondioksit (CO_2), hidrokarbonlar (HC), karbonmonoksit (CO) ve azot oksitler (NO_x) gibi çevreye zararlı gazların salımına neden olmaktadır. Buna karşın, elektrikli araçlar (EV) hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, EV'lerin mil başına enerji maliyeti yaklaşık 2 cent iken, bu değer içten yanmalı motorlu araçlarda 12 cent'e kadar çıkabildiği bildirilmiştir. Ayrıca, EV sahipleri yıllık ortalama 15 saatlik yakıt ikmal süresinden tasarruf ederek zaman avantajı da elde etmektedir.

EV sistemleri, yakıt hücreleri, güneş panelleri ve rejeneratif frenleme gibi çeşitli yenilikçi enerji üretim teknolojileriyle entegre çalışabilme yeteneğine sahiptir. Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde ise, EV'ler depolanan enerjinin yaklaşık %75'ini doğrudan itici güç olarak kullanabilirken, bu oran ICE taşıtlarda yalnızca %15 seviyesindedir; geri kalan enerji ise ısıya dönüşerek kaybolmaktadır.

Bununla birlikte, EV teknolojisinin yaygınlaşmasındaki en büyük engellerden biri batarya maliyetidir. Bernstein Research ve Ricardo PLC tarafından hazırlanan bir rapora göre, tipik bir EV'nin toplam maliyetinin %45,3'ü batarya sisteminden kaynaklanmaktadır. Bu durum, batarya teknolojilerinin hem maliyet hem de performans açısından iyileştirilmesini, otomotiv endüstrisinin öncelikli araştırma ve geliştirme alanlarından biri haline getirmiştir.(Tie ve Tan, 2013)

Buna ek olarak, elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümü, kaynakların korunması, batarya maliyetlerinin azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. (Luo ve ark., 2025) Batarya geri dönüşümüne ilişkin yapmış oldukları sistematik bir derleme çalışmasında, bu alandaki çalışmaları "belirleyiciler, süreçler ve sonuçlar" başlıkları altında sınıflandırmıştır. Devlet politikaları başlıca yönlendirici unsur olarak öne çıkarken, geri dönüşüm süreçlerinde ikincil kullanım ve demontaj temel yöntemler olarak tanımlanmıştır. Çevresel ve ekonomik etkiler detaylı biçimde incelenmiş; ancak sosyal boyutlara yeterince yer verilmemiştir. Gelecekte, daha kapsamlı ve bölgesel çeşitlilik içeren çalışmalar ile sosyal sürdürülebilirliğe odaklanılması önerilmektedir.

3. Lityum-İyon Batarya Yapısı ve Türleri

Lityum iyon piller (LIB), kullanım alanlarına ve üreticilere bağlı olarak silindirik, prizmatik veya poşet hücre (hücresel) formlarda üretilmektedir.

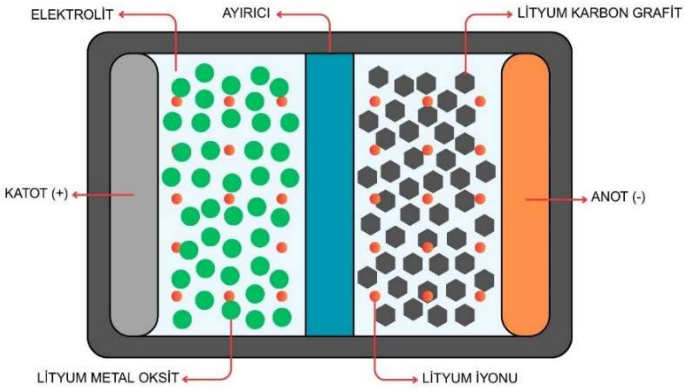
3.1. Yapısal Bileşenler

Lityum iyon pillerin yapısı (Şekil 2.1) genel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Dış Kasa (%20–26): Genellikle demir-nikel alaşımı veya alüminyum içerir.
- Anot (~%17): Ana bileşeni grafittir.
- Katot (~%27): Lityum ve metal oksitler içerir.
- Elektrolit (%10–15): Dipolar çözücüler içinde çözünmüş yüksek konsantrasyonlu lityum tuzlarından oluşur.
- Akım Toplayıcı (~%13): Bakır ve alüminyum folyo kullanılır.
- Ayırıcı (%4–10): Katot ve anotu ayıran mikro boyutlu polimerik bir membrandır.
- Bağlayıcı (~%4): Genellikle PVDF (Poliviniliden florür) kullanılır.(Birlik ve ark., 2024)

3.2. Çalışma Prensibi

Deşarj (boşalma) sırasında, lityum iyonları anottan katoda doğru hareket etmektedir. Bu süreçte elektron akışı sağlanır. Şarj sırasında ise, harici güç kaynağından gelen enerjiyle iyonlar ters yönde yani katottan anoda doğru hareket etmektedir (Birlik ve ark., 2024). Bu bileşenlerin bir araya gelmesiyle birlikte lityum-iyon bataryalar, hem enerji depolama hem de yeniden şarj edilebilme özelliklerinin olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1. Lityum-İyon Pillerin yapısı

3.3. Lityum Batarya Türleri

Lityum piller, yüksek enerji yoğunlukları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan şarj edilebilir pil türü konumundadır. Elektrolit olarak sıvı çözücüler veya polimerler kullanılabilir. Polimer elektrolitler prizmatik hücre tasarımına olanak paketlemede kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca, daha az dış ambalaj gerektirmeleri toplam ağırlığın azaltılmasına katkı sağlar. Lityum iyon piller, farklı anot ve katot malzemeleriyle geniş bir kimyasal çeşitlilik sunmakta olup (Çizelge 1.1), ticari uygulamalarda genellikle grafit anot tercih edilmektedir. (Alyar, 2022)

Çizelge 2.1. Lityum Batarya Türleri(Alyar, 2022)

Pil Türü	**Açıklama**

Lityum Kobalt Oksit ($LiCoO_2$)	Lityum Kobalt Oksit hücreleri, yüksek enerji yoğunluğu (yaklaşık 200 Wh/kg) sunar ve en eski ticari lityum iyon pil tipidir. Ancak, termal kaçak riski nedeniyle güvenlik açısından sınırlamaları vardır.
Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$)	Lityum Demir Fosfat piller ise 120–160 Wh/kg arasında değişen enerji yoğunluğuna sahip olup, yüksek termal ve kimyasal kararlılık sunar. Özellikle yüksek akım çekilebilmesi ve uzun çevrim ömrü ile öne çıkar
Lityum Manganez Oksit ($LiMn_2O_4$)	Lityum Manganez Oksit hücreleri, daha iyi termal kararlılık sağlarken (yaklaşık 120 Wh/kg), çevrim ömrü elektrolitte manganez çözünmesi nedeniyle sınırlı kalabilir. Otomotiv sektöründe bazı hibrit araçlarda kullanılmıştır.
Lityum Nikel-Kobalt-Manganez (Li-NCM)	Lityum Nikel-Kobalt-Manganez piller, nikel, kobalt ve mangan birleşimi sayesinde herhangi bir metal oksite göre daha iyi özellikler gösterir.Tesla ve Chevrolet gibi markalar bu teknolojiyi kullanmaktadır.
Lityum Titanat ($Li_4Ti_5O_{12}$)	Lityum Titanat hücreleri ise düşük sıcaklık koşullarında performansı iyileştirilmiştir. Honda Fit EV ve Mitsubishi i-MiEV'de lityum titanat pilleri tercih etmektedir

4. Diğer Batarya Türleri

4.1. Nikel Kadmiyum (Ni-Cd)

Nikel kadmiyum pillerin teorik özgül enerjisi 244 Wh/kg iken, ticari olarak ulaşılabilen değer yaklaşık 40 Wh/kg'dır. Bu pillerde nikel oksihidroksit ve kadmiyum elektrotları arasında mobil iyon olarak hidroksil iyonları görev alır. Reaksiyonlar sonucunda 0.45 V ve 0.81 V gerilim potansiyelleri elde edilir. Kadmiyumun çevresel zararı nedeniyle, Avrupa Birliği tarafından yalnızca tıbbi ekipmanlar ve bazı acil durum sistemleri dışında kullanımı yasaklandığı belirtilmiştir.(Alyar, 2022)

4.2. Nikel Metal Hidrür (NiMH)

NiMH pillerde, nikel kadmiyum hücrelerinde kullanılan nikel oksihidroksit anot korunurken, kadmiyum katot yerine hidrojen emici metal alaşımı kullanılır. Teorik özgül enerjisi 240 Wh/kg olan bu hücrelerin pratikteki değerleri yaklaşık 100 Wh/kg'dır. Deşarj sırasında gerçekleşen yarı hücre reaksiyonlarında sırasıyla 0.45 V ve 0.83

V potansiyel oluşur. Bu pil tipi ilk olarak 1997 yılında Honda EV Plus modelinde kullanılmış; günümüzde ise Lexus CT200h ve Toyota Prius C gibi düşük batarya kapasitesine sahip hibrit araçlarda yer almaktadır.(Alyar, 2022)

4.3. Kurşun Asit

Kurşun asit piller, düşük maliyetli malzemelerle üretilebilen, güvenilir ve hücre başına yaklaşık 2V voltaj sağlayan eski bir pil teknolojisidir. Pozitif elektrot kurşun dioksit, negatif elektrot ise süngerimsi kurşun içerir. Deşarj sırasında her iki elektrot da kurşun sülfata dönüşürken sülfürik asit tüketilir ve su oluşur. Bu kimyasal dönüşüm tersinir olup, şarj sırasında plakalar ilk haline döner ve sülfürik asit yeniden oluşur. Her ne kadar ekonomik ve yaygın kullanıma sahip olsa da, özgül enerji değerinin 40 Wh/kg altında kalması ve sınırlı çevrim ömrü nedeniyle günümüzde ağırlıklı olarak otomotivlerde (ör. marş, aydınlatma, ateşleme sistemleri) ve bazı endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. (Alyar, 2022)

5. Bataryalarda Geri Dönüşüm

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sona erdiğinde, çevresel etkilerin azaltılması amacıyla genellikle geri dönüşüm yoluna gidilmektedir. Farklı batarya türleri için farklı geri dönüşüm teknikleri uygulanmaktadır. Pb-asit bataryalar fiziksel olarak parçalanmakta, plastik bileşenleri yıkandıktan sonra eritilerek topak haline getirilmekte ve yeniden üretimde kullanılmaktadır. Kurşun içeriği ise eritilip safsızlıklarından arındırılarak yeni bataryalarda değerlendirilmektedir. Bataryalarda bulunan sülfürik asit, nötralizasyon yoluyla suya deşarj edilmekte ya da sodyum sülfata dönüştürülerek çeşitli sanayi alanlarında kullanılmaktadır. Bu batarya türlerinde %98'e varan geri dönüşüm oranına ulaşılmıştır. Ancak kurşunun toksik etkileri nedeniyle işlemler çevresel hassasiyetle yürütülmelidir. Ni-Cd ve NiMH bataryalarda ise plastik ve metal ayrımı sonrasında yüksek sıcaklıkta metal geri kazanımı yapılmakta ve %100 geri dönüşüm sağlanmaktadır. Geri dönüşüm çevresel etkileri azaltmakla birlikte, özellikle Li-ion bataryalar söz konusu olduğunda enerji tüketimi açısından dezavantajlar barındırmaktadır. Çizelge 4.1'de elektrikli araçların bataryalarında geri dönüşüm faaliyetleri üzerinde çalışan bazı firmalar verilmiştir. Li-ion bataryaların geri dönüşümü, üretiminden daha fazla enerji gerektirebilmektedir. Örneğin, üretim aşamasında 25–30 kWh/kg enerji tüketilirken, geri dönüşümde bu rakam 47 kWh/kg'a kadar çıkabilmektedir. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda bu bataryalardan elde edilen lityumun %56-61 oranında başka ürünlerde değerlendirilebileceği gösterilmiştir(Can Güven ve Gedik, 2019).

Çizelge 4.1. Ektrikli araç bataryalarında geri dönüşüm faaliyetleri üzerinde çalışan bazı firmalar (Can Güven ve Gedik, 2019)

Firma	Ülke	Batarya tipi
SNAM	Fransa	NiCd, NiMH, Li-ion

Umicore	Belçika	Li-ion, Li-polimer, NiMH
Accurec	Almanya	Li içeren bataryalar
Recupyl	Fransa	Li-ion
Toxco	ABD	Tüm batarya çeşitleri
LithoRec	Almanya	Li içeren bataryalar
Valdi	Fransa	-
Retriev Technologies	ABD	Li-ion, NiMH, Pb-asit
Honda	Japonya	NiMH
Axeon	İngiltere	Pb-asit, Li-ion

6. Lityum-İyon Bataryaların Çevresel Etkileri ve Atık Yönetimi

Yaşam döngüsü değerlendirmelerine göre, EV üretimi, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla %59–60 oranında daha fazla CO_2 emisyonuna yol açmaktadır. Bu farkın çoğunluğu, batarya, çekiş motorları ve elektronik kontrol birimlerinin üretiminden kaynaklanmaktadır. EV bataryaları, araçların toplam çevresel etkilerinin %40–50'sini oluşturmakta; üretim süreci ise insan toksisitesi ve ötrofikasyon potansiyelini artırmaktadır. Batarya imalatında kullanılan kaynaklar sınırlı ve coğrafi olarak farklı bölgelere dağılmış olup, tedarik zincirinde sorunlara neden olabilmektedir. Bilhassa lityum gibi hammaddelerin çıkarılması yüksek enerji ve su tüketimi gerektirmektedir (Amusa ve ark., 2024). Geleneksel lityum çıkarma yöntemlerinin doğal kaynaklar etkisinin yüksek olduğu görülmektedir; örneğin Şili'deki Salar de Atacama'da bir ton lityum üretmek için 1.900 ton su tüketilmekte ve bu suyun büyük kısmı buharlama nedeniyle kaybedilmektedir. Buna karşılık, atık bataryaların geri dönüşümünü sağlayarak aynı miktarda lityumun çok daha az kaynak kullanılarak elde edilebilmesi, sürdürülebilir açısından kritik önem taşımaktadır. (Rautela ve ark., 2023). Ayrıca batarya montajlanması aşamasında yüksek enerji tüketimi ve çevreye çeşitli hava kirleticilerinin salımı söz konusudur. EV bataryaları kullanım aşamasında da enerji kaynağına bağlı olarak değişen çevresel etkiler görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde önemli yerinin olduğu ülkeler, çevresel açıdan daha iyi sonuçlar elde ederken; fosil yakıtları daha yüksek oranda kullanan ülkelerde çevresel performans düşük seviyelerde kalır. Bu durumda, batarya üretiminde yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve döngüsel ekonomi doğrultusunda malzeme verimliliğinin desteklenmesi gereklidir.

Kullanılmış lityum-iyon bataryaların (LiB) güvenli şekilde işlenmesi ve toplanması, 3R (azalt, yeniden kullan, geri dönüştür) prensiplerinin uygulanabilmesi açısından temel bir zorluk teşkil etmektedir. LiB'ler, yangın, patlama ve toksik kimyasal salımı riskleri nedeniyle tehlikeli atık olarak sınıflandırılmakta ve bu durum, hem

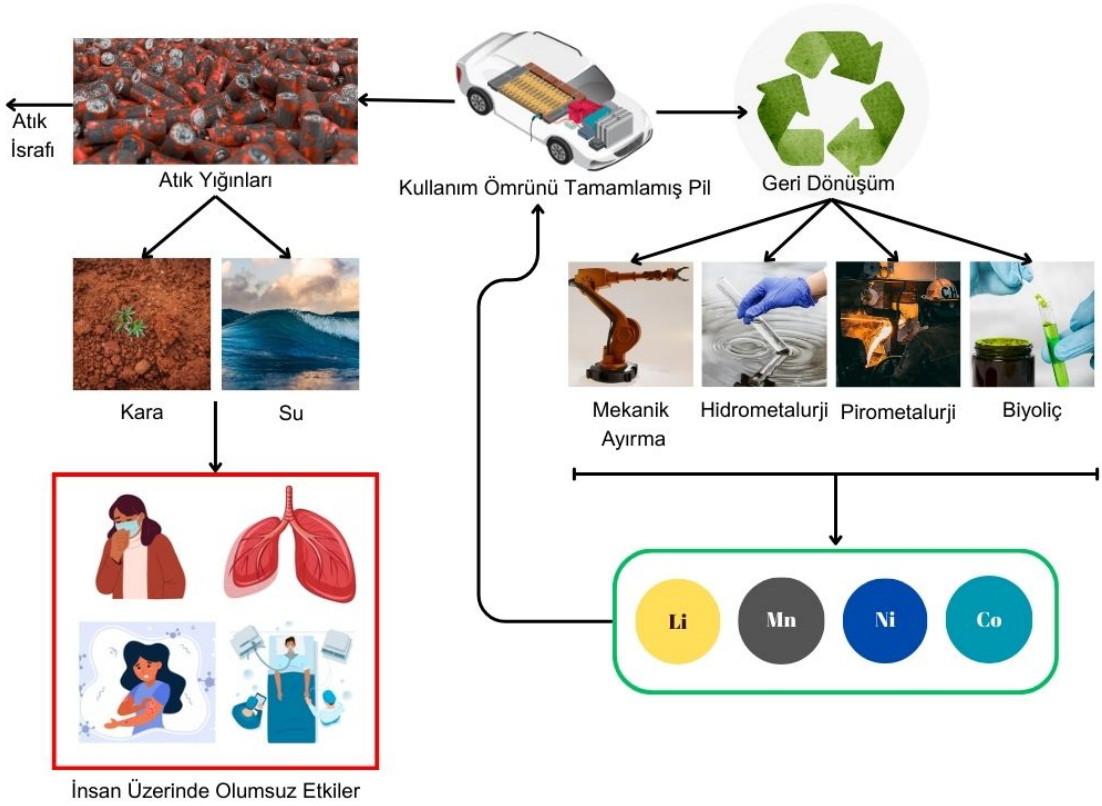
bataryaların elektrikli araçlardan güvenli bir şekilde çıkarılmasını hem de geri dönüşüm tesislerine taşınmasını karmaşık hâle getirmektedir. Elektrikli araç tasarımlarındaki farklılıklar, söküm işlemlerinde uzmanlık, özel araçlar ve bilgi gereksinimini artırmakta; standart olmayan batarya paketleri, zaman ve maliyet açısından verimliliği düşürmektedir. Robotik söküm sistemleri geliştirilse bile tasarım farkları bu teknolojilerin kullanımını güçleştirmektedir.

Geri dönüşüm tesislerine yapılan taşıma işlemleri de ciddi lojistik sorunlar doğurmakta; özellikle tehlikeli atıkların taşınması, toplam geri dönüşüm maliyetlerinin %40'ını oluşturabilmektedir. Düşük toplama oranları (örneğin AB'de %5'in, Avustralya'da %3'ün altında) bu süreci daha da zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, üreticilerden tüketicilere kadar tüm paydaşları kapsayan işbirlikçi bir ağın oluşturulması, atık bataryaların etkili şekilde geri kazanımı açısından kritik önemdedir. Yerel toplama noktalarının yaygınlaştırılması, geri dönüşüm tesislerinin atık kaynaklarına yakın konumlandırılması ve tersine lojistik sistemlerinin iyileştirilmesi önerilmektedir.

Ayrıca, batarya paketlerinin kullanım ömrü boyunca izlenebilirliğine dikkat edilmesi, toplama ve taşıma verimliliğini artırabilecek faaliyetlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu süreçlerin sürdürülebilirliğini sağlamak adına, genişletilmiş üretici sorumluluğu gibi düzenleyici politikaların geliştirilmesi ve üreticilere ürünlerin ömrü sonundaki yönetim yükümlülüklerinin verilmesi önerilmektedir. Çin ve AB gibi bölgelerde uygulanan bu tür politikaların yanı sıra, tüketicilere teşvikler (depozito sistemleri, indirimler, kolay ulaşılabilir iade noktaları) toplama oranlarını artırmada etkili olabilir. Tüm bu unsurların bütüncül ve iş birliğine dayalı bir yaklaşımla ele alınması, atık LiB'lerin çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için gerekmektedir. (Amusa ve ark., 2024).

7. Lityum-İyon Bataryaların Geri Dönüşüm Yöntemleri

Lityum iyon pillerin geri dönüşümünü (Şekil 2.1.) teşvik eden başlıca etkenler; metal fiyatları, doğal kaynakların ve hammaddelerin korunması, güvenlik, çevresel toksisitenin azaltılması, CO_2 emisyonlarının en aza indirilmesi, enerji tüketiminin dengelenmesi ve atık miktarının azaltılmasıdır. Geri dönüşüm süreci yalnızca lityumun değil; alüminyum, kobalt, demir, manganez ve nikel gibi diğer değerli bileşenlerin de kazanılmasına olanak tanımaktadır. Ancak, geri dönüşüm sürecinde karşılaşılan temel zorluklardan biri, LiB'lerin farklı özellikler gösteren bileşen çeşitliliğidir. Hücre tipi ve fiziksel yapı farklılıkları, özellikle silindirik hücrelerin prizmatik veya poşet hücrelere kıyasla elektrot ayrımında daha karmaşık olması gibi sorunlara yol açabilmektedir. Ayrıca, farklı Lityum iyon pillerin kimyasal yapıları da malzeme geri kazanımında ek zorluklar yaratmaktadır. Geri dönüşüm süreci genellikle pilin deşarj edilmesiyle başlayan ön işlem aşamasıyla başlar; bu aşamada BMS (pil yönetim sistemi), paket ve elektrot bileşenleri gibi parçalar ayrıştırılır. Geri dönüşümün ardından elde edilen çeşitli malzemeler, tekrar pil üretiminde kullanılabileceği gibi farklı endüstriyel alanlarda da değerlendirilebilir (Lima ve ark., 2022).



Şekil 6.1. LiB Geri Dönüşüm Durumu (Li ve ark., 2023)

7.1. Ön İşlem (Pre-treatment)

Lityum-iyon bataryaların geri dönüşümünde ilk aşama olan ön işlem (pre-treatment), hem güvenlik risklerinin azaltılması hem de değerli bileşenlerin etkin şekilde ayrıştırılması açısından önemlidir. Özellikle hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm yöntemlerinde bu aşama zorunludur. Ön işlem genellikle bataryaların güvenli şekilde deşarj edilmesi (stabilizasyon), sökülmesi ve bileşenlerin sınıflandırılması süreçlerini içerir. Bu kapsamda ohmik, tuz çözeltisi, termal ve dondurma gibi teknikler kullanılmaktadır. Ancak kullanılan kimyasal çözeltiler, çevresel ve sağlık açısından riskler doğurabilmektedir. Batarya söküm işlemlerinin halen manuel olarak yürütülmesi, süreci hem zahmetli hem de verimsiz kılmaktadır. Bu süreçte otomasyonun yaygınlaşmasının önündeki temel engel ise standart batarya tasarımlarının bulunmamasıdır.

Kırma ve öğütme gibi mekanik işlemlerle iletim aşamasına geçilirken, burada elektrot malzemeleri serbest hale getirilir ve çeşitli fiziksel ayırma yöntemleriyle farklı bileşenlere ayrıştırılır. Bu süreçte özellikle PVDF gibi güçlü bağlayıcı polimerlerin varlığı, yüksek saflıkta geri kazanımı zorlaştırmaktadır. Katot, anot, separatör, elektrolit ve diğer metalik-polimerik bileşenler bu aşamada ayrıştırılarak çeşitli şekillerde geri kazanıma yönlendirilir. (Rautela ve ark., 2023)

7.2. Pirometalurjik yöntemler

Pirometalurjik yöntemlerde, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ergitme ve kızartma işlemleriyle özellikle Co, Ni, Cu gibi değerli metaller alaşım halinde geri kazanılırken, Li genellikle cüruf fazında yer alır. Bu yöntemler yüksek verim ve hızlı reaksiyon süreleri sağlasa da, çevresel etkileri nedeniyle gelişmiş kontrol sistemleri gerektirmektedir. (Rautela ve ark., 2023). Özellikle düzgün şekilde ayrıştırılmamış ya da heterojen yapıda olan batarya atıkları için uygunluk göstermesi ve bütün hücrelerin ön pasifleştirme işlemine gerek kalmadan doğrudan fırına alınabilmesi, bu yöntemin önemli avantajları arasındadır. İşlem sonucunda elde edilen metal alaşımı, daha sonra hidro-metalurjik yollarla ayrı metaller halinde geri kazanılabilirken, cüruf içeriğinde bulunan Al, Mn ve Li gibi elementler ya ek işlemlerle geri kazanılmakta ya da çimento gibi sektörlerde ikincil ürün olarak değerlendirilebilmektedir. Elektrolit ve plastiklerin yanması sırasında açığa çıkan enerji, işlemin toplam enerji ihtiyacını azaltmaktadır. Ancak, batarya kütlesinin yaklaşık %40–50'sini oluşturan bu tür organik bileşenler genellikle geri kazanılmadan kaybedilmekte ve süreç boyunca ortaya çıkan toksik gazların bertarafı için ilave çevresel önlemler gerekmektedir. Tüm bu sınırlamalara karşın, kobalt ve nikel gibi yüksek ekonomik değere sahip geçiş metalleri için sağladığı etkin geri kazanım sayesinde pirometalurjik süreçler günümüzde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. (Harper ve ark., 2019)

7.3. Hidrometalurjik yöntemler

Hidrometalurjik yöntemler ise, batarya atıklarının çeşitli asit çözeltileriyle liç edilmesi yoluyla metallerin sulu faza alınarak geri kazanılmasını esas alır. H_2SO_4 ve H_2O_2 gibi reaktiflerin kullanıldığı bu süreçte, sürecin parametrelerinin hassas şekilde ayarlanması verimlilik açısından önem taşır. Güncel çalışmalar, Li, Ni, Co ve Mn gibi metallerin yüksek geri kazanım oranlarıyla ayrıştırılabildiğini ortaya koymaktadır. (Rautela ve ark., 2023)
Bu süreçlerde, H_2O_2 özellikle Co(III) bileşiklerinin çözünür Co(II)'ye indirgenmesinde etkili bir rol oynar. Liç sonrası elde edilen çözeltiler, pH ayarlamalarıyla gerçekleştirilen çöktürme reaksiyonları ya da organik çözücülerle ekstraksiyon gibi yöntemlerle işlenerek saflaştırılır. Özellikle NMC tipi çok bileşenli katot malzemelerinde, çözelti bileşimi yeniden ayarlanarak hedeflenen oranlarda (örneğin 1:1:1 Ni:Mn:Co) öncül hidroksit formunda tekrar sentez yapılabilir. Ayrıca bazı çalışmalar sülfürik asit yerine laktik asit veya üre gibi alternatif reaktiflerin kullanımını da incelemiştir. Ancak yüksek solvent ihtiyacı, delaminasyon süresi ve çapraz kontaminasyon gibi teknik zorluklar bu yöntemin ölçeklenebilirliği açısından hâlen çözülmesi gereken başlıca engeller olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, bataryaların kullanım ömrü sonrasında kolay ayrıştırılabilir şekilde tasarlanması, hidrometalurjik geri dönüşümün başarısı için kritik önemdedir.(Harper ve ark., 2019)

$$2LiCoO_{2(s)}+3H_2SO_4+H_2O_2 \rightarrow 2CoSO_4(aq)+Li_2SO_4+4H_2O+O_2$$

7.4. Doğrudan Geri Dönüşüm

Doğrudan geri dönüşüm yöntemleri ise, bataryalardaki katot malzemelerini kristal yapısı korunmuş biçimde yeniden işleyerek batarya üreticileri tarafından tekrar kullanılabilir hale getirmeyi amaçlar. Ancak bu yöntem, her

katot kimyası için farklı iyileştirme süreçleri gerektirdiğinden, uygulama alanı oldukça sınırlıdır ve elektrotların birbirinden ayrılması bu yöntemde başlıca teknik zorluklardan biridir.(Rautela ve ark., 2023)

7.5. Sürdürülebilir Geri Dönüşüm Yaklaşımları

7.5.1. Biyoliç (Bioleaching)

Biyoliç, özellikle lityum-iyon piller (LiB'ler), baskılı devre kartları ve diğer elektronik atıklardan metal geri kazanımı için çevre dostu ve düşük maliyetli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu süreç, mikroorganizmaların (bakteri, mantar ve arkea gibi) metabolik faaliyetleri sonucu ürettikleri lüksiviyanlar (örneğin H_2SO_4 ve organik asitler) aracılığıyla metallerin çözündürülmesini sağlar. Geleneksel pirometalurji ve hidrometalurji yöntemlerine kıyasla daha düşük enerji gereksinimi, zararlı gaz salımı yapmaması ve çevresel açıdan güvenli olması nedeniyle sürdürülebilir geri dönüşüm teknolojileri arasında dikkat çekmektedir. Bioleaching yöntemiyle kobalt, nikel, mangan ve bakır gibi değerli metaller, hem doğal cevherlerden hem de atık malzemelerden başarıyla geri kazanılabilmektedir. Bu yöntem, geri dönüştürülen metallerin yeni pil üretiminde yeniden kullanılmasına olanak tanıyarak hem atık miktarını azaltmakta hem de çevresel toksisiteyi önlemeye katkı sağlamaktadır. (Roy ve ark., 2022).

7.5.2. Gıda Atığı ile Atık Geri Kazanma (W4W) Yaklaşımları

Geleneksel hidrometalurjik yöntemlerin çevreye zararlı güçlü asitler (HCl, HNO_3, H_2SO_4) içermesi, son yıllarda bu asitlerin yerine geçebilecek daha çevreci alternatiflerin araştırılmasına neden olmuştur. Zayıf organik asitlerin (sitrik, malik, süksinik ve tartarik asitler gibi), hidrojen peroksit (H_2O_2) ile birlikte kullanılması, harcanmış lityum-iyon pillerden (LIB'ler) >%95 oranında metal geri kazanımını mümkün kılmıştır. Ancak H_2O_2'nin kimyasal olarak kararsız ve patlayıcı özellikleri, süreçte güvenlik ve maliyet açısından sorun yaratmaktadır. Bu nedenle, sodyum tiyosülfat ve sodyum bisülfit gibi alternatif indirgen maddeler üzerine yapılan çalışmalar olumlu sonuçlar vermiş olsa da, sodyum iyonlarının nihai metal ürün kalitesine olumsuz etkisi nedeniyle bu yöntemler de sınırlı kalmıştır.

Son dönemde, gıda atıklarının doğal ve çevreci indirgenler olarak kullanıldığı "atıkla atığı geri kazanma (W4W)" yaklaşımı ilgi görmektedir. Özellikle meyve-sebze atıkları (FVW), çay ve bitki posaları, üzüm çekirdeği, portakal kabuğu, glikoz ve etanol gibi maddeler, LIB atıklarından değerli metallerin sürdürülebilir şekilde geri kazanımında başarıyla kullanılmıştır. Bu gıda atıkları, içerdikleri bileşenler (selüloz, hemiselüloz vb.) sayesinde metal çözündürme verimini artırmaktadır. Geleneksel H_2O_2 tabanlı yöntemlerin risklerine karşın, gıda atıklarına dayalı doğal bileşenler hem daha güvenli hem de ekonomik açıdan daha uygun bir çözüm sunmaktadır (Roy ve ark., 2022).

(Dong ve ark., 2024) Yapmış oldukları çalışmada, üçlü lityum-iyon bataryaların (LIB) sökümünden başlayarak kademeli geri dönüşümüne kadar uzanan bütüncül bir teknik süreç geliştirilmiştir. Sülfürik asit ve çay polifenolü içeren liç sistemi kullanılarak yapılan deneylerde; asit konsantrasyonu, katot malzemesi-solüsyon oranı, indirgen madde miktarı, reaksiyon süresi ve sıcaklığın liç performansına etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Liç

sonrasında değerli metallerin geri kazanımı için kademeli çöktürme yöntemi uygulanmış ve süreç kinetikleri analiz edilerek tamamlayıcı bir geri kazanım modeli önerilmiştir.

En uygun liç koşulları; 30 g/L katı-sıvı oranı, 3.5 g/L çay polifenolü dozu, 1.0 mol/L sülfürik asit konsantrasyonu, 60°C sıcaklık ve 60 dakika reaksiyon süresi olarak belirlenmiş; bu koşullarda Li, Ni, Co ve Mn için sırasıyla %99.54, %98.88, %99.37 ve %98.45 liç verimlerine ulaşılmıştır. Kademeli çöktürme ile Mn^{2+}, Ni^{2+}, Co^{2+} ve Li^{+} iyonları sırasıyla geri kazanılmış; bu adımlar sonucunda Mn, Ni ve Co için %96.12, %95.04 ve %98.97 çöktürme verimi elde edilmiştir. Lityum ise yüksek sıcaklıkta pişirme ve ardından sodyum karbonat ile çöktürme yoluyla geri kazanılmış, %70.15 verimle %99.50 saf Li_2CO_3 ürünü elde edilmiştir. Toplam geri kazanım verimleri sırasıyla Li için %67.74, Ni için %93.63, Co için %94.97 ve Mn için %98.54 olarak raporlanmıştır.

Sülfürik asit, liç ortamında asidik koşulları sağlarken, çay polifenolü indirgeme işlemini desteklemiş; özellikle katot malzemesindeki nikel, kobalt ve manganezin yüksek değerlikli hallerini indirgemede etkin rol oynamıştır. Bu sayede liç verimlerinde önemli artışlar sağlanmıştır. Önerilen geri dönüşüm süreci, çevre dostu bir indirgen madde kullanımıyla geleneksel H_2O_2'nin lojistik ve çevresel dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha az atık üretmiş, işlem sonrası arıtma maliyetlerini azaltmış ve düşük karbonlu üretim hedeflerine katkı sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, üçlü LIB'lerin verimli, temiz ve sürdürülebilir geri dönüşümüne yönelik önemli bir teknik temel sunmaktadır.

7.5.3. Elektrokimyasal yöntemler

Elektrokimyasal yöntemler, metal geri kazanımı amacıyla madencilik sektöründe saf metal elektrokaplama işlemleriyle başlayan ve günümüzde harcanmış lityum-iyon pillerin sürdürülebilir şekilde geri dönüştürülmesinde yaygınlaşan, çevre dostu ve ekonomik bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. ve Bu yöntemler, özellikle hidrometalurjik geri dönüşüm süreçlerinde (Örneğin, liç (leaching) ve metal geri kazanımı aşamalarında) başarıyla uygulanmaktadır. Elektrik akımının indirgen madde olarak işlev gördüğü elektrokimyasal olarak desteklenmiş liç işlemleri, metallerin çözünmeyen formlarından çözünür forma dönüşümünü kolaylaştırarak geleneksel kimyasal indirgenlerin (Örneğim, H_2O_2) yerini alır; bu da süreci hem daha güvenli hem de daha düşük maliyetli hale getirir. Ayrıca, deniz suyu gibi yaygın kaynaklardan sürdürülebilir biçimde hazırlanabilen hafif asidik çözeltilerle elektroliz uygulamaları mümkündür. (Roy ve ark., 2022)

8. Lityum-İyon Bataryaların Geri Dönüşüm Yöntemleri Kıyaslanması

Günümüzde lityum-iyon bataryalarının hidrometalurjik, pirometalurjik, doğrudan geri dönüşüm ve sürdürülebilir geri dönüşüm gibi farklı yöntemlerle; lityum, kobalt, nikel gibi değerli metallerin geri kazanımı için kullanılmaktadır. Bu yöntemler; verimlilik, maliyet, çevresel etki ve teknolojik uygulanabilirlik açısından kıyaslandığında, her birinin avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır. (Çizelge 2.1.)

Çizelge 2.1. Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Kıyaslanması (Rautela ve ark., 2023)

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları/Sınırlamalar
Doğrudan Geri Dönüşüm	- Yapısal ve kimyasal özelliği korur - Çevre dostu ve kimyasal kullanımı az	- Sadece belirli kimyasal yapıya sahip katmanlar - Çeşitli kimyasal uyumsuzluklar - Çoklu türlerde zorluk	- Katot ve elektrot yapılarını koru, az çeşitli kimyasal türde kullanılabilir
Hidrometallürji	- Ekonomik ve çevre dostu - Yüksek verimlilik - Geniş metal yelpazesi	- Klor ve asit buharı ve atık su sorunları - Kimyasal kullanımı - İşlem komplikasyonu	- Büyük ölçekli endüstriyel kullanımlar - Çevresel etkiler dikkatli yönetilmeli
Pyrometallürji	- Hızlı reaksiyon ve yüksek ürün verimi - Metal tekrar üretimi - Çeşitli metal türleri	- Yüksek enerji tüketimi - Çevre kirliliği riski (Gaz emisyonları) - Yüksek maliyet	- Çok yüksek verim isteyen büyük tesisler - Çevresel denetim önemli
Biyolojik (Bioleaching)	- Çevre dostu - Düşük enerji kullanımı - Toksik gaz ve atık üretimi düşük	- Yavaş işlem süresi - Kapsamlı mikroorganizma geliştirme gereksinimi - Geniş alan ve kontrol gerektirir	- Çevresel avantaj, pilot ve küçük ölçekli uygulamalar; endüstriyel gelişim aşamasında

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde atık yönetim sistemlerinin yetersizliği; iklim değişikliği, doğal kaynakların tükenmesi, hava, su ve toprak kirliliği gibi farklı boyutlu çevresel sorunlara neden olmakta ve küresel ölçekte ekosistem sağlığını tehdit etmektedir. Bu bağlamda, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak karbon emisyonlarını düşürme hedefi doğrultusunda geliştirilen elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen önemli bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Ancak elektrikli araç kullanımındaki artışla beraber, yakın gelecekte ciddi boyutlara ulaşması beklenen kullanım ömrünü tamamlamış batarya atıkları, yeni ve karmaşık çevresel sorunları da beraberinde getirme potansiyeline sahiptir.

Bu çerçevede, batarya atıklarının etkin ve çevreye duyarlı biçimde yönetilmesi, yalnızca mevcut çevre problemlerinin artmasını engellemekle kalmayacak; aynı zamanda hammadde ve enerji kaynaklarının korunması, toksik madde salınımlarının azaltılması, insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerin önlenmesi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle nadir bulunan ve ekonomik değeri yüksek metallerin geri kazanımı, döngüsel ekonomi anlayışı için etkili bir çözüm niteliği taşımaktadır.

Bu doğrultuda, batarya geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerinin en aza indirilmesi amacıyla; mevcut geri dönüşüm teknolojilerinin iyileştirilmesi, inovatif ve düşük çevresel etkili yöntemlerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi, yasal gerekliliklerin güçlendirilmesi elzemdir. Ayrıca, batarya atıklarının yönetim sistemlerinin oluşturulması ve bu alandaki uluslararası iş birliklerinin artırılması da, sürdürülebilir bir geri dönüşüm açısından önemli bir gerekliliktir.

10. KAYNAKLAR

Alyar, H., 2022, Elektrikli Otomobillerin Yapısı ve Yangın Riskleri, *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, 10 (1), 1-8.

Ambrose, H. ve O'Dea, J., 2021, Electric Vehicle Batteries Addressing Questions about Critical Materials and Recycling, *Union of Concerned Scientists*.

Amusa, H. K., Sadiq, M., Alam, G., Alam, R., Siefan, A., Ibrahim, H., Raza, A. ve Yildiz, B., 2024, Electric vehicle batteries waste management and recycling challenges: a comprehensive review of green technologies and future prospects, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26 (4), 1959-1978.

Birlik, D. N., Özkan, A., Günkaya, Z. ve Banar, M., 2024, Atık Lityum İyon Pillerden Kobalt Geri Kazanımı Üzerine Bir Değerlendirme, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 10 (2), 251-263.

Can Güven, E. ve Gedik, K., 2019, Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (2), 726-737.

Dong, L., Li, Y., Shi, P., Tian, S., Ren, Z. ve Zhou, Z., 2024, Recovery of valuable metals from cathode materials of spent ternary lithium-ion battery using natural product as reducing reagent, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 102 (8), 2909-2920.

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L. ve Anderson, P., 2019, Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles, *Nature*, 575 (7781), 75-86.

Li, J., Zhang, H., Wang, H. ve Zhang, B., 2023, Research progress on bioleaching recovery technology of spent lithium-ion batteries, *Environ Res*, 238 (Pt 1), 117145.

Lima, M. C. C., Pontes, L. P., Vasconcelos, A. S. M., de Araujo Silva Junior, W. ve Wu, K., 2022, Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, *Energies*, 15 (6).

Luo, J., Yang, Y. ve Jiang, Y., 2025, Assessing the antecedents, processes, and consequences of sustainable electric vehicle battery recycling: A systematic literature review, *International Journal of Production Economics*, 282.

Rautela, R., Yadav, B. R. ve Kumar, S., 2023, A review on technologies for recovery of metals from waste lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 580.

Richa, K., Babbitt, C. W., Gaustad, G. ve Wang, X., 2014, A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles, *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 63-76.

Roy, J. J., Rarotra, S., Krikstolaityte, V., Zhuoran, K. W., Cindy, Y. D., Tan, X. Y., Carboni, M., Meyer, D., Yan, Q. ve Srinivasan, M., 2022, Green Recycling Methods to Treat Lithium-Ion Batteries E-Waste: A Circular Approach to Sustainability, *Adv Mater*, 34 (25), e2103346.

Tie, S. F. ve Tan, C. W., 2013, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102.

Üçtuğ, F. G., 2022, Türkiye'de Üretilen Elektrikli ve İçten Yanmalı Motorlu Araçların Karşılaştırmalı Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10 (4), 1701-1714.

RADAR, GÖRÜNTÜ İŞLEME VE SENSÖR FÜZYONU YÖNTEMLERİNİN HAVA HEDEFİ TESPİTİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Yusuf ERYEŞİL[1*], Nazlı Beyza BAYRAKTAR[2]
[1]Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya [2]Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya
[*](yusuf.eryesil@selcuk.edu.tr)

Özet – İnsansız hava araçlarının (İHA) hızlı yaygınlaşması, düşük radar kesit alanına sahip küçük platformların artması ve değişken çevresel koşulların algılama sistemleri üzerindeki etkileri, hava hedeflerinin doğru ve güvenilir şekilde tespit edilmesini kritik bir gereklilik hâline getirmiştir. Bu kapsamda literatürde üç temel yaklaşım öne çıkmaktadır: yalnızca radar tabanlı sistemler, yalnızca görüntü işleme tabanlı yöntemler ve bu iki sensörden elde edilen verilerin birlikte değerlendirildiği sensör füzyonu yaklaşımları. Bu çalışmada; radar, görüntü işleme ve sensör füzyonu tekniklerini ele alan güncel akademik çalışmalar kapsamlı bir literatür taramasıyla incelenmiştir. Her yöntemin güçlü ve zayıf yönleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Radar tabanlı yöntemlerin özellikle kötü hava koşulları, uzun menzil ve düşük görünürlük senaryolarında avantaj sağladığı; ancak düşük radar kesit alanına sahip hedeflerde sınırlı performans gösterdiği belirlenmiştir. Görüntü işleme yöntemlerinin hedefin şekil ve siluet bilgisine dayalı olarak yüksek doğruluk sunduğu ancak ışık ve görüş koşullarına bağımlılık nedeniyle çeşitli senaryolarda performans kaybı yaşadığı görülmüştür. Sensör füzyonu yaklaşımlarının ise radarın fiziksel avantajları ile görüntü tabanlı yöntemlerin geometrik bilgisini bir araya getirerek daha dengeli, dayanıklı ve yüksek doğruluklu sonuçlar ortaya koyduğu literatür tarafından geniş ölçüde desteklenmektedir.

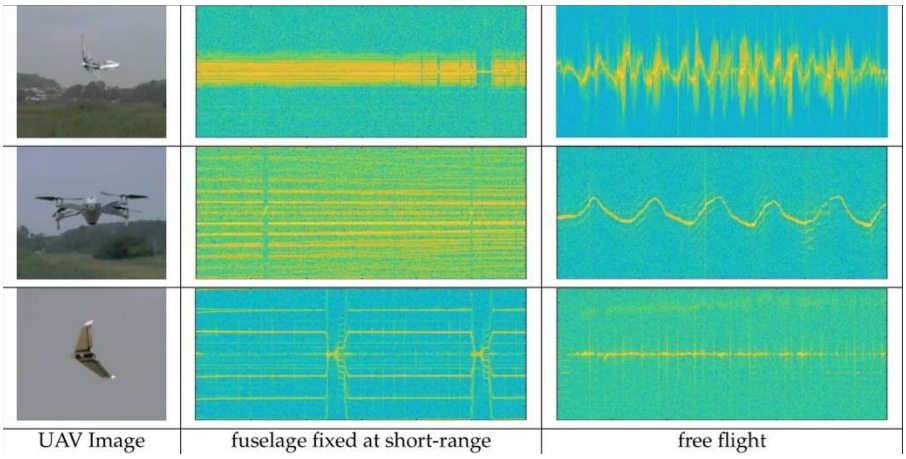
Bu çalışma, literatürdeki mevcut eksikleri ortaya koyarak radar–görüntü füzyonunun hava hedefi tespitinde giderek önem kazandığını göstermekte ve hangi yaklaşımın hangi koşullarda daha etkili olduğuna dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Elde edilen bulgular; sensör füzyonunun tekil sensörlere kıyasla daha güçlü bir tespit performansı sergilediğini, özellikle karmaşık operasyonel senaryolarda çoklu sensör kullanımının kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Keywords – Radar tabanlı tespit, Görüntü işleme, Sensör füzyonu, İnsansız hava araçları (İHA), Hedef sınıflandırma

GİRİŞ

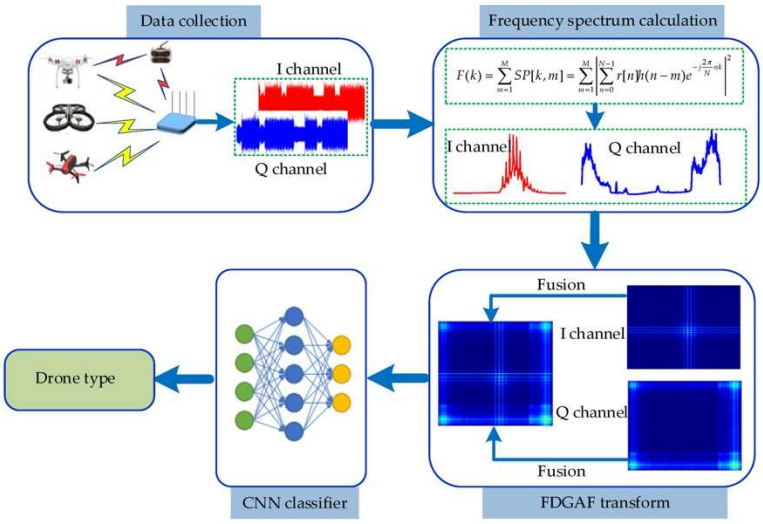
İnsansız hava araçlarının (İHA) hızlı yaygınlaşması, düşük radar kesit alanına sahip mikro ve mini platformların artması ve karmaşık çevresel koşulların algılama sistemleri üzerindeki etkileri hava hedeflerinin tespiti ve sınıflandırılmasını günümüz güvenlik ihtiyaçlarının merkezine taşımıştır [16]. Hava sahasının güvenli yönetimi; askeri gözetleme, kritik tesis korunması, sınır güvenliği ve sivil hava trafiğinin düzenlenmesi gibi birçok alanda hızlı, güvenilir ve çok yönlü algılama sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Bu nedenle hava hedeflerinin doğru şekilde algılanması için kullanılan sensör türleri ve bu sensörlerin ürettiği verilerin etkinliği, literatürde giderek daha önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Literatür incelendiğinde, hava hedefi tespitinde üç temel yaklaşımın öne çıktığı görülmektedir: yalnızca radar tabanlı yöntemler, yalnızca görüntü işleme tabanlı yöntemler ve her iki sensörden elde edilen verilerin birlikte kullanıldığı sensör füzyonu yöntemleri. Radar tabanlı çalışmalarda mikro-Doppler imzaları, Range–Doppler haritaları ve RF spektrum analizlerinin sınıflandırma açısından güçlü bilgiler sunduğu görülmektedir [9], [13], [15], [7]. Buna uygun spektogram görüntüleri Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Hava araçları ve onlara ait spektogramlar

Radar tabanlı yaklaşımların güçlü yönleri olmakla birlikte tek bir sensöre dayalı sistemlerin çevresel parazit, görüş kaybı, ani manevralar veya düşük SNR koşullarında performans kayıpları yaşadığı bilinmektedir. Bu nedenle son yıllarda, radar spektrum bilgilerinin daha yüksek ayırt edicilik sunması amacıyla farklı dönüştürme ve özellik çıkarma teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu doğrultuda incelenen FDGAF–CNN tabanlı sınıflandırma yaklaşımı, radar sinyallerinin frekans domenindeki davranışlarını iki boyutlu bir görüntü temsiline dönüştürerek derin öğrenme modellerine daha uygun bir veri formatı sunmaktadır. Söz konusu çalışmanın akış yapısı Şekil 2'de ayrıntılı biçimde gösterilmiştir.

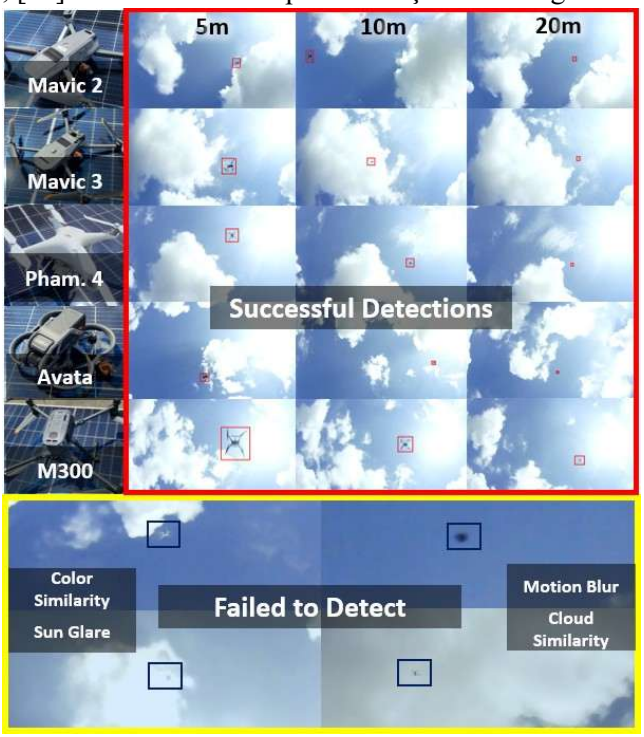


Şekil 2. Önerilen FDGAF-CNN'nin drone sınıflandırma çerçevesi.

Bu yöntemde ilk olarak ham RF sinyalleri bir toplama modülü aracılığıyla elde edilmekte, ardından sinyallerin frekans spektrumları hesaplanmaktadır. Elde edilen tek boyutlu spektral veriler, Frequency-Domain Gramian Angular Field (FDGAF) yöntemi ile iki boyutlu görüntülere dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, spektral bilgiyi zaman–frekans ekseninden ayrılmadan, açısal bir matris temsiline haritalayarak sinyaldeki lokal ve global korelasyonların korunmasını sağlamaktadır. Son aşamada üretilen bu görüntüler bir Convolutional Neural Network (CNN) mimarisine aktarılmakta ve farklı drone türleri yüksek doğruluk oranlarıyla sınıflandırılmaktadır. Çalışmada kullanılan bu FDGAF–CNN süreci, radar spektrumundaki ince ayrıntıların derin öğrenme modeli tarafından daha etkin bir şekilde yakalanmasına olanak tanımaktadır. FDGAF dönüşümü sayesinde radar sinyallerindeki mikro

imzalar, frekans yoğunluk değişimleri ve spektrum karakteristikleri net bir biçimde ortaya çıkarılmakta; bu da geleneksel özellik çıkarım yöntemlerine kıyasla daha güçlü bir sınıflandırma performansı sağlamaktadır. Ayrıca çalışmanın CNN tabanlı mimari tercih etmesi, insan müdahalesine ihtiyaç duyan manuel özellik çıkarım adımlarını ortadan kaldırarak sistemin genellenebilirliğini artırmaktadır. Literatürde giderek artan bu tür yaklaşımlar, radar sinyallerinin yalnızca 1D veri olarak değil, 2D görüntü formunda işlenmesinin sınıflandırma problemine önemli katkılar sunduğunu açıkça göstermektedir.

Görüntü işleme tabanlı yöntemler ise hedefin şekil, siluet ve görsel özelliklerini derin öğrenme tabanlı modellerle yüksek doğrulukla çıkarabilmektedir [1], [3], [4], [5], [10], [11]. Ancak radar düşük RCS değerine sahip hedeflerde sınırlı performans sergilerken [12], görüntü işleme yöntemleri ışık koşulları, uzak mesafe ve hava olayları gibi faktörlere oldukça duyarlıdır [6], [17]. Bu faktörlerin tespite etkisi Şekil 3'teki görselde görülmektedir.



Şekil 3. Hava araçlarının görsel tespitinde çevresel faktörlerin etkisi

Bu nedenle araştırmacılar radar ve görüntü verilerinin birlikte kullanıldığı sensör füzyonu yaklaşımına yönelmiştir. Çoklu sensör füzyonu, radarın sağladığı menzil/hız bilgisini görüntünün sunduğu geometrik ve yapısal bilgilerle birleştirerek daha dengeli ve güvenilir bir tespit sistemi oluşturmaktadır. Literatürde sensör füzyonunun tekil yöntemlere göre daha yüksek doğruluk ve kararlılık sağladığına dair güçlü bulgular bulunmaktadır [2], [18], [8], [14]. Akustik–optik [19] ve RF–kamera füzyonu [1] gibi çalışmalar da farklı modalitelerin birlikte kullanımının tespit başarısını artırdığını göstermektedir.

Ancak mevcut literatür incelendiğinde, özellikle hava hedeflerine özel çok-modal füzyon çalışmalarının sayısının sınırlı olduğu, standart bir radar–kamera veri setinin bulunmadığı ve sensör hizalama/kalibrasyon süreçlerinin çoğu çalışmada yüzeysel bırakıldığı görülmektedir [2], [18]. Bu durum, sahada kullanılabilir yüksek doğruluklu sistemlerin geliştirilmesi için hâlâ önemli araştırma boşlukları bulunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, herhangi bir deneysel uygulama yapmadan, tamamen literatür taraması yoluyla radar, görüntü işleme ve sensör füzyonu yaklaşımlarını kapsamlı biçimde incelemek; bu yaklaşımların güçlü ve zayıf yönlerini karşılaştırmak ve literatürdeki mevcut eksikleri ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında önce yalnızca radar tabanlı yöntemler değerlendirilerek bu tekniklerin hangi koşullarda avantaj sağladığı analiz edilecektir. Ardından yalnızca görüntü işleme tabanlı tespit sistemlerinin performansı ve sınırlılıkları tartışılacaktır. Son olarak radar ve görüntü verilerinin birleştirildiği sensör füzyonu yöntemlerinin literatürdeki yeri, avantajları ve geliştirilmesi gereken yönleri incelenecektir.

Bu doğrultuda proje, literatürden elde edilen bulgular üzerinden şu temel soruya yanıt arayacaktır:Hava hedeflerinin tespiti ve sınıflandırılmasında en etkili yaklaşım hangisidir — radar mı, görüntü mü, yoksa sensör füzyonu mu?Bu soruyu yanıtlamak amacıyla analiz edilen çalışmalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek doğruluk, dayanıklılık, çevresel koşullara duyarlılık ve operasyonel uygulanabilirlik açısından bütüncül bir sonuç sunulacaktır. Bu kapsamda mevcut araştırmaların güçlü yönleri ve eksikleri ortaya konulacak, gelecekteki çalışmalar için yönlendirici öneriler geliştirilecektir.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışma, hava hedeflerinin tespiti ve sınıflandırılması için kullanılan üç temel yaklaşımı—yalnızca radar tabanlı yöntemler, yalnızca görüntü işleme tabanlı yöntemler ve sensör füzyonu teknikleri—karşılaştırmak amacıyla tamamen literatür taramasına dayalı bir araştırma olarak tasarlanmıştır. Çalışmada hiçbir deneysel uygulama, sensör kullanımı veya özgün veri toplama süreci bulunmamaktadır. Tüm bulgular, mevcut akademik yayınların sistematik şekilde incelenmesi ve bu yayınlardan elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analiziyle oluşturulmuştur.

1.Araştırma Tasarımı

Çalışma üç ana başlık altında yürütülmüştür:

a) Radar Tabanlı Yöntemlerin İncelenmesi: Radar sinyallerine dayalı hedef tespiti ve sınıflandırma yöntemleri analiz edilmiştir. Micro-Doppler imzaları, Range–Doppler haritaları, RF spektrum temelli yöntemler ve radar verisinin çevresel koşullara karşı dayanıklılığı değerlendirilmiştir.

b) Görüntü İşleme Tabanlı Yöntemlerin İncelenmesi: Optik ve termal görüntülerden yararlanan nesne tespit/sınıflandırma yöntemleri değerlendirilmiştir. CNN, YOLO, Faster R-CNN gibi modern derin öğrenme modelleri, görüş koşullarına bağımlılıkları ve uzak mesafe performansları dikkate alınarak incelenmiştir.

c) Sensör Füzyonu Yöntemlerinin İncelenmesi: Radar ve görüntü verilerinin veri, özellik veya karar düzeylerinde birleştirildiği çalışmalar analiz edilmiş; füzyonun hangi durumlarda avantaj sağladığı, hangi zorlukları taşıdığı ve literatürdeki eksiklikleri tartışılmıştır.

Bu üç yaklaşımın tamamı, literatüre dayalı olarak karşılaştırılmış ve göreli performansları değerlendirilmiştir.

2. Literatür Taraması Süreci

Kaynakların Seçim Kriterleri: Çalışmada kullanılacak makaleler belirlenirken şu kriterler dikkate alınmıştır:

- •Konu ile doğrudan ilişkili olması (İHA tespiti, radar işleme, görüntü işleme, sensör füzyonu)
- •Son yıllarda yayımlanmış güncel çalışmalar olması
- •SCI/ESCI kapsamındaki dergiler veya IEEE konferanslarında yayımlanmış olması
- •Deneysel sonuç veya güçlü teorik katkı içermesi
- •Radar, görüntü ve füzyon alanlarını temsil edecek çeşitlilikte olması

Bu doğrultuda gerek radar tabanlı çalışmalar (Han et al., 2024; Park et al., 2021; Hanif et al., 2021), gerek görüntü işleme çalışmalar (Avola et al., 2021; Cazzato et al., 2020; Dewangan et al., 2023), gerekse füzyon çalışmaları (Alonso-Fernandez & Englund, 2022; Jiang et al., 2024; Rahman et al., 2024) taramaya dahil edilmiştir.

Taramada İzlenen Adımlar: Literatür taraması şu adımlarla gerçekleştirilmiştir:

Kaynak Toplama: Uluslararası veritabanlarından radar, görüntü ve sensör füzyonu konularını temsil eden çalışmalar toplanmıştır.

İçerik Analizi: Her çalışma; kullanılan veri türü, yöntem, model mimarisi, değerlendirme kriterleri ve elde edilen sonuçlar açısından kapsamlı şekilde incelenmiştir.

Sınıflandırma: Çalışmalar üç kategoriye ayrılarak radar–görüntü–füzyon yaklaşımları ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir.

Karşılaştırmalı İnceleme: Her yöntemin güçlü yanları, sınırlılıkları ve kullanım koşulları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu yöntemsel yapı, konunun bütünsel olarak değerlendirilmesini ve sensör türlerinin birbirine göre performanslarının net şekilde ortaya konmasını sağlamaktadır.

3. Karşılaştırma Kriterlerinin Belirlenmesi

Radar, görüntü ve sensör füzyonu yöntemlerinin literatür sonuçlarına dayanarak karşılaştırılmasında aşağıdaki kriterler kullanılmıştır:

- •Tespit doğruluğu ve sınıflandırma başarısı
- •Kötü hava/ışık koşullarında dayanıklılık
- •Uzak mesafe performansı ve düşük RCS hedeflerde etkinlik
- •Hızlı hareket eden küçük hedeflere karşı tepkime kabiliyeti
- •Yanlış alarm (false alarm) ve kaçırma oranları
- •Gerçek zamanlı çalışabilirlik
- •Sensör bağımlılığı ve çevresel hassasiyet
- •Çalışmaların kullandığı veri setlerinin kapsamı

Bu kriterler, üç yöntemin göreli üstünlüklerini objektif biçimde değerlendirmek için kullanılmıştır.

4. Sentez ve Sonuç Çıkarma Yöntemi

Analiz edilen çalışmaların sonuçları bir araya getirilerek her yöntemin:

- •Hangi koşullarda daha avantajlı olduğu,
- •Hangi durumlarda yetersiz kaldığı,
- •Sensör füzyonunun gerçekten performans artışı sağlayıp sağlamadığı,
- •Literatürde hangi noktaların eksik bırakıldığı gibi başlıklar altında bilimsel bir sentez oluşturulmuştur. Bu çalışma herhangi bir uygulama yapmadığı için elde edilen tüm çıkarımlar literatürün bütüncül değerlendirmesi üzerinden elde edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada yalnızca literatüre dayalı bir inceleme yürütülmüş olup elde edilen bulgular radar tabanlı yöntemler, görüntü işleme tabanlı yöntemler ve sensör füzyonu yaklaşımları olmak üzere üç ana başlık altında değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmaların sonuçları bu üç metodun güçlü ve zayıf yönlerini açıkça ortaya koymakta ve hangi yaklaşımın hangi koşullarda daha etkili olduğunu göstermektedir.

1. Radar Tabanlı Yöntemlerin Performansı

Literatürde radar sinyali kullanılarak yapılan çalışmalar, özellikle kötü hava koşulları, düşük ışık/yetersiz görüş, uzak mesafe ve yüksek hızdaki hedefler için güçlü bir performans sergilemektedir. Radar sinyallerinin fiziksel yapısı gereği sis, yağmur ve gece koşullarından etkilenmemesi, radar temelli yöntemlerin hava hedefi tespitinde güvenilir bir seçenek olduğunu göstermektedir (Hanif et al., 2021; Park et al., 2021).

Radar yöntemlerine ilişkin başlıca bulgular şunlardır:

- •Mikro-Doppler imzaları, hedefin pervane dönüş frekansı, titreşimleri ve hareket modelleri gibi ayırt edici özellikleri yakalayabildiği için sınıflandırma başarısını artırmaktadır (Hanif et al., 2021).
- •Range–Doppler (R–D) haritaları, hedeflerin hız ve menzil bilgisini bir arada sunarak takip performansına katkı sağlamaktadır (Han et al., 2024).
- •Düşük radar kesit alanına (RCS) sahip mini İHA'lar radarın en zayıf olduğu alanlardan biridir. Bu hedeflerde sinyal seviyesi düşük olduğundan tespit ve sınıflandırma hataları artmaktadır (Kumawat & Raj, 2022).
- •Radar, hedefin şekil, boyut ve geometrik yapısını doğrudan yansıtamadığı için görsel sınıflandırma açısından sınırlıdır.

Bu bulgular, radar tabanlı sistemlerin güçlü fiziksel yeteneklerine rağmen yalnızca radar kullanımının hedef biçimsel özellikleri ayırt etmede yetersiz kaldığını ortaya koymuştur.

2. Görüntü İşleme Tabanlı Yöntemlerin Performansı

Görüntü işleme temelli çalışmalar, özellikle hedefin görsel silueti, biçimi, dokusu ve yapısal özellikleri üzerinden sınıflandırma yapabilmeleri nedeniyle yüksek doğruluk sunmaktadır. Derin öğrenme yöntemlerinin gelişimiyle birlikte CNN tabanlı hava hedefi tespit sistemlerinin başarısında önemli artışlar gözlemlenmiştir (Avola et al., 2021; Cazzato et al., 2020). Görüntü işleme yöntemleriyle ilgili temel bulgular şunlardır:

•Yüksek çözünürlüklü görüntüler, sınıflandırma performansını belirgin şekilde artırmaktadır.

•YOLO, Faster R-CNN ve türevleri İHA tespitinde yüksek başarı elde etmiştir (Dewangan et al., 2023).

•Ancak bu yöntemler ışık değişimlerine, arka plan karmaşıklığına, uzak mesafedeki küçük hedeflere ve hava koşullarına karşı oldukça hassastır.

•Gece, sis, yağmur gibi koşullarda performans ciddi şekilde düşmektedir (Saygılı & Özmen, 2022). Bu nedenle görüntü tabanlı yöntemler güçlü geometrik bilgiler sunsa da çevresel koşullara aşırı bağımlı olmaları büyük bir sınırlılık olarak karşımıza çıkmaktadır.

3. Sensör Füzyonu Yaklaşımlarının Performansı

Radar ve görüntü verilerinin birleştirildiği sensör füzyonu çalışmalarında elde edilen bulgular, literatürün en tutarlı ve yüksek performanslı sonuçlarının bu yaklaşımda toplandığını göstermektedir. Çeşitli çalışmalarda hem veri düzeyinde hem özellik düzeyinde hem de karar düzeyinde birleştirme yöntemleri kullanılmış ve her biri tekil sensörlere göre performans artışı sağlamıştır (Alonso-Fernandez & Englund, 2022; Jiang et al., 2024).

Füzyon yöntemlerine ilişkin bulgular:

•Radar, uzak mesafe ve kötü hava koşulları için güçlü bilgi sağlarken; görüntü işleme geometrik ve biçimselbilgiyi tamamlayıcı olarak sunmaktadır.

•Özellik düzeyi füzyon, literatürde en yüksek doğruluk artışını sağlayan yöntem olarak öne çıkmaktadır (Jiang et al., 2024; Fu & He, 2024).

•Veri düzeyi füzyon en yüksek bilgi kapasitesini sunmasına rağmen senkronizasyon ve hesaplama maliyeti nedeniyle uygulaması zordur.

•Karar düzeyi füzyon, pratik uygulama kolaylığı ile öne çıkmakta; radar/görüntü bilgisi kaybolduğunda bile sistemin çalışmaya devam etmesini sağlamaktadır (Yu & Zhang, 2022).

•Füzyon yaklaşımlarının genel olarak yanlış alarm oranını düşürdüğü, kaçırma oranını azalttığı ve kararlılığı artırdığı literatür tarafından desteklenmektedir.

Bu sonuçlar sensör füzyonunun tekil sensörlere göre çok daha dengeli, dayanıklı ve yüksek doğruluk sunan bir yapı olduğunu göstermektedir.

4. Radar – Görüntü – Füzyon Karşılaştırması

Aşağıdaki bulgular literatür taramasının bütüncül değerlendirmesi sonucunda elde edilmiştir:

Radar daha iyi olduğu durumlar:

•Kötü hava koşulları (sis, yağmur, gece)

•Uzun mesafe hedefler

•Hızlı hareket eden hedefler

•Görsel silueti belirgin olmayan düşük ışık ortamları Görüntü işleme daha iyi olduğu durumlar:

•Aydınlık hava koşulları

•Hedefin şekil, doku ve geometrisinin kritik olduğu sınıflandırma görevleri

•Yüksek çözünürlüklü yakın mesafe görüntüler Sensör füzyonu daha iyi olduğu durumlar:

•Karmaşık çevresel koşullar

•Uzak mesafe + biçimsel ayrımın gerektiği durumlar

•Küçük hedeflerin hem tespiti hem sınıflandırılmasının kritik olduğu sistemler

•Tekil sensörün yetersiz kaldığı tüm senaryolar

Bu analiz, sensör füzyonunun hem radarın fiziksel avantajlarını hem görüntünün şekilsel zenginliğini bir araya getirerek en dengeli performansı sunduğunu göstermektedir.

5. Literatürdeki Eksikliklerin Tartışılması

Tarama sonuçları, literatürde aşağıdaki eksikliklerin bulunduğunu ortaya koymuştur:

•Radar–görüntü füzyonu için ortak, büyük ölçekli, standart bir veri seti bulunmamaktadır.

•Pek çok füzyon çalışması kara hedeflerine odaklanmış olup hava hedefleri özelinde çalışma sayısı sınırlıdır.

•Radar ve kamera sensörlerinin eş zamanlı kalibrasyon ve hizalama süreçleri metodolojik olarak yeterince açıklanmamıştır.

•Gerçek operasyonel koşullarda test edilmiş füzyon modelleri oldukça sınırlıdır.

•Hesaplama maliyeti yüksek olan füzyon modellerinin gerçek zamanlı sistemlere uygulanması hâlâ araştırma bekleyen bir konudur.

Bu eksiklikler sensör füzyonunun potansiyeline rağmen uygulamadaki bazı engellerin devam ettiğini göstermektedir.

6. Genel Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, radar ve görüntü verilerinin tek başına kullanıldığı durumların belirli avantajlar sunmakla birlikte birçok senaryoda sınırlı kaldığını göstermektedir. Sensör füzyonu ise her iki yönteminin güçlü yanlarını bir araya getirerek daha yüksek doğruluk, daha düşük hata oranı ve daha kararlı performans sağlamaktadır. Literatürün genel eğilimi, sensör füzyonunun hava hedefi tespiti ve sınıflandırması için en etkili yaklaşım olduğu yönündedir.

KAYNAKÇA

[1] Alam, S. S., Chakma, A., Rahman, M. H., Bin Mofidul, R., Alam, M. M., Utama, I. B. K. Y., & Jang, Y. M. (2023). RFenabled deep-learning-assisted drone detection and identification: An end-to-end approach. Sensors, 23(9), 4202.

[2] Alonso-Fernandez, F., & Englund, C. (2022). Drone detection and tracking in real-time by fusion of different sensing modalities. Drones, 6(4).

[3] Avola, D., Cinque, L., Diko, A., Fagioli, A., Foresti, G. L., Mecca, A., Pannone, D., & Piciarelli, C. (2021). MS-Faster RCNN: Multi-stream backbone for improved faster R-CNN object detection and aerial tracking from UAV images. Remote Sensing, 13(9), 1670.1

[4] Ayushkumawat. (2023). Advanced-aerial-drone-detection-system [Computer software]. GitHub.

[5] Cazzato, D., Cimarelli, C., Sanchez Lopez, J. L., Voos, H., & Leo, M. (2020). A survey of computer vision methods for 2D object detection from unmanned aerial vehicles. Journal of Imaging, 6(8), 78.

[6] Dewangan, V., Saxena, A., Thakur, R., & Tripathi, S. (2023). Application of image processing techniques for UAV detection using deep learning and distance-wise analysis. Drones, 7(3), 174.

[7] Fu, Y., & He, Z. (2024). Radio frequency signal-based drone classification with frequency domain Gramian Angular Field and convolutional neural network. Drones, 8(9), 511.

[8] Han, S.-K., Lee, J.-H., & Jung, Y.-H. (2024). Convolutional neural network-based drone detection and classification using overlaid Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) range–Doppler images. Sensors, 24(17), 5805.

[9] Hanif, A., Muaz, M., Hasan, A., & Adeel, M. (2021). Micro-Doppler based target recognition with radars: A review. TechRxiv. Preprint.

[10] Jiang, W., Liu, Z., Wang, Y., Lin, Y., Li, Y., & Bi, F. (2024). Realizing small UAV targets recognition via multidimensional feature fusion of high-resolution radar. Remote Sensing, 16(15), 2710.

[11] Kang, Y., Zheng, B., & Shen, W. (2025). Research on oriented object detection in aerial images based on architecture search with decoupled detection heads. Applied Sciences, 15(15), 8370.

[12] Kumawat, H. C., & Raj, A. A. B. (2022). SP-WVD with adaptive-filter-bank-supported RF sensor for low RCS targets' nonlinear micro-Doppler signature/pattern imaging system. Sensors, 22(3), 1186.

[13] Park, D., Lee, S., Park, S., & Kwak, N. (2021). Radar-spectrogram-based UAV classification using convolutional neural networks. Sensors, 21(1), 210.

[14] Park, S., Lee, S., & Kwak, N. (2022). Range-Doppler map augmentation by generative adversarial network for deep UAV classification. In 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22) (pp. 1–6). IEEE.

[15] Rahman, M. H., Sejan, M. A. S., Aziz, M. A., Tabassum, R., Baik, J.-I., & Song, H.-K. (2024). A comprehensive survey of unmanned aerial vehicles detection and classification using machine learning approach: Challenges, solutions, and future directions. Remote Sensing, 16(5), 879.

[16] Svanström, F., Moberg, I., & Engstöm, G. (2023). Drone detection and tracking system based on fused acoustical and optical approaches. Drones, 7(8), 518. (Original publication 2023, data accessed via ResearchGate).

[17] Schleher, D. C. (2016). Detection and identification of small unmanned aerial vehicles: Challenges and approaches. IET Radar, Sonar & Navigation, 10(7), 1121–1132.

[18] Tang, G., Ni, J., Zhao, Y., Gu, Y., & Cao, W. (2024). A survey of object detection for UAVs based on deep learning. Remote Sensing, 16(1), 149.

[19] Saygılı, Z., & Özmen, G. (2022). İnsansız hava araçlarında gömülü sistem üzerinden derin öğrenme ile nesne tespiti. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 292–298.

[20] Yu, S. F., & Zhang, H. (2022). Design and realization of decision fusion model based on multi-sensor information. Journal of Applied Sciences.

GÜNEŞ PANELI VERI TAKIBI VE KONTROL SISTEMI

Ramazan Hasan YILMAZ[1*], Muhammed Kemal YÜRÜM[2]
[1*] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology*
[*] *(233302014@ogr.selcuk.edu.tr)*
[*] *(233302004@ogr.selcuk.edu.tr)*

Özet – Bu proje, bir güneş enerjisi sistemine ait akım, voltaj, güç ve sıcaklık gibi temel parametrelerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini ve analiz edilmesini amaçlamaktadır. Sistemde güneş paneli, entegre edilen otomatik ışık takip mekanizması sayesinde güneşin konumunu algılayarak maksimum ışık yoğunluğuna yönelmektedir. Ölçülen tüm veriler ESP32 mikrodenetleyicisi aracılığıyla Wi-Fi üzerinden yerel bir sunucuya aktarılmakta ve kullanıcıya grafiksel arayüz ile sunulmaktadır. Böylece enerji üretim performansı anlık olarak takip edilebilmekte, uzun vadeli verimlilik analizleri yapılabilmekte ve gerekli optimizasyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca kart üzerinde bulunan butonlar ile manuel kontrol sağlanmakta, LCD ekran üzerinden anlık veriler görüntülenebilmektedir. Bu yapı, güneş enerjisinden maksimum verim elde edilmesini ve sistem yönetiminin daha güvenli, hızlı ve etkin bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır.

Keywords – Güneş Paneli, IoT, Veri Takibi, ESP32, Kontrol, Wi-Fi

GIRIS

Enerji, günümüz dünyasında ekonomik kalkınmanın, teknolojik gelişmenin ve yaşam standartlarının en önemli unsurlarından biridir. Artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik ilerlemeler, enerjiye olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Ancak fosil yakıtların sınırlı olması, çevreye verdikleri zarar ve küresel iklim değişikliğine olan olumsuz etkileri, enerji üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflerin önemini ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle güneş enerjisi, erişilebilirliği ve sürdürülebilirliği ile öne çıkan en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak dikkat çekmektedir.

Güneş panelleri, güneşten gelen ışınları elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Temel çalışma prensipleri, panel yüzeyinde bulunan yarı iletken malzemeler sayesinde fotonların elektrik akımına dönüştürülmesine dayanır. Güneş panellerinin amacı; sürdürülebilir, çevre dostu ve uzun vadede ekonomik bir enerji üretim yöntemi sunmaktır. Enerji üretiminde güneş panellerinin kullanımı, hem fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakta hem de karbon salınımını düşürerek çevresel etkileri minimize etmektedir.

Dünya genelinde enerji üretiminde güneş enerjisinin payı her geçen yıl artmaktadır. 2023 verilerine göre, dünya toplam elektrik üretiminin yaklaşık %6'sı güneş enerjisinden sağlanmaktadır. Türkiye'de ise bu oran %4–5 civarında olup, yapılan yatırımlar ve teknolojik gelişmeler sayesinde her yıl artış göstermektedir. Özellikle küçük ölçekli güneş sistemleri, bireysel kullanım ve yerel enerji üretimi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Bu projenin amacı, solar güneş sisteminin verilerinin bilgisayar ortamında izlenmesini ve kontrolünü sağlayarak sistemin güneş enerjisinden en verimli şekilde yararlanmasını sağlamaktır. Proje kapsamında sistem üzerinde akım, voltaj, güç ve sıcaklık gibi parametrelerin ölçülmesi, ESP32 mikrodenetleyici aracılığıyla Wi-Fi üzerinden kendi yerel sunucumuza aktarılarak bu verilerin grafiksel olarak görüntülenmesi ve kaydedilmesi hedeflenmektedir. Böylece kullanıcı, sistemin performansını anlık olarak takip edebilecek, uzun vadeli verimlilik analizleri yapabilecek ve gerekli iyileştirmeleri kolaylıkla gerçekleştirebilecektir.

Özetle, projenin temel amacı, güneş paneli verilerini gerçek zamanlı olarak izlemek ve analiz etmektir. Sistem sayesinde hem enerji üretiminin verimliliği artırılacak hem de güneş enerjisinden maksimum fayda sağlanacaktır. Tasarlanacak kartta, iki adet buton sayesinde manuel kontrol imkânı sağlanacak ve ölçülen veriler LCD ekran üzerinden görüntülenebilecektir. Ayrıca, ESP32'nin yerel Wi-Fi sunucu özelliği sayesinde veriler kullanıcıya sunulacak ve sistem takibi daha güvenli ve hızlı bir şekilde yapılabilecektir. Bu sayede hem enerji yönetimi hem de sistem optimizasyonu açısından önemli bir çözüm geliştirilmiş olacaktır.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür incelendiğinde, güneş panellerinin verimliliğini artırmak ve üretim verilerini izlemek amacıyla farklı takip ve izleme sistemleri geliştirildiği görülmektedir.

Burak İNNER (2016) Bu çalışmada, güneş panellerinden Bluetooth aracılığıyla kablosuz olarak ölçüm verilerinin alınabildiği bir sistem geliştirmiştir. Elde ettiği verileri sunucuya ileterek, bu verilerin sunucu üzerinden anlık olarak kaydedilmesini, gerçek zamanlı izlenmesini ve daha sonra analiz edilmesini sağlamıştır. [1]

Polprasert J. ve arkadaşları (2025) Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için veri analitiği tabanlı bir sistem geliştirmişlerdir. Sistem; güneş paneli takibi, Power BI ile gerçek zamanlı veri izleme ve LSTM tabanlı tahmin modülünü içermektedir. Ayrıca sistemin doğruluğunu RMSE ve MSE değerleriyle değerlendirmişlerdir. [2]

Chow, L. S. ve arkadaşları (2013) Bu projede, güneş panelinin verimini artırmak için servo motor kontrollü bir güneş takip sistemi geliştirmişlerdir. Matlab ile sensör verilerini işleyip paneli güneşe yönlendirmişler ve böylece daha yüksek voltaj elde etmişlerdir. [3]

Saravanan D. ve arkadaşları (2019) Bu çalışmada, enerji tüketiminin artmasıyla birlikte güneş enerjisinin daha verimli kullanılabilmesi için güneş takip ve izleme sistemi geliştirmişlerdir. Mevcut sistemlerin aksine, maliyeti ve güç tüketimi düşük tutmak için IoT modülleri yerine basit sensörler ve step motor kullanmışlardır. [4]

Spanias A. S. (2017) Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinde arıza tespiti ve güç optimizasyonu için akıllı izleme cihazı (SMD) geliştirmiştir. Başlangıçta temel izleme işlevleriyle oluşturduğu sistemi, sensörler, röleler ve kablosuz iletişim modülleri ekleyerek geliştirmiştir. Böylece her paneli IoT ağı içinde birer düğüm gibi çalışacak hale getirmiştir. Geliştirdiği sistem; mobil analiz, arıza tespiti, güç optimizasyonu ve uzaktan kontrol imkânı sunarak güneş tarlalarının verimliliğini artırmıştır. [5]

Phoolwani U. K. ve arkadaşları (2020) Bu çalışmada, güneş panellerinde toz, gölgeleme ve hasar gibi etkenlerin verimliliğe etkisini incelemişlerdir. PV analizör, güneş güç ölçer ve termal kamera kullanarak panellerin normal ve arızalı durumlarını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri verileri NodeMCU üzerinden buluta aktararak sistemin uzaktan izlenmesini sağlamışlardır. [6]

Kekre A. ve arkadaşları (2017) Bu çalışmada, uzak ve erişimi zor güneş paneli kurulumlarını izlemek için düşük maliyetli IoT tabanlı bir PV izleme sistemi geliştirmişlerdir. GPRS modülü ve uygun maliyetli bir mikrodenetleyici kullanarak üretim verilerini internete aktarabilmişler ve böylece panellerin gerçek zamanlı izlenmesi, bakım ve arıza tespitini sağlamışlardır. [7]

Demirtaş M. (2006) Bu çalışmada, bilgisayar kontrollü bir güneş takip sistemi tasarlamış ve uygulamıştır. Sabit ve takip mekanizmalı panellerden elde edilen verileri mikrodenetleyici kontrollü bir arayüzle kaydetmiş ve sistemi bilgisayardan kontrol etmiştir. Ölçümler sonucunda, hareketli güneş takip sisteminin sabit panele göre daha verimli çalıştığını göstermiştir. [8]

Gochhait S. ve arkadaşları (2022) Bu çalışmada, güneş panellerinde tozlanmadan kaynaklanan verim kaybını önlemek amacıyla IoT tabanlı otomatik panel temizleme sistemi geliştirmişlerdir. Sensörler ve mikrodenetleyici yardımıyla çalışan sistem, panelleri su ile veya susuz biçimde otomatik olarak temizleyerek manuel temizlik ihtiyacını azaltmış ve panel verimini önemli ölçüde artırmışlardır. [9]

Boyacı Ö. ve arkadaşları (2018) Bu çalışmada, mikrodenetleyici kontrollü üç eksenli güneş takip sistemi tasarlamışlardır. Atmega328 ve servo motorlar kullanarak panelin üç eksende hareketi sağlanmış, ışık sensörlerinden alınan veriler Matlab/Simulink ortamında işlenmiştir. Eklenen üçüncü eksen sayesinde sistemin daha hızlı ve verimli çalıştığı görülmüştür. [10]

Manohar K. A ve arkadaşları (2022) Bu çalışmada, çift eksenli güneş takip sistemi kullanılarak hareketli ve sabit güneş panellerinin güç çıkışları karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, güneşi iki eksende takip eden sistemin

sabit panellere kıyasla daha yüksek güç ve ışınım verimi sağladığını, böylece mevcut güneş enerjisinden daha etkin yararlanıldığını göstermişlerdir. [11]

Haris O. ve arkadaşları (2021) Bu çalışmada, güneş takip sistemine sahip panel ile sabit panelin güç çıktıları karşılaştırmışlardır. Güneş takip sistemi sayesinde panelin her zaman güneş ışınlarına dik konumda kalması sağlanmış ve böylece ışık alma verimi ile elektrik üretiminin arttığını göstermişlerdir. [12]

Ishak M. H. B. ve arkadaşları (2023) Bu çalışmada, otomatik çift eksenli güneş takip sistemi geliştirerek panel verimliliğini artırmayı amaçlamışlardır. Dört LDR sensörüyle güneşin konumunu izleyen sistem, tek eksenli takip sistemine göre yaklaşık %18 daha fazla enerji üretimi sağlamış ve güneş panellerinin verimini önemli ölçüde artırdığını göstermişlerdir. [13]

Reza N. ve arkadaşları (2021) Bu çalışmada, mikrodenetleyici tabanlı tek eksenli otomatik güneş takip ve su soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Güneş panelinin konumunu otomatik ayarlayarak maksimum ışınımı alması ve su soğutma sistemiyle yüzey sıcaklığını düşürerek verimliliğin artırılması hedeflenmiştir. [14]

Shang H. ve arkadaşları (2023) Bu çalışmada, yeni ve basit yapıya sahip çift eksenli bir güneş takip sistemi tasarlayıp gerçekleştirmişlerdir. Fotoelektrik yöntemle yapılan takip sonucunda, sistemin sabit panellere göre %24,6 oranında daha fazla enerji ürettiğini belirlemişler ve bu yöntemin küçük ve orta ölçekli PV uygulamaları için verimli olduğunu göstermişlerdir. [15]

Taha M. T. ve arkadaşları (2021) Bu çalışmada, tek ve çift eksenli güneş takip sistemlerinin performansını MATLAB/Simulink ve Arduino tabanlı bir kontrol yapısıyla incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, çift eksenli sistem sabit panele göre %3,3, tek eksenli sistem ise %2,6 daha yüksek güç üretmiş ve geliştirilen yapının güneşi gün boyu izleyerek verimi artırdığı gösterilmiştir. [16]

Kabalcı, E. ve arkadaşları (2015) Bu çalışmada, taşınabilir bir güneş takip sistemi geliştirerek fotovoltaik panellerin enerji üretimini artırmayı amaçlamışlardır. Sistem, güneş ışınımı, panel yönü ve gerilim verilerini RF iletişimiyle bilgisayara aktararak anlık izleme ve kayıt imkânı sağlamış, böylece daha verimli bir takip ve izleme yapısı oluşturmuşlardır. [17]

Neacă M. I. (2021) Bu çalışmada, aynı bölgede bulunan çok sayıda güneş panelinin yönelimini çift eksenli olarak kontrol edebilen bir sistem tasarlamıştır. Geliştirilen yapı, motorların düşük güç tüketimi sayesinde maliyeti azaltarak, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm verimini artırmıştır. [18]

Ghassoul M. (2018) Bu çalışmada, güneş panellerinin gereksiz enerji tüketimini önleyerek daha verimli takip yapmasını sağlayan mikrodenetleyici tabanlı bir sistem tasarlamıştır. Geliştirilen "PILOT–PANEL" yapısı sayesinde panel yalnızca daha fazla enerji üretecek konuma geçtiğinde hareket etmekte ve böylece güç tüketimi azalırken enerji verimi artırılmaktadır. [19]

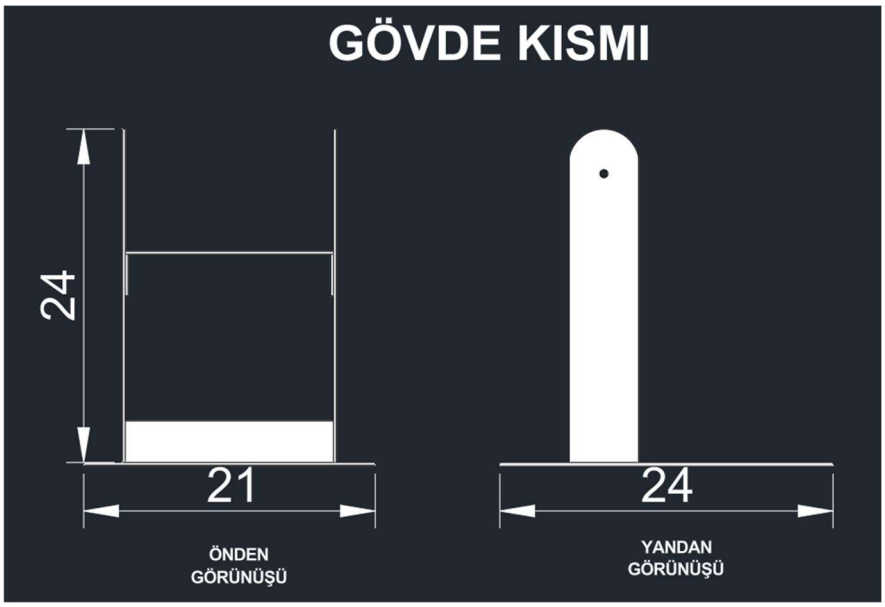
Gonzalez A. H. ve arkadaşları (2021) Bu çalışmada, tek eksenli bir güneş takip sisteminin mekanik ve elektronik tasarımını gerçekleştirmişlerdir. LabVIEW arayüzüyle elde edilen veriler, sabit panelle karşılaştırıldığında sistemin %19 ila %47 oranında daha fazla güç ürettiğini göstermiş ve Pv-Syst simülasyon sonuçlarıyla yüksek uyum sağladığını doğrulamışlardır. [20]

GÜNEŞ PANELİ STANTI

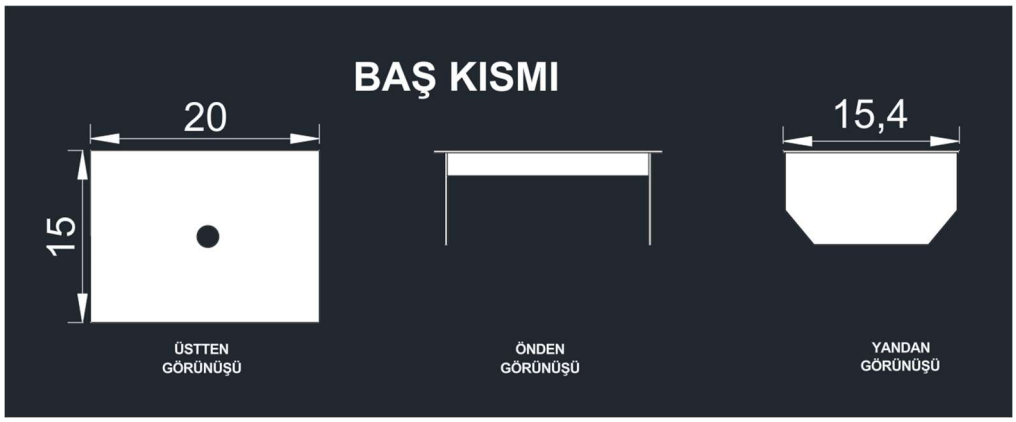
Güneş panelinin ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilmesi için, panelin doğru açıyla ve konumda yerleştirilmesi ve ışık kaynağını sürekli olarak takip etmesi gerekmektedir. Bu amaçla, panelin hareket edebilmesini sağlayacak bir stant tasarlanmış ve üretilmiştir. Stant, güneş panelinin doğru konumlandırılmasına, doğru açıyı bulmasına, servo motorlar aracılığıyla hareket sisteminin sağlanmasına ve baskı devresinin yerleştirilebileceği boş alanlara sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Standın taşınabilirliği, servo motorların zorlanmadan hareket edebilmesi ve düşük maliyeti göz önünde bulundurularak malzeme olarak ince tahta blok seçilmiştir. Seçilen malzemenin ince ve hassas olması nedeniyle parçaların birleşiminde güçlü yapıştırıcılar kullanılmıştır. Gövde kısmının servo motor miline bağlantı noktası için gerekli delikler açılmış, yapının daha sağlam olması amacıyla gövde aralarına destek amaçlı tahta bloklar eklenmiştir. Ayrıca, gövdenin alt plakası biraz daha uzun tasarlanarak PCB kartın yerleşimi için uygun boş alan bırakılmıştır. Standın baş kısmında ise güneş panelinin kablo bağlantılarının rahat yapılabilmesi için orta kısımda kabloların geçişine uygun bir delik açılmıştır.

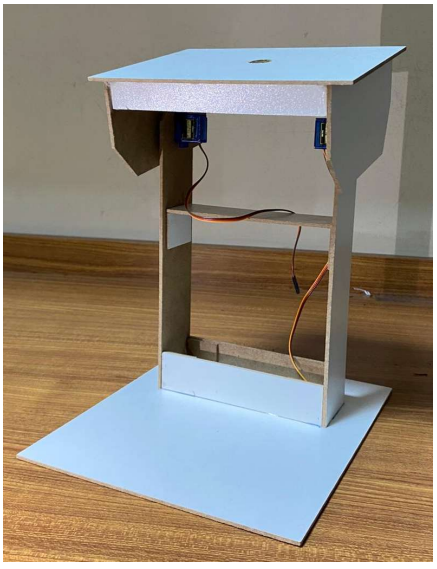
Şekil 1 ve Şekil 2'de standın çizimleri ve ölçümleri, Şekil 3'te ise çizimler referans alınarak üretilen gerçek standın görseli verilmiştir.



Şekil 1. Gövde Kısmının Çizimleri



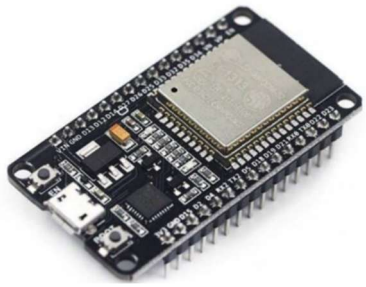
Şekil 2. Baş Kısmının Çizimleri



Şekil 3. Güneş Paneli Stantı

ELEKTRONIK MALZEMELER VE MALIYET

ESP32S WROOM



Şekil 4. ESP32S WROOM

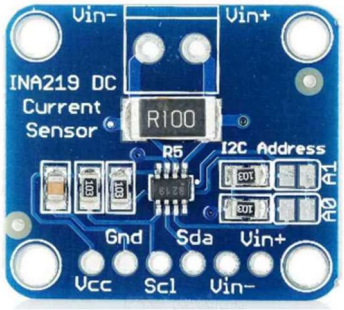
Projede, güneş panelinden gelen verilerin okunması, panelin konum takibinin yapılması ve verilerin web arayüzünden takip edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu gereksinimlere uygun olarak mikrodenetleyici olarak ESP32S WROOM seçilmiştir. ESP32'nin dahili 2.4 GHz WiFi modülü, harici modül gerektiren diğer mikrodenetleyicilere (ör. PIC, STM32) göre avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, PIC veya STM32 ile web sunucu kurmak daha karmaşık ve zahmetli bir süreçtir. Mikrodenetleyiciye 2 adet LDR, 1 adet akım/voltaj sensörü, 2 adet buton (manuel kontrol için), 2x16 LCD Ekran (baskı devre üzerinden veri okuyabilmek için) ve 2 adet servo motor bağlanacaktır. Seçilen ESP32 modülünün 30 GPIO pini, 4 MB flash bellek, 520 KB RAM ve 240 MHz saat hızı gibi özellikleri bulunmakta olup, proje ihtiyaçlarını karşılaması açısından yeterli görülmüştür. Şekil 4'te kullanılan ESP32 modülünün görseli verilmiştir.

Güneş Paneli

Şekil 5. Güneş Paneli

Kullanılan güneş paneli maksimum 6 V, 500 mA çıkışa sahip olup, boyutları 17 cm × 13 cm'dir. Bu ölçüler dikkate alınarak, panel için uygun bir stant tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 5'te kullanılan güneş panelinin görseli verilmiştir.

INA219



Şekil 6. INA219

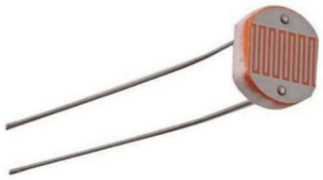
INA219 sensörü, 26 V'a kadar gerilimi ve ±3.2 A aralığında akımı ölçebilmektedir. Kullanılan güneş paneli maksimum 6 V, 500 mA çıkış verdiği için, bu sensör panelin çıkışını rahatlıkla ölçebilmektedir. Sensör, ölçtüğü akım ve gerilim değerlerini I²C protokolü üzerinden ESP32'ye aktarır. Şekil 6'da INA219 akım ve voltaj sensörünün görseli verilmiştir.

SG90 Servo Motor

Şekil 7. SG9*0*

SG90 servo motor, 180° açıya kadar dönebilmekte olup, panelin hareketini kolayca sağlayabilmesi ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmiştir. Servo motorun paneli döndürebilecek güce sahip olup olmadığı test edilmiş ve başarılı sonuç alınmıştır; bu nedenle bu model seçilmiştir. Ekstra olarak bir adet yedek motor eklendiği için toplam iki adet servo motor kullanılmıştır. Şekil 7'de SG90 servo motorun görseli verilmiştir.

LDR



Panelin ışık kaynağını takip edebilmesi için iki adet 10mm LDR kullanılmıştır. Şekil 8'de LDR'nin görseli verilmiştir.

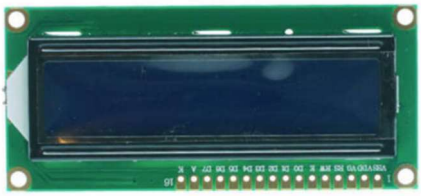
Şekil 8. LDR 10mm

Dört Pinli Push Buton

Baskı devre kartı üzerinde, panelin manuel kontrolünü sağlamak amacıyla iki adet dört pinli push buton kullanılmıştır. Şekil 9'da kullanılan push butonun görseli verilmiştir.

Şekil 9. Push Button

16x2 LCD Ekran – I2C



Baskı devre kartı üzerinde, akım, voltaj, güç ve işlemci sıcaklığı gibi verilerin okunabilmesi amacıyla bir LCD ekran kullanılmıştır. Şekil 10'da kullanılan LCD ekranın görseli verilmiştir.

Şekil 10. LCD Ekran

Maliyet Tablosu

Tablo 1'de projenin maliyet tablosu verilmiştir.

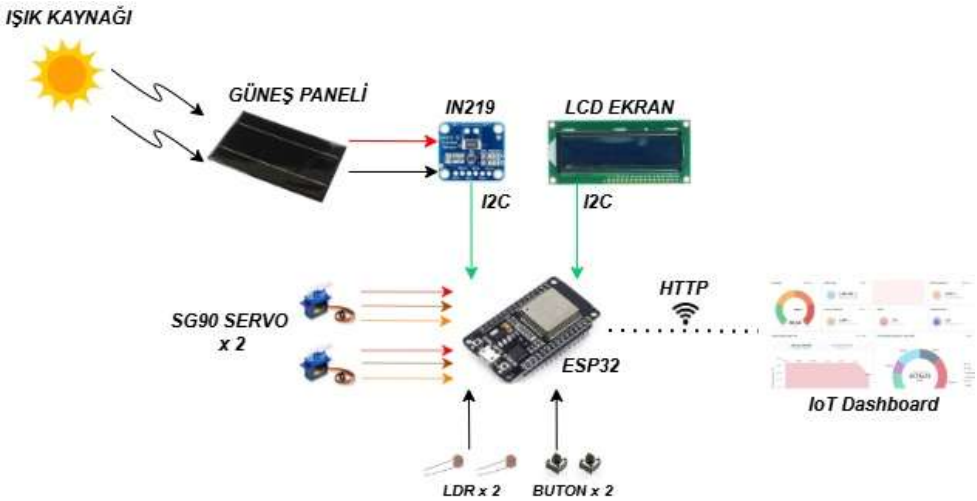
Tablo 1. Maliyet Tablosu

Malzeme Adı	Ürün Kodu	Adet	Birim Fiyatı	Toplam Fiyatı
ESP	ESP-32S	1	341 TL	341 TL
Güneş Paneli	Solar Panel 6V 500mA	1	516,50 TL	516,50 TL
Akım ve Voltaj Sensörü	INA219	1	53,46 TL	53,46 TL
Servo Motor	SG90	2	67,65 TL	135,3 TL
LDR	10mm	2	24,09 TL	48,18 TL
Push Buton	4 pinli	2	2,05 TL	4,10 TL
LCD Ekran	16x2, I2C	1	131,21 TL	131,21 TL
Stant Üretimi	-	1	200 TL	200 TL
				1429,75 TL

SISTEMIN BLOK DIYAGRAMI

Sistemde, güneş paneli gelen ışık kaynağından enerji üretir. Panelden alınan akım ve gerilim değerleri, INA219 sensörü aracılığıyla ölçülür ve I2C protokolü üzerinden ESP32 mikrodenetleyicisine iletilir. Ayrıca, panelin güneşi en iyi açıyla takip edebilmesi için iki adet LDR (ışığa duyarlı direnç) kullanılır. Bu LDR'lerden gelen ışık yoğunluğu farkına göre ESP32, SG90 servo motor sayesinde güneş panelinin konumunu ayarlar. Herhangi bir sorun çıkması durumunda ise fazladan bir adet yedek servo motor sisteme eklenmiştir. Baskı devre kartından manuel kontrol için iki adet buton ve veri okumak için LCD Ekran sisteme dahil edilmiştir. Toplanan enerji ve sensör verileri ESP32 üzerinden HTTP protokolü ile oluşturulan yerel sunucuya gönderilir. Bu arayüz sayesinde kullanıcı, sistemin anlık performansını, enerji üretimini ve sensör verilerini çevrimiçi olarak izleyebilmekte ve analiz edebilmektedir.

Şekil 11'de sistemin blok diyagram verilmiştir.

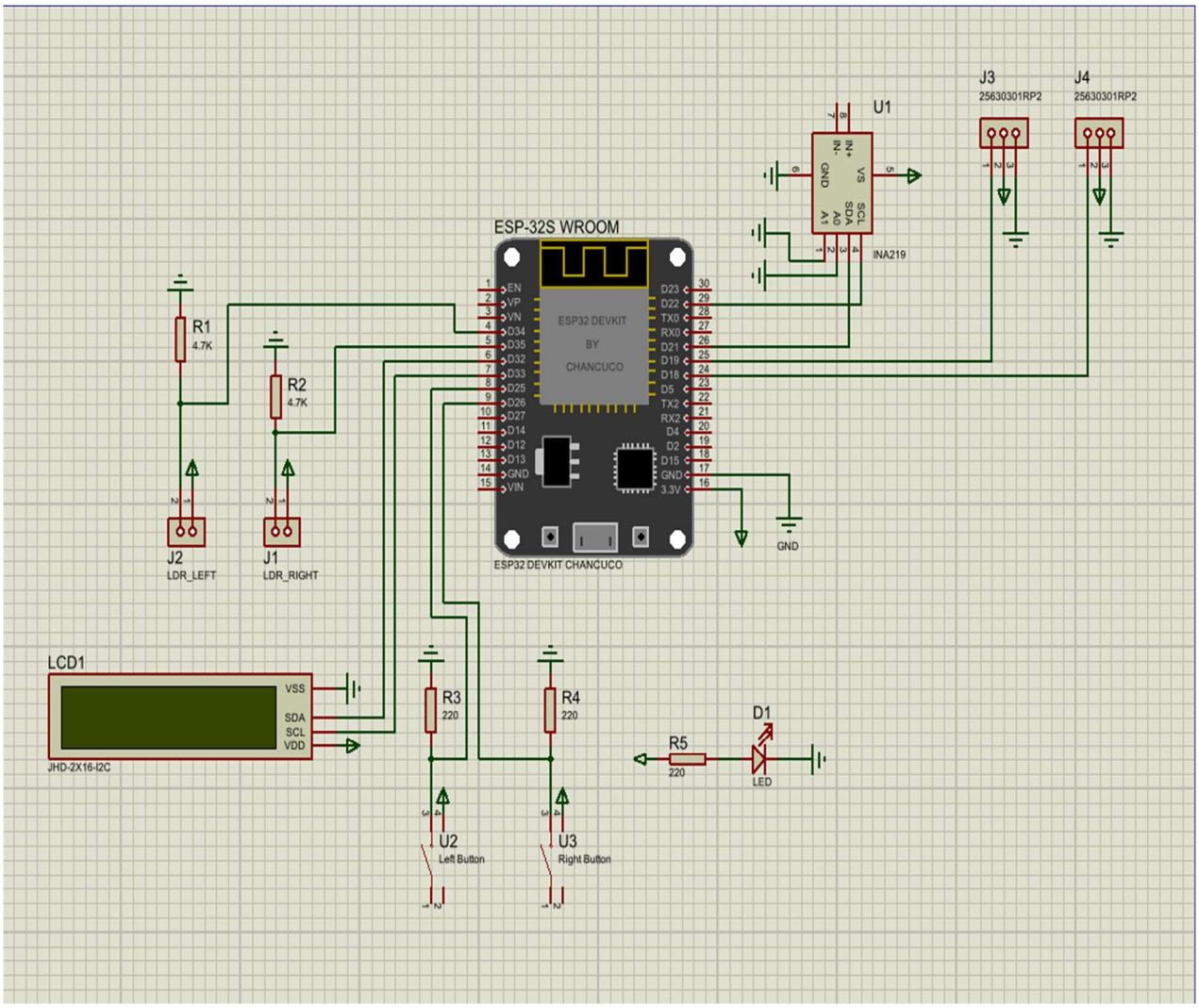


Şekil 11. Sistem Şeması

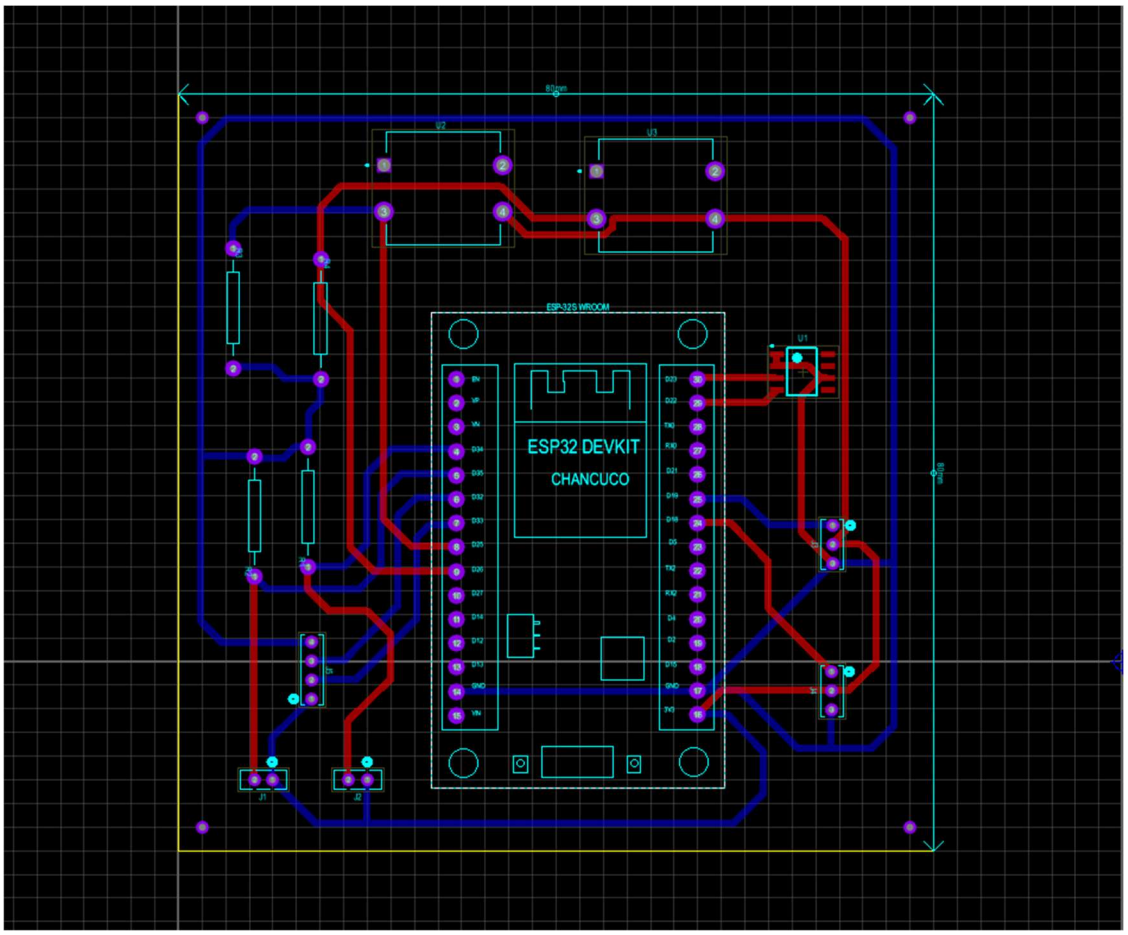
BASKI DEVRE KARTI TASARIMI

Sistemimizin şematik ve PCB tasarımı Proteus programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımda iki adet LDR sensörü güneş paneline yakın bir konumda yer alması gerektiğinden, bu sensörler karta doğrudan monte edilmemiş ve kablo ile bağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı şekilde servo motorlar ve LCD ekran da kart üzerinde header konnektörleri aracılığıyla sisteme bağlanacaktır. Bu nedenle PCB üzerinde bu bileşenler doğrudan yerleştirilmemiş, yerine uygun header bileşenleri kullanılmıştır. Ayrıca INA219 akım/gerilim sensörü ve iki adet butonun da bağlantıları şemaya dahil edilmiştir.

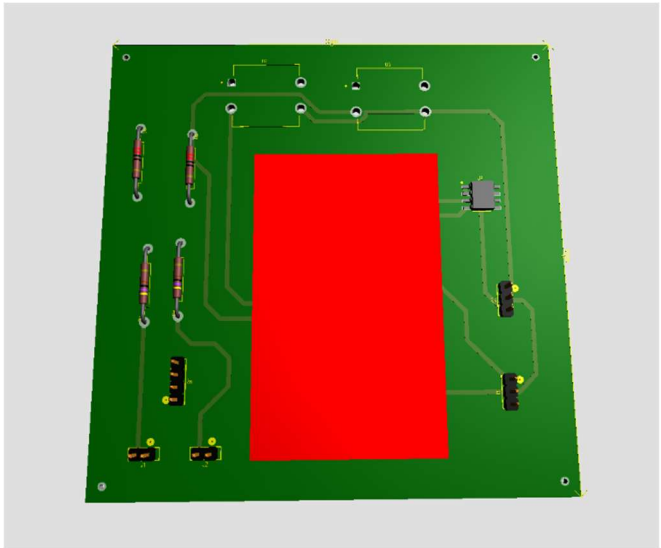
PCB tasarımı için kart boyutu 8x8 cm olarak belirlenmiş ve tüm bileşenler bu ölçülere uygun şekilde yerleştirilmiştir. Kart tasarımında, bağlantı yollarının çakışmasını önlemek ve üretim sürecinde hata oluşma ihtimalini azaltmak amacıyla çift katmanlı (iki yüzlü) PCB kullanılmıştır. Şekil 12,13,14 ve 15'te çizime ait görseller verilmiştir.



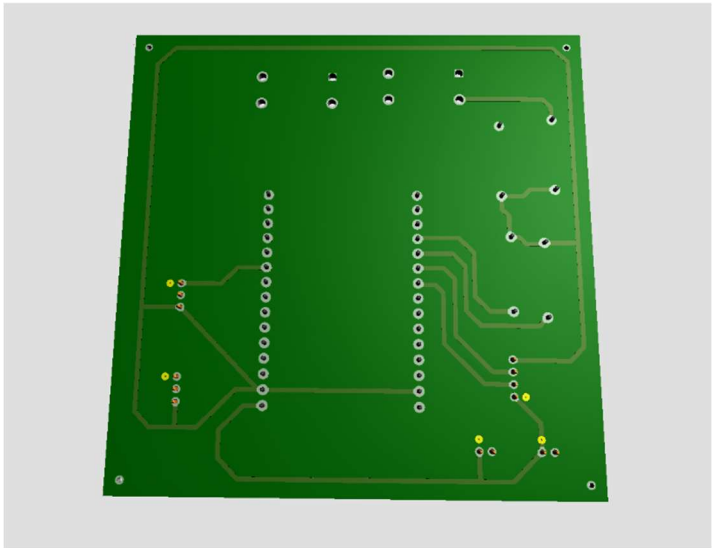
Şekil 12. Şematik Çizimi



Şekil 13. PCB Çizimi



Şekil 14. 3D Önden Görünümü

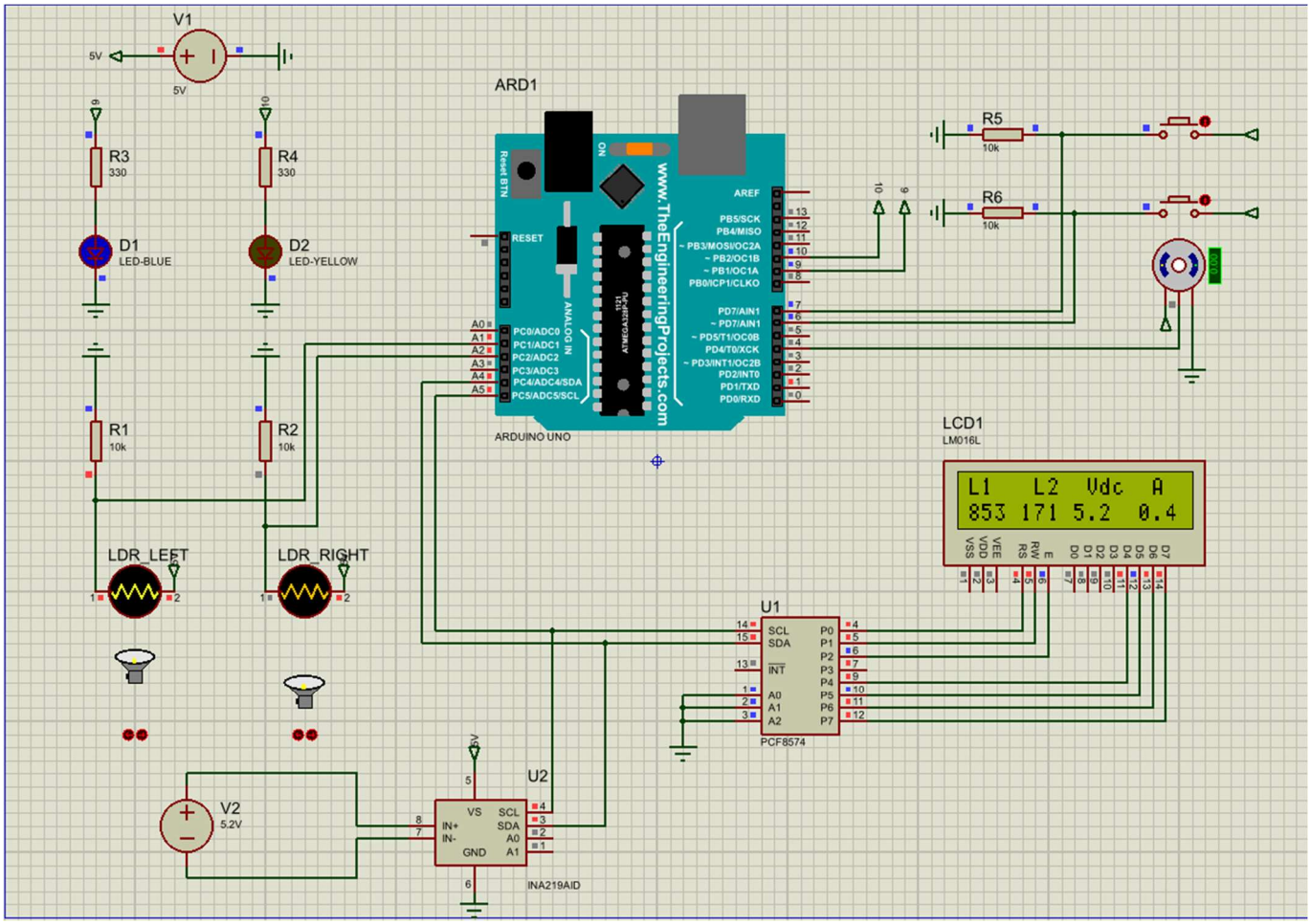


Şekil 15. 3D Arkadan Görünümü

KART SİMÜLASYONU

Kartın simülasyonu Proteus yazılımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. ESP32 kartının Proteus ortamında desteklenmemesi nedeniyle, simülasyon Arduino Uno kütüphanesi kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, Proteus'taki Arduino Uno modeli 5V ve GND beslemelerine sahip olmadığından, devredeki bileşenlere gerekli güç DC kaynak

aracılığıyla sağlanmıştır. İki adet LDR sensörünün değerlerinin okunmasını simüle edebilmek için devreye iki adet LED eklenmiş ve LDR'lerin okuduğu ışık değerlerine göre LED'lerin parlaklıkları ayarlanmıştır. Bu sayede sensörlerin çalışma durumu görsel olarak gözlemlenmiştir. Motor hareketlerinin simülasyonu için iki buton kullanılmıştır. Butonlardan biri basıldığında motor saat yönünde, diğer butona basıldığında ise motor saat yönünün tersinde dönmektedir. INA219 akım ve voltaj sensör modülünün ölçümlerini simüle edebilmek için girişine temsili bir güneş paneli voltaj kaynağı bağlanmıştır. Ölçülen akım ve voltaj değerleri, ayrı bir I2C tabanlı LCD ekran aracılığıyla Arduino'ya aktarılmış ve ekran üzerinde görüntülenmiştir. Simülasyon kodları Arduino IDE üzerinde yazılmış, derlenerek hex dosyası oluşturulmuş ve Proteus'ta Arduino Uno modeline yüklenerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem LDR değerleri hem de INA219 modülünün ölçümleri LCD ekran üzerinden takip edilebilmiştir.



Şekil 16. Simülasyon

ALGORİTMALAR, VERİ İLETİŞİMİ VE ESP32 WEB ARAYÜZ TASARIMI

Arayüz Tasarımı

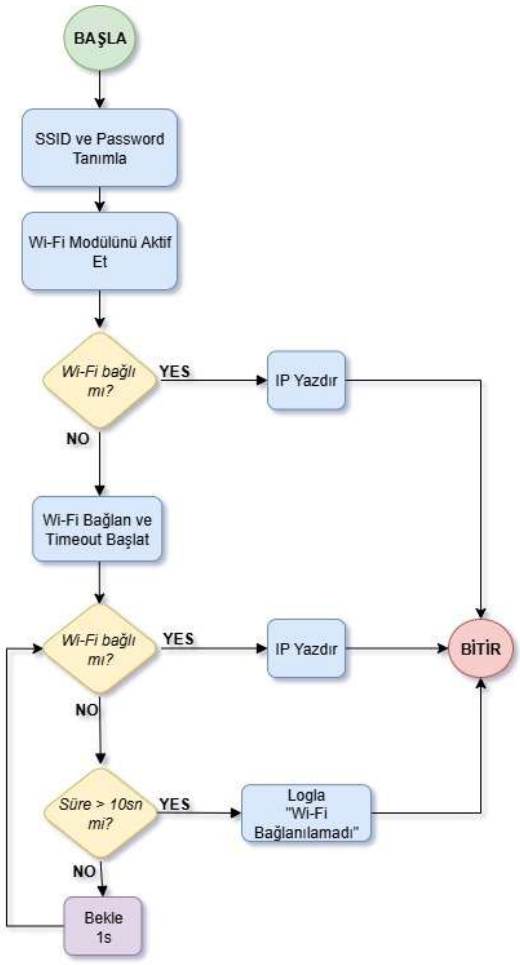
Projede, ESP32 mikrodenetleyici kullanılarak güneş paneli sisteminin sensör verilerinin izlenebildiği ve servo motorların kontrol edilebildiği bir yerel web tabanlı arayüz geliştirilmiştir. ESP32'nin hem Wi-Fi hem de web sunucu özelliklerinden faydalanılmıştır. Bu sayede sistem, harici bir sunucuya ihtiyaç duymadan, yerel ağ üzerinden tarayıcı aracılığıyla erişilebilen bir kontrol paneli sunmaktadır.

Wi-Fi Bağlantısının Sağlanması

Programın başlangıcında ESP32, üzerindeki ağ modülü aracılığıyla yerel kablosuz ağa (Wi-Fi) bağlanmayı dener. Bağlantı işlemi, önceden tanımlanmış SSID ve şifre bilgileri kullanılarak gerçekleştirilir.

Bağlantı başarılı olduğunda, ESP32'nin aldığı IP adresi konsola yazdırılır. Ancak bağlantı sağlanamazsa, bir sayaç başlatılarak cihaz on saniye boyunca yeniden bağlantı denemesi yapar. Bu süre içinde bağlantı kurulursa yine IP adresi konsola yazdırılır. Eğer on saniye sonunda bağlantı hâlâ sağlanamamışsa, program bağlantı başarısızlığının nedenini konsola bildirir ve çalışmayı sonlandırır. Bu kontrol mekanizması bulunmadığı takdirde program sonsuz döngüye girebilir.

Bağlantı başarılı olduğunda elde edilen IP adresi, aynı Wi-Fi ağına bağlı bir bilgisayar veya mobil cihazın tarayıcısına girilerek web arayüzüne erişim sağlamak için kullanılabilir. Şekil 17'de Wi-Fi'ye bağlanma algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.

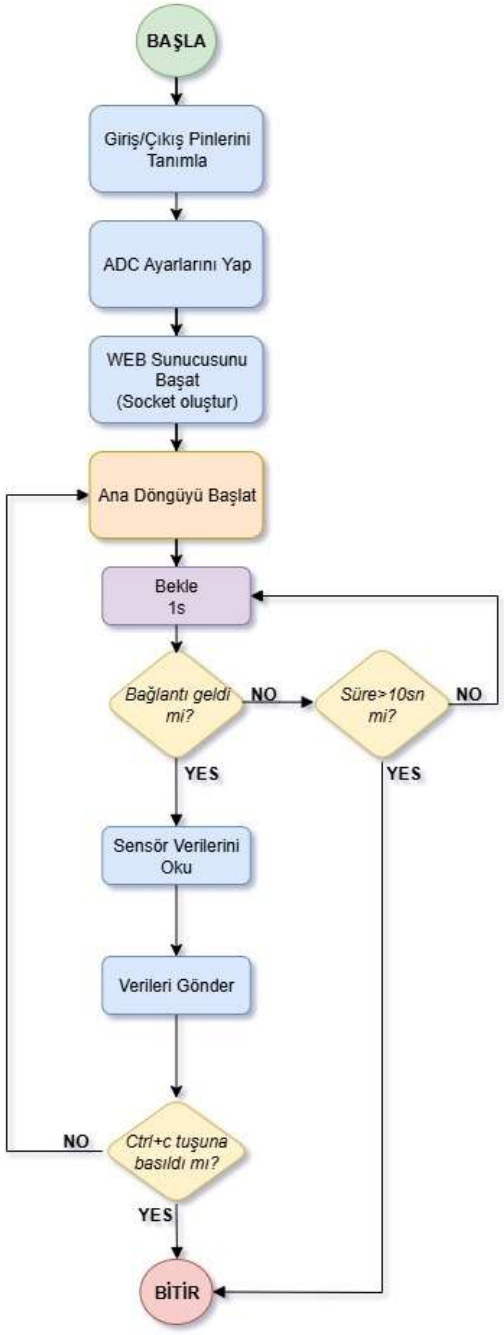


Şekil 17. Wi-Fi'ye Bağlanma Algoritması

Sensör Verilerinin Okunması ve Web Arayüzüne İletilmesi

Bu sistemde akım, voltaj, güç, iki adet LDR değeri, servo motor açısı ve ESP32'nin dahili sıcaklık sensörü verilerinin web arayüzüne aktarılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda giriş/çıkış pinleri tanımlanmış ve ADC ayarları yapılandırılmıştır. Daha sonra ESP32 üzerinde HTTP tabanlı Web Sunucusu başlatılarak veri iletişim döngüsü çalıştırılmıştır. Ana döngüde her bir saniyede bir bağlantı kontrolü yapılmakta, bağlantı sağlandığında sensör verileri okunup işlenmekte ve REST tabanlı HTTP GET isteği ile Wi-Fi üzerinden istemciye iletilmektedir. Bağlantı sağlanmazsa veya on saniyelik zaman aşımı gerçekleşirse sistem bağlantıyı bitirmektedir. Kullanıcı Ctrl+C komutunu verdiğinde döngü sonlandırılarak sistem güvenli şekilde kapatılmaktadır. Bu yapı sayesinde sensör verileri web

arayüzüne düzenli ve sağlıklı bir şekilde aktarılmıştır. Şekil 18'de verilerin okunma ve iletim algoritmasının akış şeması verilmiştir.

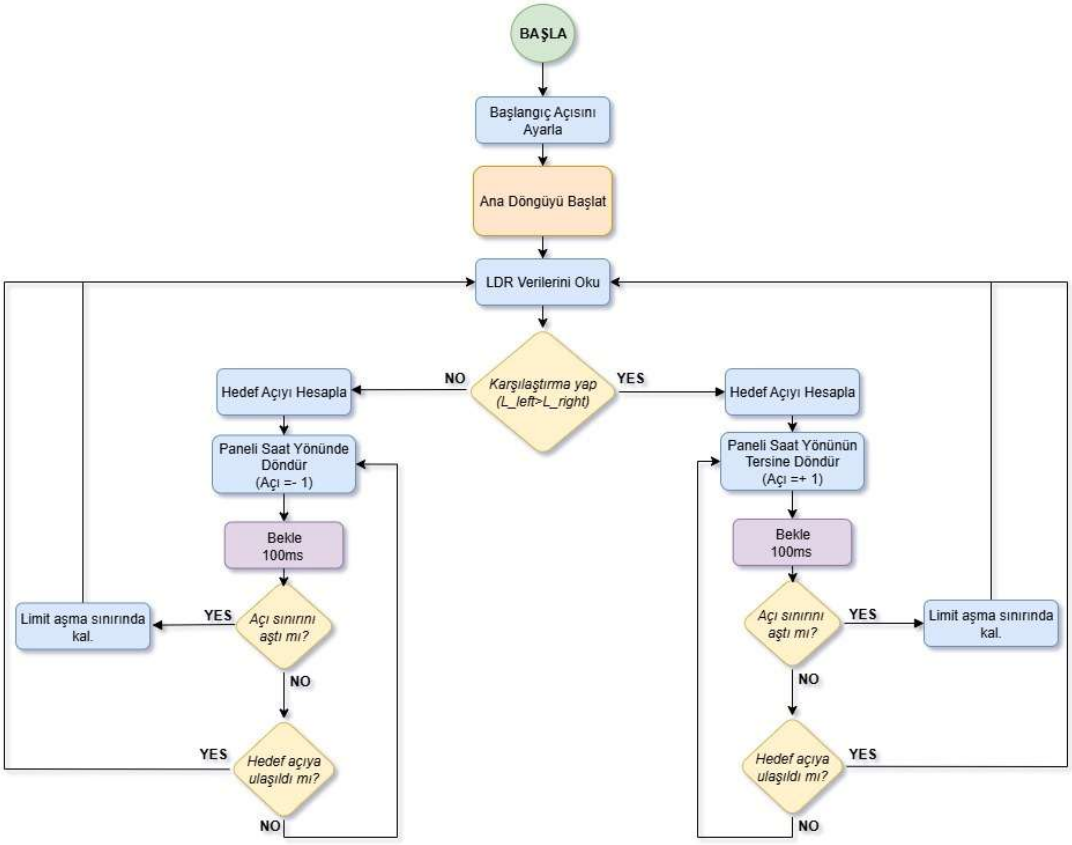


Şekil 18. Verilerin Okunma Hesaplanma ve İletilme Algoritması

Güneş Paneli Kontrol Algoritması

Bu sistemde güneş takibi için iki adet LDR sensörü kullanılmaktadır. Başlangıç açısı ayarlandıktan sonra ana döngü içinde LDR verileri sürekli okunur ve karşılaştırılır. Işığın hangi yönden daha fazla geldiği belirlenerek servo motor, o yöne doğru 1°'lik adımlarla döndürülür. Her adım arasında 100 ms bekleme süresi uygulanarak hareket kararlılığı sağlanır.

Servo motor hareket ederken açı limitleri kontrol edilir; sınır aşılacaksa motor durdurulur. Hedef açıya ulaşıldığında sistem tekrar sensör karşılaştırmasına dönerek güneş konumunu izlemeye devam eder. Bu sayede panel ışığa en uygun pozisyonda tutulur. Şekil 19'de güneş panelinin kontrol algoritmasının akış şeması verilmiştir.



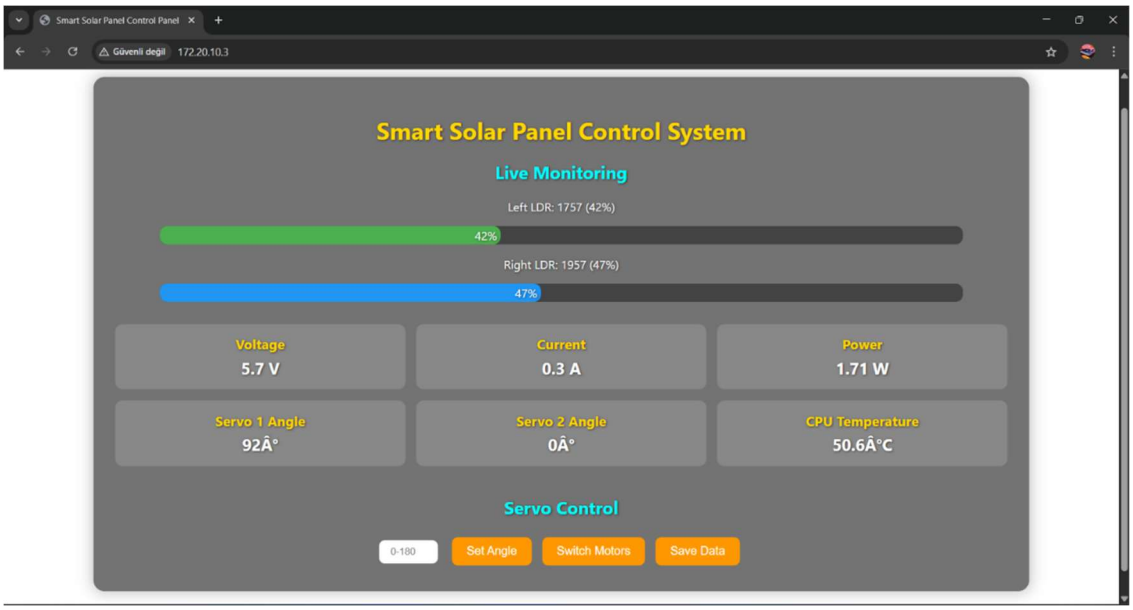
Şekil 19. Güneş Paneli Kontrol Algoritması

HTML Arayüzün Yapısı

ESP32 üzerinde sensör verilerinin izlenebilmesi amacıyla HTTP tabanlı bir web sunucusu oluşturulmuştur. Bu işlem için socket kütüphanesinden yararlanılmıştır. Tarayıcı üzerinden ESP32'nin IP adresine erişildiğinde cihaz, istemci bağlantısını kabul ederek HTML tabanlı web arayüzünü kullanıcıya iletmektedir. Web arayüzünde veri güncellenmesi belirli aralıklarla sağlanmakta ve sensör verileri böylece anlık olarak takip edilebilmektedir. İletişim, Wi-Fi üzerinden TCP/IP protokolü ile gerçekleştirilmektedir.

Web arayüzü Python kodundan dinamik olarak üretilmekte olup, HTML ve CSS ile modern ve anlaşılır bir tasarım sunmaktadır. Sol ve sağ LDR sensörlerinden gelen ışık şiddeti değerleri yüzde cinsinden ilerleme çubuğu şeklinde gösterilmekte; akım, voltaj, güç, servo motor açısı ve dahili sıcaklık verileri ise kutular hâlinde düzenli bir grid yapısında sunulmaktadır. Kullanıcı arayüz üzerinden servo açı ayarlarını değiştirebilmekte ve "Save Data" butonu ile ölçüm verilerini kayıt altına alabilmektedir.

Sistem güvenlik açısından yalnızca aynı Wi-Fi ağına bağlı kullanıcıların erişimine izin vermektedir. İlerleyen aşamalarda bu yapının geliştirilmesi ve uzaktan internet erişimi sağlanması planlanmaktadır. Bu durumda doğabilecek güvenlik risklerine karşı kimlik doğrulama ve yetkilendirme mekanizmalarının uygulanması hedeflenmektedir. Şekil 20'de HTML ile yazılan web arayüzün görseli verilmiştir.



Şekil 20. Web Arayüzü

REFERANSLAR

[7] İNNER, Burak. "Güneş Panelleri için Bluetooth tabanlı Veri İzleme Sistemi Data Monitoring System for Solar Panels with Bluetooth."

[8] Polprasert, Jirawadee, et al. "Smart Solar Energy Tracking and Forecasting System Using Data Analytics and LSTM Models." 2025 13th International Electrical Engineering Congress (iEECON). IEEE, 2025.

[9] Chow, Li Sze, and Michael Abiera. "Optimization of solar panel with solar tracking and data logging." 2013 IEEE Student Conference on Research and Developement. IEEE, 2013.

[10] Saravanan, D., and T. Lingeshwaran. "Monitoring of solar panel based on IoT." 2019 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). IEEE, 2019.

[11] Spanias, Andreas S. "Solar energy management as an Internet of Things (IoT) application." 2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA). IEEE, 2017.

[12] Phoolwani, Udit Kumar, et al. "IoT based solar panel analysis using thermal imaging." 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). IEEE, 2020.

[13] Kekre, Ankit, and Suresh K. Gawre. "Solar photovoltaic remote monitoring system using IOT." 2017 International conference on recent innovations in signal processing and embedded systems (RISE). IEEE, 2017.

[14] Demirtaş, Mehmet. "Bilgisayar kontrollü güneş takip sisteminin tasarımı ve uygulaması." Politeknik Dergisi 9.4 (2006): 247-253.

[15] Gochhait, Saikat, et al. "Application of IoT: a study on automated solar panel cleaning system." 2022 4th International conference on electrical, control and instrumentation engineering (ICECIE). IEEE, 2022.

[16] Boyacı, Ömer, and Çağrı Kocaman. "MATLAB/Simulink Üzerinden Gerçek Zamanlı Gömülü Sistem Tabanlı Güneş Takip Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması." Anka E-Dergi 3.1 (2018): 1-15.

[17] Manohar, K. A., Bairwa, B., Yaragatti, U. R., & Raghu, C. N. (2022, October). Pv power prediction and investigation for movable solar pv module. In 2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon) (pp. 1-6). IEEE.

[18] Haris, O., Darmawan, A., & Juliansyah, A. (2021, August). Efficiency analysis of using solar panel system tracker to static solar panel. In 2021 IEEE 7th International Conference on Computing, Engineering and Design (ICCED) (pp. 1-6). IEEE.

[19] Ishak, M. H. B., Burham, N., Masrie, M., Janin, Z., & Sam, R. (2023, October). Automatic dual-axis solar tracking system for enhancing the performance of a solar photovoltaic panel. In 2023 IEEE 9th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA) (pp. 279-283). IEEE.

[20] Reza, N., & Mondol, N. (2021, July). Design and implementation of an automatic single axis tracking with water-cooling system to improve the performance of solar photovoltaic panel. In 2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI) (pp. 1-6). IEEE.

[21] Shang, H., & Shen, W. (2023). Design and implementation of a dual-axis solar tracking system. Energies, 16(17), 6330.
[22] Taha, M. T., Mohamed, E. O., Abdolsalam, A. M., & Taha, A. B. (2021, February). Control of Single-Axis and Dual-Axis Solar Tracking System. In 2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE) (pp. 1-6). IEEE.
[23] Kabalcı, E., Calpbinici, A., & Kabalci, Y. (2015, June). A single-axis solar tracking system and monitoring software. In 2015 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (pp. SG-17). IEEE.
[24] Neacă, M. I. (2021, May). Solar tracking system for several groups of solar panels. In 2021 international conference on applied and theoretical electricity (ICATE) (pp. 1-4). IEEE.
[25] Ghassoul, M. (2018). Single axis automatic tracking system based on PILOT scheme to control the solar panel to optimize solar energy extraction. Energy Reports, 4, 520-527.
[26] GONZALEZ ACEVEDO, H. E. R. N. A. N. D. O., Muñoz Maldonado, Y. A., Ospino, A., Serrano Atencio, J. A., & Jaimes Saavedra, C. (2021). Design and performance evaluation of a solar tracking panel of single axis in Colombia.

PID CONTROLLED SİNGLE-AXİS ANGULAR STABİLİZATİON SYSTEM

Selin ŞAHBAZ[1]

[1] *Department of Electric Electronic Engineering Student, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, s.sahbaz2703@gmail.com*

Abstract –This study presents the design of a single-axis angular stabilization system using a PID control algorithm implemented on an STM32 microcontroller. The system aims to keep a platform balanced by reading real-time angular data from an MPU6050 sensor and controlling a servo motor accordingly. The system is powered through LM2596 and LM2576T voltage regulators, which provide stable power levels for both the logic and actuator sections. The proposed design outlines the control strategy, hardware structure, and signal flow required for achieving angular stabilization on a single axis.

Keywords: STM32; PID Control; MPU6050; Servo Motor; Stabilization System

GİRİŞ

Dengeleme sistemleri, özellikle insansız hava araçları, kamera gimbal sistemleri ve robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde dış etkiler nedeniyle oluşan açı sapmalarının giderilmesi için hızlı ve kararlı bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulur. PID (Oransal–İntegral–Türevsel) denetleyici, bu amaçla en yaygın kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir.

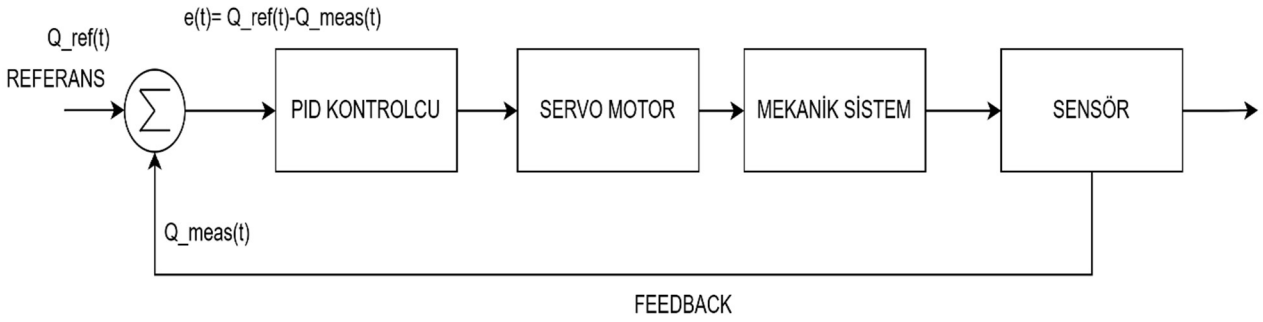
Literatürde farklı araştırmalar PID kontrolün performansını artırmaya yönelik çeşitli yaklaşımlar sunmuştur. Harun Eroğlu (2023), gimbal sistemlerinde PI, LQR ve Kayma Kipli kontrol yöntemlerini karşılaştırarak klasik PID yapısının düşük maliyetli sistemlerde yeterli performans sağladığını göstermiştir. Murat Şahin (2015), iki eksenli gimbal sisteminde kendinden ayarlamalı PID kontrol uygulayarak sistemin kararlılığını artırmıştır. Bindu ve Namboothiripad (2012), genetik algoritma tabanlı PID kazanç ayarlamasıyla denetleyicinin yerleşme süresini kısaltmıştır.

Bu çalışmada, tek eksenli bir sistemin açısal dengesini sağlamak için PID tabanlı bir kontrol yapısı önerilmiştir. Tasarlanan sistemin hem donanımsal hem de yazılımsal kısımları açıklanmıştır,

MATERYAL VE METOT

Sistem Yapısı

Sistem, STM32F401 mikrodenetleyici, MPU6050 sensörü, MG90S servo motoru, LM2596 ve LM2576T regülatörleri ile 12V/3A adaptörden oluşmaktadır. Mikrodenetleyici, MPU6050 sensöründen aldığı verileri işleyerek PID algoritmasını çalıştırır ve servo motoru PWM sinyaliyle kontrol eder.



Şekil 1. Sistem Blok Diyagramı.

Kullanılan Elemanlar

- **STM32F401CCU6:** 84 MHz hızında çalışan, 32-bit ARM Cortex-M4 çekirdeğine sahip mikrodenetleyici. PWM, UART, I²C ve DMA birimleri aktif olarak kullanılmıştır.
- **MPU6050:** 3 eksenli ivmeölçer ve 3 eksenli jiroskop sensörü. 3.3–5 V arasında çalışır, I²C haberleşmesiyle mikrodenetleyiciye bağlanır.
- **MG90S Servo Motor**: 4.8–6 V beslemeyle çalışan, 2.2 kg·cm tork sağlayan metal dişli mikro servo.
- **LM2596 Buck Converter:** 12 V girişten 6 V çıkış üretir, maksimum 3 A akım kapasitesine sahiptir.
- **LM2576T Regülatör:** 6 V'tan 3.3 V sabit çıkış üretir, mikrodenetleyici ve sensörleri besler.
- **12V/3A Adaptör:** Tüm sistemin enerji kaynağıdır.

PID Kontrol Algoritması

Sistem, kapalı çevrim prensibiyle çalışır. MPU6050 sensöründen alınan açısal veri, referans açı (0°) ile karşılaştırılarak hata değeri hesaplanır.
PID denklemi:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

PID çıkışı servo motora PWM sinyali olarak uygulanır.

Yazılım Akışı ve Diyagramı

Sistemin yazılımı STM32CubeIDE ortamında C dili ile geliştirilmiştir. Yazılımın temel çalışma adımları aşağıda verilmiştir:

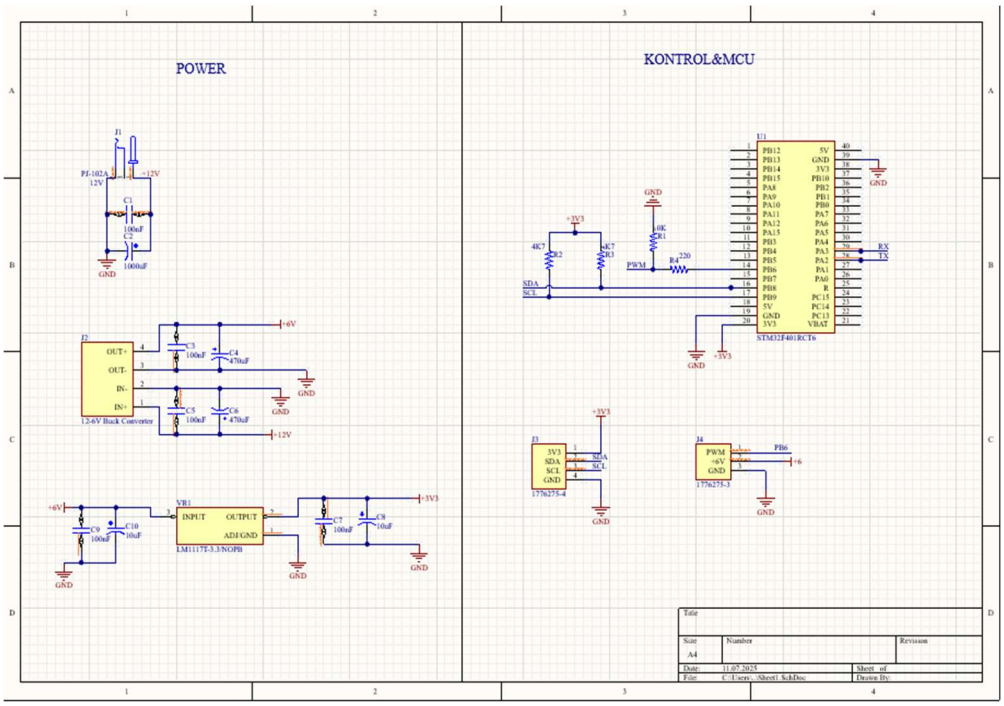
1. Sistem başlatılır (I²C, UART, PWM, Timer modülleri aktif edilir).
2. MPU6050 sensörü başlatılır ve kalibrasyon verileri alınır.
3. İvme ve jiroskop verileri okunur, komplementer filtreyle açı hesaplanır.
4. Referans açı (0°) ile ölçülen açı karşılaştırılır ve hata değeri hesaplanır.
5. PID algoritması uygulanır.
6. PID çıkışı PWM sinyaline dönüştürülür.
7. Servo motor PWM sinyaliyle platform açısını düzeltir.
8. Döngü örnekleme süresiyle tekrarlanır.

Şekil 2. Akış Diyagramı.

Devre Şeması

STM32 mikrodenetleyici, MPU6050 sensörüne I²C hattı (SCL–SDA) üzerinden bağlanmıştır. MG90S servo motor PWM çıkışından kontrol edilmektedir. Güç katında LM2596 buck converter 6 V üretirken, LM2576T entegresi 3.3 V çıkış sağlamaktadır.

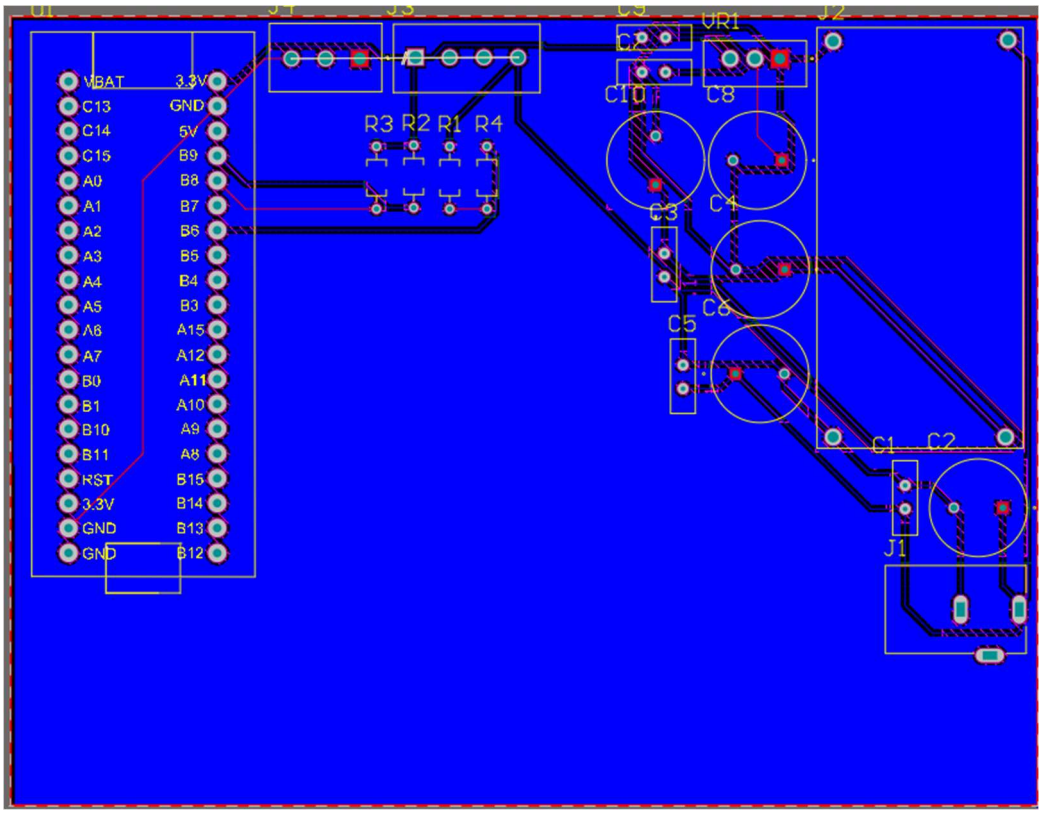
Bu devre yapısı, mikrodenetleyici ve sensörün ayrı güç hatlarından beslenmesini sağlayarak sinyal gürültüsünü azaltır.



Şekil 3. Devrenin Şematik Tasarımı.

PCB Tasarımı

Devrenin PCB tasarımı Altium Designer yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarımda servo motorun yüksek akım hattı için geniş yollar kullanılmış, dijital bileşenlerin bulunduğu kısımda ise GND düzlemi oluşturulmuştur. Tüm bağlantılar, sinyal bütünlüğünü koruyacak şekilde yönlendirilmiştir.



Şekil 4. Devrenin PCB Tasarımı.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, düşük maliyetli bileşenlerle PID tabanlı tek eksenli bir açısal dengeleme sistemi tasarlanmış ve simülasyon ortamında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin hızlı ve kararlı bir şekilde dengeye ulaştığını göstermektedir.

Sistemde kullanılan LM2596 ve LM2576T regülatörleri sayesinde hem servo motor hem de mikrodenetleyici için kararlı besleme sağlanmıştır. PID kazançlarının uygun seçilmesi, servo motorun ani hareketlerinde titreşimsiz tepki elde edilmesini sağlamıştır.

İlerleyen çalışmalarda sistemin donanım üretimi tamamlanarak gerçek zamanlı testlerinin yapılması, çift eksenli kontrol yapısına geçilmesi ve adaptif PID algoritmalarının eklenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Harun Eroğlu – Comparative Analysis of PI, LQR and Gain Scheduled Super Twisting Sliding Mode Controllers for Gimbal Systems – 2023

[2] Murat Şahin – Kendinden Ayarlamalı PID Kontrolör ile İki Eksenli Gimbal Uygulaması – 2015

[3] Bindu R., Mini K. Namboothiripad – Tuning of PID Controller for DC Servo Motor using Genetic Algorithm – 2012

[4] Arturo Y. Jaen-Cuellar, Rene de J. Romero-Troncoso, Roque A. Osornio-Rios – PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems – 2013

[5] Karam M. Elbayomy, Jiao Zongxia, Zhang Huaqing – PID Controller Optimization by GA and Its Performances on the Electro-hydraulic Servo Control System – 2008

[6] Anonymous – Design and Implementation of Servo Motor Speed Control System Based on STM32 – 2013

[7] Muhammed Alizada – Top ve Çubuk Sisteminin Kayma Kipli, PID ve Bulanık PID Kontrolüyle Gerçeklenmesi – 2024

[8] Öznur Şengül – Asılı Sarkaç Sisteminin PID ve Bulanık PID Kontrolcüleri ile Konum Kontrolü – 2023

[9] Efe Fazlıoğlu – Learning Based Control Compensation for Multi-Axis Gimbal Systems – 2021

[10] Erhan Poyrazoğlu – Two-Axis Gimbal System Control Using Adaptive PID Controller – 2020

[11] Damla Leblebicioğlu – Learning Based Control Compensation for Gimbal Systems – 2021

[12] Hasan Doğan – PID Tabanlı İki Eksenli Gimbal Kontrolü Tasarımı – 2018

[13] Muhammed Talha Korkmaz – Gimbal Sistemlerinde Bulanık PID Tabanlı Konum Kontrolü – 2019

[14] Huseyin Murat Aksay – Elektrikli Bir Aracın PID ve Model Referans Adaptif Kontrol Yöntemleri ile Hız Kontrolünün İncelenmesi – 2025

[15] Gülçhan Taşlıcalan, Orhan Akay – İki Tekerlekli Denge Robotunun PID ile Kontrolü – 2022

[16] Furkan Peçe, Eser Yarar, Sedat Karabay – PID ve Bulanık Mantık Kontrol Sistemleri ile İki Tekerlekli Kendini Dengeleyebilen Robotik Sistem Tasarımı – 2020

[17] Ali Rezaei – Design of a Single-Axis Stabilization Platform Using PID Controller – 2020

[18] Hassan Ali, M. Tariq – Implementation of PID Based Angular Stabilization for IMU Controlled Servo System – 2019

[19] R. Patel, S. Singh – Real-Time Control of Servo Motor Using Complementary Filter and PID Algorithm – 2021

[20] Yasin Güneş, İsmail Kocabaş – PID Denetleyici ile Tek Serbestlik Dereceli Sarkaç Sisteminin Kontrolü – 2017

OTOMATİK PARK ÖZELLİKLİ ARAÇ

Zeliha DEĞER[1*]

[1] Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

[*](zelihadeger@hotmail.com)

0009-0003-5720-7790

Özet – Günümüzün yoğun şehir trafiği ve dar park alanları, park etme zorluğunu artırmakta ve kaza riskini yükseltmektedir. Bu proje, bu problemlere yönelik düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir çözüm prototipi geliştirmeyi hedeflemektedir.

Tasarlanan sistem, küçük ölçekli bir araç için, öndeki bir engel veya duvara 10 cm mesafede otomatik olarak duracak şekilde tasarlanmış bir elektronik kontrol sistemidir. Sistemin temelinde bir mikrodenetleyici kartı (Arduino Nano) bulunmaktadır. Bu mikrodenetleyici, araç engele yaklaştıkça mesafeyi ölçen bir ultrasonik sensör (HC-SR04) verilerini sürekli olarak işler.

Yazılım mantığı basittir: Ölçülen mesafe 10 cm'den büyük olduğu sürece araç ileri hareket eder; mesafe bu eşik değere ulaştığında veya daha az olduğunda, kontrol sistemi motor sürücü kartı (TB6612FNG) aracılığıyla motorları durdurarak park işlemini tamamlar. Bu yaklaşım, sürücüsüz veya uzaktan kontrollü küçük araçlarda güvenli durma sağlayarak temel bir akıllı park mantığı oluşturur. Proje, maliyetli ve karmaşık sistemlerin aksine; minimum sensör, basit yazılım, düşük güç tüketimi ve kolay üretilebilirlik özellikleriyle öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Ultrasonik Sensör, Otomatik Park, DC Motor Kontrolü , Arduino Nano

GİRİŞ

Otomatik park eden araçlar gittikçe günlük hayatın vazgeçilmezi haline gelmektedir. Bunun nedenlerinden birisi artan nüfus ile orantılı olarak artan araç sayısı ile kısıtlı bir park alanında park etme işleminin daha yüksek düzeyde beceri gerektirmesidir [1]. Diğer bir neden ise sürüş güvenliğidir. Çok sayıda kaza araçların park edilmesi veya geri geri gitmesi sırasında meydana gelir [1]. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre 2024 yılında Türkiye'de gerçekleşen trafik kazalarının en az 1048 tanesi park aşaması kaynaklıdır [2]. Otomatik park sistemleri sürüş güvenliğini artırır [1].

Otomatik park sistemlerinde yaygın olarak kullanılan teknolojilerden birisi ultrasonik sensörlerdir. Ultrasonik sensörler aracılığıyla park; bir araç park pozisyonuna geçtiğinde kontrol sisteminin ultrasonik sensörlerden gelen sinyalleri algılayıp park yeri hakkında bilgi edinmesi ve ilgili çevrenin haritasının çıkarılması aracılığıyla gerçekleşir [1].

Bu projede de ultrasonik sensör kullanımı ile sabit bir mesafeye (10 cm) otomatik park gerçekleştirebilen bir araç yapılması hedeflenmektedir.

LİTERATÜR TARAMASI

Mevcut manuel park sistemleri, acil çözümler gerektiren zorluklara ve verimsizliğe sahiptir. Bu sorunların üstesinden gelmek ve modernizasyonu benimsemek için çeşitli akıllı park uygulamaları ve teknolojileri geliştirilmiştir. Bu uygulamalar, park etmede devrim yaratmayı ve genel kullanıcı deneyimini iyileştirmeyi amaçlamaktadır [3].

Park yönetimindeki önemli gelişmelerden biri, otomatik park sistemlerinin kullanıma sunulmasıdır. Bu sistemlerin geleneksel yöntemlerden önemli ölçüde daha verimli olduğu kanıtlanmıştır. Geleneksel yaklaşımlar, artan araç sayısının getirdiği çağdaş zorlukları ele almada önemli sınırlamalar gösterdiğinden, otomasyonun park sistemlerine entegrasyonu gerekli hale gelmiştir [4].

Otomatik park sistemleri geçmişten günümüze farklı şekillerde sunulmuştur. Bu örneklerden birisinde dört kameraya dayalı bir park asistan sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde aracın etrafındaki gerçek zamanlı veriler geniş

açılı kameralar tarafından yakalanıp ortamın üç boyutlu görüntüleri görsel algılama sistemi tarafından bir platforma dönüştürülmüş ve bu da sürücülerin araçlarını gerçek zamanlı izleyerek park etmelerine yardımcı olmuştur. [1]

Demirli ve Khoshnejad tarafından yapılan çalışmada [5]; otomatik paralel park işlemi, araba benzeri robotlar için bulanık sinir ağı sensör tabanlı kontrol yaklaşımı ile sunulmuştur. Bu yaklaşımda park alanı boyutunun ölçülemez olduğu kabulü üzerinde durularak, denetleyiciye sensörlerden gelen bilgilere göre hareket yönüne karar verebilmesi öğretilmiştir [6].

Gomez-Bravo ve ekibi holonomik olmayan tekerlekli araçların hem paralel hem de çapraz olarak park etme sistemleri üzerine yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Çarpışmayı önlemek amacıyla bazı kısıtlamalar kullanarak, park işlemini çok sayıda manevra ile yapmak yerine tek seferde park etme işlemi üzerinde durmuşlardır. Bu işlem için park yerinin yeteri kadar büyük olması çalışmanın zayıf yönü olarak öne çıkmaktadır [7].

Zhao ve Collins yaptıkları çalışmada [8], bulanık mantık ile dar alanlarda otomatik park etmek için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde manevra işlemi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyicisi için üyelik fonksiyonları ve ölçekleme faktörlerinin belirlenmesinde genetik algoritma kullanılmıştır. Oluşturulan algoritma "ATRV-Jr" isimli robota entegre edilmiştir.

Lee ve ekibi, araba benzeri robotların park etmesi için belirli girdiler için matematiksel denklemlerle belirli çıktılar üretme yöntemini sunmuşlardır. Çalışmada kinematik model ile ilgilenilerek, belirli kısıtlar altında denetleyici tasarlamışlardır [9].

Gupta, çalışmasında [10] park işleminden önce aracın duruş açısına ve park alanının büyüklüğüne göre araç kinematiğini kullanarak otomatik park işlemini sağlamaya çalışmıştır. Sensörlerden alınan verilere göre farklı durumlar tanımlamıştır.

Zengin, yaptığı çalışmada pürüzsüz bir zeminde, düz yüzeyli engellerin olduğu bir park yerini bulabilen ve park yerine uygun, paralel şekilde en az manevra ile park edebilen bir mobil araç geliştirmiştir [11].

Foss Company, 1992 yılında konsept aracı olan Volkswagen IRVW üzerinde otomatik park teknolojisini tanıtmıştır. IRVW, otomatik park etme işlemini gerçekleştirebiliyor, sürücüler ise sistemi otomatik olarak çalıştırarak tüm park sürecini tamamlayabiliyordu. Ancak Volkswagen, bu donanımı seri üretim araçlarında kullanmamıştır.

Bunun yanı sıra BMW de bir uzaktan park sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, sürücülerin aracı istedikleri park alanına kadar sürüp araçtan indikten sonra bir kontrol paneli ve uzaktan kumanda yardımıyla aracı park yerine yerleştirmelerine olanak tanımıştır. Ancak bu sistem de piyasaya sunulmamıştır.

Toyota ise 2003 yılında Japonya versiyonu hibrit aracı Prius için “Akıllı Park Yardım Sistemi” (Intelligent Parking Assist System) adını verdiği otomatik park seçeneğini sunmaya başlamıştır. Ayrıca bu hibrit araçlar, otomatik park özelliğine sahip ilk seri üretim araçlar olarak kabul edilmektedir. Güvenlik amacıyla Prius’un otomatik park yardım sistemi yalnızca direksiyonu kontrol etmektedir; sürücünün hızı kontrol etmek için gaz ve fren pedallarına basması gerekmektedir [12].

Citroen tarafından 2005 yılında Sina C3 modeline City Park park sistemi monte edilmiştir. Sistem paralel park için kullanılmıştır. Bu sistem park hızının 25 km/s'nin altında olmasını gerektiriyordu. Ön ve arka tamponlardaki üç adet ultrasonik sensör, mesafeyi algılayıp uzunlamasına park alanını hesaplamayı sağlamıştır. Sistem, park alanı yeterli olmadığında sesli ikaz vererek sürücüyü uyarma üzerine, park alanı yeterli olduğunda ise geri vitese takılma üzerine tasarlanmıştır. Direksiyon otomatik olarak kontrol edilerek ve araç ileri geri hareket ederek park pozisyonunun tamamlanması sağlanmıştır [1].

Diğer bir otomatik park sağlayan sistem ise ajan (otonom yazılım birimi) tabanlı sistemlerdir. Uzman sistemler veya ajan tabanlı teknolojiler, dağıtık ve karmaşık trafik ortamlarında ortaya çıkan problemleri çözebilmektedir [13]. Bir ajanın; özerklik, tepkisellik, uyarlanabilirlik, proaktiflik ve sosyal etkileşim gibi yararlı özellikleri vardır. Bu özellikler, yüksek derecede dinamik ve etkileşimli davranışlar sergileyen problemlerin çözümünde kullanılabilmektedir [14]. Çoklu Ajan Sistemi (Multi-Agent System), bir modelleme tekniğidir. Bu teknik, zeka, özerklik ve birbirleriyle ya da çevreyle belirli bir etkileşim derecesine sahip unsurlardan oluşan sistemlerin temsilinde

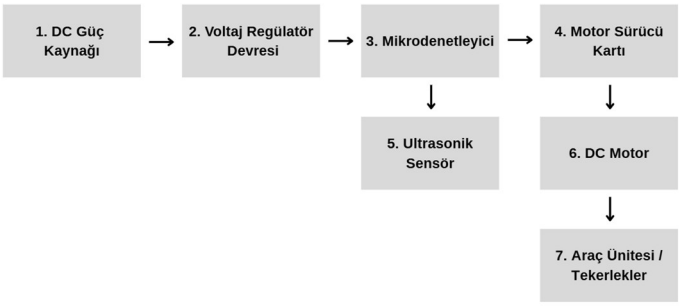
kullanılmaktadır [15]. Mobil ajanlar, bir ağın düğümleri arasında hareket edebilen ve çalışma zamanında dinamik olarak oluşturulan yazılım varlıklarıdır. Bu ajanlar, güncel kod ve algoritmalarla farklı görevleri yerine getirmek üzere hedef sistemlere gönderilir. Mobil ajanlar, ağ üzerindeki veri iletimini azaltarak sistemin esnekliğini, uyarlanabilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır [16].

Ultrasonik sensörler ile otomatik park üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada ölçüm hataları, aracın direksiyon açısı ve hızı, çarpışma önleme ve geri geri sürüş sürecindeki çevresel koşullar dikkate alınarak araç öncelikle uygun bir başlangıç konumuna park edilmiştir. Ardından direksiyon açısı ve araç hızı için tasarlanan kontrol sistemi ile araç park alanına yönlendirilmiştir. Ancak park alanının boyut kısıtlamaları ve çeşitli ölçüm hataları nedeniyle aracın tek bir işlemde park noktasına ulaşmasında zorlanılmıştır [17].

Mikrodenetleyiciler de araç kontrolü ve trafik yönetimi için çeşitli akıllı sistemlerde kullanılmaktadır. [18, 19, 20 ve 21].

MATERYAL VE METOT

Görsel 1'de bu projenin blok şeması yer almaktadır.



Görsel 1.

1.1 'de yer alan DC güç kaynağı bölümünde, bu projede devre elemanlarının enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla 6 adet AA pil kullanılacaktır. Projede 6 adet AA pil kullanılmasının nedeni, sistemin gerekli voltajı ve motorların ihtiyaç duyduğu akımı sağlayabilmesidir. Her bir AA pil 1.5 V gerilim verdiğinden seri bağlantı ile toplam 9 V elde edilecektir. Bu gerilim, motor sürücü TB6612FNG ve motorların çalışma aralığına uygundur. Arduino Nano ise 5 V ile çalıştığı için 9V voltaj LM2596 voltaj regülatörü aracılığıyla 5 V'a düşürülecektir. Kullanılacak olan motorlar boşta iken yaklaşık 100–200 mA, normal yük altında 300–500 mA ve sıkışma (stall) durumunda 1 A'e kadar akım çekebilmektedir. İki motor birlikte çalıştığında toplam akım ihtiyacı 2A seviyesine çıkması mümkündür. AA piller yaklaşık 2000 mAh kapasiteye sahip olup seri bağlandıklarında yaklaşık 9V / 2000 mAh özelliklerinde bir kaynak elde edilmektedir. 1 adet 9V pil kullanılmamasının nedeni 9V tekli pillerin kapasitelerinin yaklaşık 400–600 mAh olması ve maksimum verebildikleri akım değerlerinin yaklaşık 150–200 mA olmasıdır. Motorlar yük altında çalışırken 500 mA – 1 A arası akım çekebildiğinden 1 adet 9V pilin sistemin kararsız çalışmasına yol açabileceği göz önünde bulundurulmuştur.

1.2'de LM2596 step-down (buck) tipi voltaj regülatörü kullanılacaktır. LM2596, giriş gerilimini daha düşük ve kararlı bir DC çıkış gerilimine dönüştürebilen anahtarlamalı regülatör yapısındadır. 3 A'e kadar sürekli çıkış akımı sağlayabilmekte olup, 4.5 V–40 V arasında giriş gerilimini kabul etmektedir. Bu projede 6 adet AA pil ile elde edilen yaklaşık 9 V giriş gerilimi, LM2596 modülü ile 5 V'a düşürülerek Arduino Nano, ultrasonik sensör (HC-SR04) ve TB6612FNG motor sürücüsünün lojik kısmı için kararlı bir besleme sağlanmıştır. Lineer regülatörlere kıyasla daha yüksek verimle çalışmaktadır, dolayısıyla projede kullanılarak devrenin daha az ısınması amaçlanmaktadır. Regülatör çıkışında bulunan potansiyometre sayesinde hassas voltaj ayarı yapılabilir, giriş ve çıkış kısımlarında bulunan 100 µF elektrolitik kondansatörler ile 100 nF seramik kondansatörler, regülatörün ani akım değişimlerinde gerilim düşümü yaşamamasını sağlamaktadır.

1.3'de mikrodenetleyici kartı olarak kullanım kolaylığı, kaynak çeşitliliği, düşük maliyeti göz önünde bulundurularak Arduino Nano kullanılacaktır. Arduino Nano üzerinde ATmega328P mikrodenetleyicisi bulunmaktadır. Bu mikrodenetleyici 16 MHz saat frekansında çalışmakta, 32 KB Flash hafıza (2 KB'i bootloader tarafından kullanılmaktadır), 2 KB SRAM ve 1 KB EEPROM hafıza barındırmaktadır. Çalışma gerilimi 5V olupt, USB üzerinden ya da 6–20V arasında harici VIN girişiyle beslenebilmektedir. Kartta toplam 22 adet giriş/çıkış pini bulunmakta olup, bunların 14 tanesi dijital I/O pini şeklindedir ve bu pinlerden 6 tanesi PWM çıkışı verebilmektedir. Ayrıca 8 adet analog giriş pini (A0–A7) bulunmaktadır ve 10-bit ADC çözünürlüğü ile analog sinyallerin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Her bir pin en fazla 40 mA akım verebilmekte veya çekebilmektedir. UART, I2C, SPI protokollerini desteklemektedir. Bu projede Arduino Nano, HC-SR04 ultrasonik sensörden alınan mesafe verilerini işleyerek, belirlenen eşik değerine göre TB6612FNG motor sürücü kartına sinyal göndererek motorların çalışmasını kontrol edecektir.

1.4'de mikrodenetleyiciden gelen komutlara göre DC motor sürme işlemini gerçekleştirmek için TB6612FNG motor sürücü kartı kullanılacaktır. Kartta bulunan TB6612FNG, Toshiba tarafından geliştirilmiş çift kanallı H-köprüsü yapısına sahip bir motor sürücü entegresidir ve bu sayede iki adet DC motorun aynı anda, birbirinden bağımsız olarak ileri-geri yönde döndürülmesine ve hızlarının PWM sinyali ile ayarlanmasına olanak tanımaktadır. Motor besleme gerilimi (VM) 4.5 V – 13.5 V aralığındadır. Lojik besleme gerilimi (VCC) ise 2.7 V – 5.5 V aralığındadır. Bu projede VCC pini 5V Arduino çıkışına, VM pini ise pillerden gelen motor besleme hattına bağlanacaktır. Her motor kanalı için sürekli çıkış akımı 1.2 A, kısa süreli anlık maksimum çıkış akımı ise 3.2 A'dır. Bu değerler, 6V 150 RPM redüktörlü DC motorların yük altındaki akım çekişine (200–800 mA arası) uygundur.

1.5'de aracın engele ne kadar yaklaştığını ölçebilmek ve mikrodenetleyiciye bu bilgiyi aktarabilmek için HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörü kullanılacaktır. HC-SR04, ses dalgalarının yankılanma süresine göre mesafe hesaplaması yapan bir sensördür. Sensör üzerinde "Trigger" ve "Echo" olmak üzere iki ana kontrol pini bulunmaktadır; Trigger pini üzerinden kısa süreli bir tetikleme darbesi gönderilerek Echo pini üzerinden yankı süresi ölçülüp mesafe hesaplanmaktadır. Çalışma prensibi, ses dalgalarının gidiş-dönüş süresinin ölçülmesi ve bu sürenin mesafeye dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Sensörün çalışma gerilimi 5V'tur. Ölçüm aralığı 2 cm – 400 cm arasında olup, tipik ölçüm hassasiyeti ±3 mm'dir. Çalışma akımı yaklaşık 15 mA'dir.

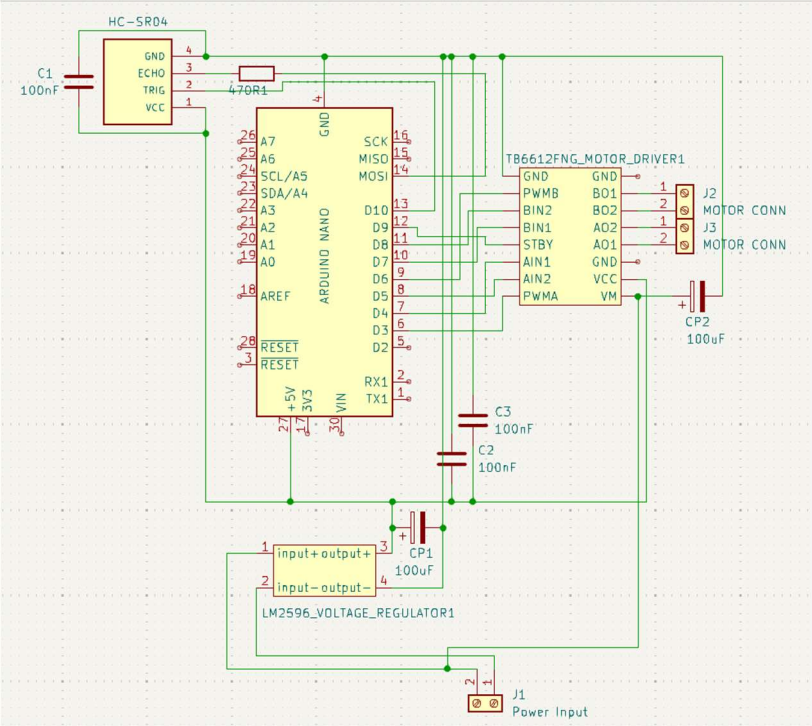
1.6'da motor sürücü kartı ile kontrolü sağlanacak olan, aracın durma / çalışmasını sağlayacak motor olarak 2 adet 6V 12mm 150 RPM redüktörlü mikro DC motor kullanılacaktır. Bu motorlar, küçük boyutları ve redüktörlü yapısı sayesinde düşük hızda yüksek tork üretebilmektedir. Motor, 6V DC gerilim ile çalışmakta olup tipik akım değeri 100 – 200 mA arasındadır. Yük altında maksimum akım 800 mA'e kadar çıkabilmektedir. Boşta çalışma hızı 150 RPM, tork değeri ise yaklaşık 0.3 kg·cm'dir. Motor seçimi yapılırken park mesafesi göz önünde bulundurularak gerekli hassasiyetin sağlanmasına uygun seçim yapılmıştır.

1.7'de ise aracın hareketini sağlamak ve elektronik devrenin yerleşimine uygun olacak bir 2 tekerlekli şasi kiti kullanılacaktır.

Şemada yer almayan ancak devrede kullanılan diğer bileşenler şu şekildedir: HC-SR04 ultrasonik sensör ile Arduino Nano arasındaki veri hattını korumak amacıyla, Echo pini ile Arduino dijital giriş pini arasına seri olarak 470 Ω direnç bağlanacaktır. Bu direnç, sensör kaynaklı bir arıza, ani voltaj yükselmesi veya geri besleme durumunda mikrodenetleyici pinine ulaşan akımı sınırlayarak koruma görevi üstlenmektedir. Devrede toplam 3 adet 100 nF seramik kondansatör kullanılacaktır. Bunlardan ilki, Arduino Nano'nun 5V beslemesi ile GND arasına bağlanarak yüksek frekanslı gürültülerin filtrelenmesini sağlayacaktır. İkincisi, TB6612FNG motor sürücüsünün lojik besleme hattı (VCC–GND) üzerine bağlanarak sürücü entegresinin kararlı çalışmasını sağlayacaktır. Üçüncü 100 nF kondansatör ise HC-SR04 sensörünün VCC ve GND pinleri arasına yerleştirilecek olup sensörün ani akım çekişlerinde gerilim düşümü oluşmasını engelleyerek daha stabil ölçüm yapılmasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca devrede 2 adet 100 µF 16V elektrolitik kondansatör kullanılacaktır. Bu kondansatörlerden biri, TB6612FNG motor sürücüsünün VM (motor beslemesi) ile GND hattı arasına bağlanarak motorların çalışması sırasında oluşan gürültülerin filtrelemesini sağlayacaktır. Diğeri ise LM2596 voltaj regülatörünün çıkışına yerleştirilerek Arduino Nano ve diğer 5V bileşenlere giden gerilimin kararlı olmasını sağlayacaktır.

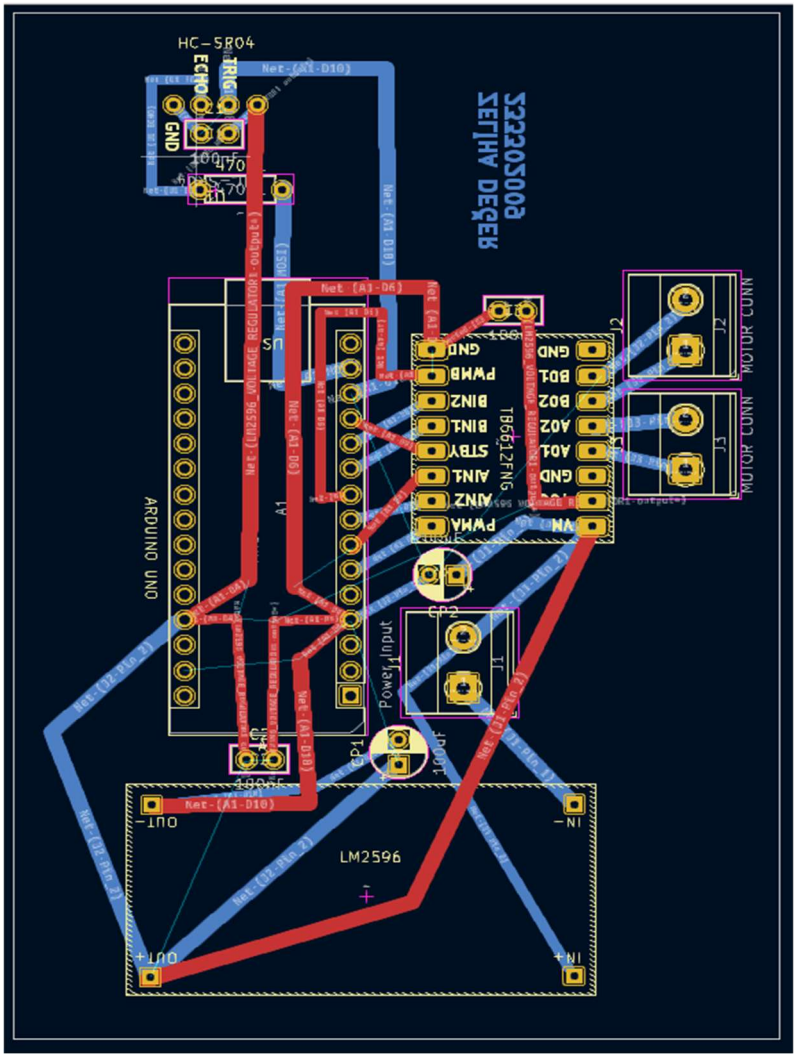
Proje Şematik ve PCB Görsel*leri*

Bu proje için oluşturulmuş şematik çizim (Görsel 2.1) yer almaktadır. Çizim KiCad 8.0 kullanarak yapılmıştır. Projede kullanılacak olan TB6612FNG motor sürücü modülü, LM2596 voltaj regülatör kartı ve HC-SR04 sensörü şematiklerine uygulama üzerinden erişilemediğildiğinden dolayı şematik çizimi yapılarak eklenmiştir.



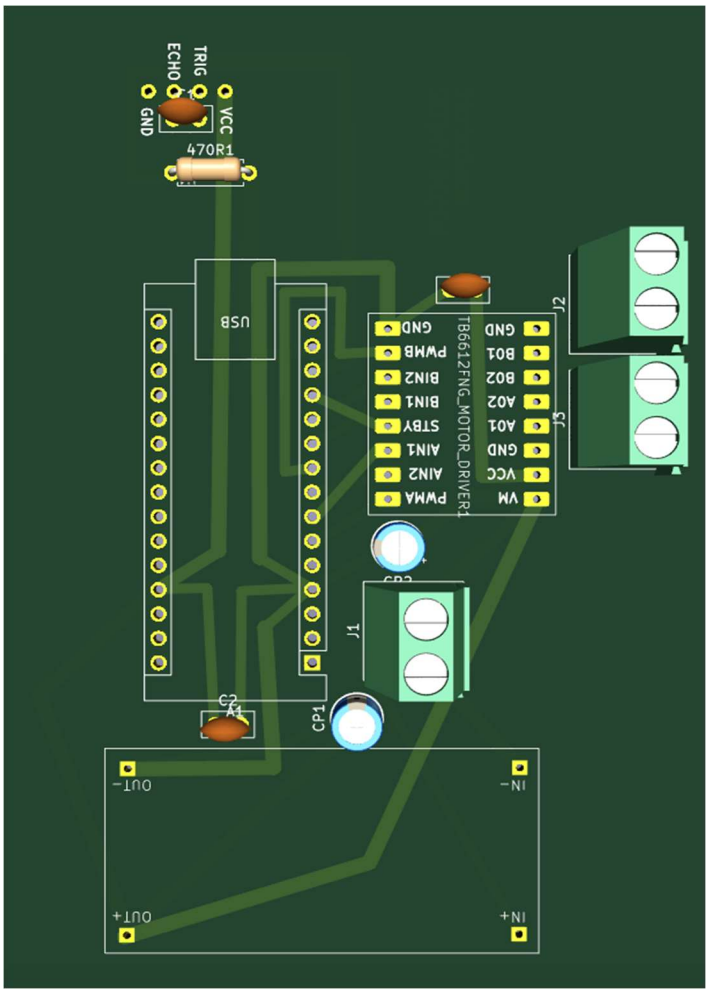
Görsel 2.1

Bu proje için oluşturulmuş PCB tasarımı (Görsel 2.2) yer almaktadır. Çizim KiCad 8.0 kullanarak yapılmıştır. Projede kullanılacak olan TB6612FNG motor sürücü modülü, LM2596 voltaj regülatör kartı ve HC-SR04 sensörünün ayak izlerine uygulama üzerinden erişilemediğildiğinden dolayı ilgili komponentlerinin gerçek boyutları göz önünde bulundurularak ayak izleri çizilmiş ve eklenmiştir. Proje çift katmanlı bir kart olarak hazırlanacak olup; ön yüz (kırmızı) arka yüz (mavi) yol çizimleri görselde yer almaktadır.

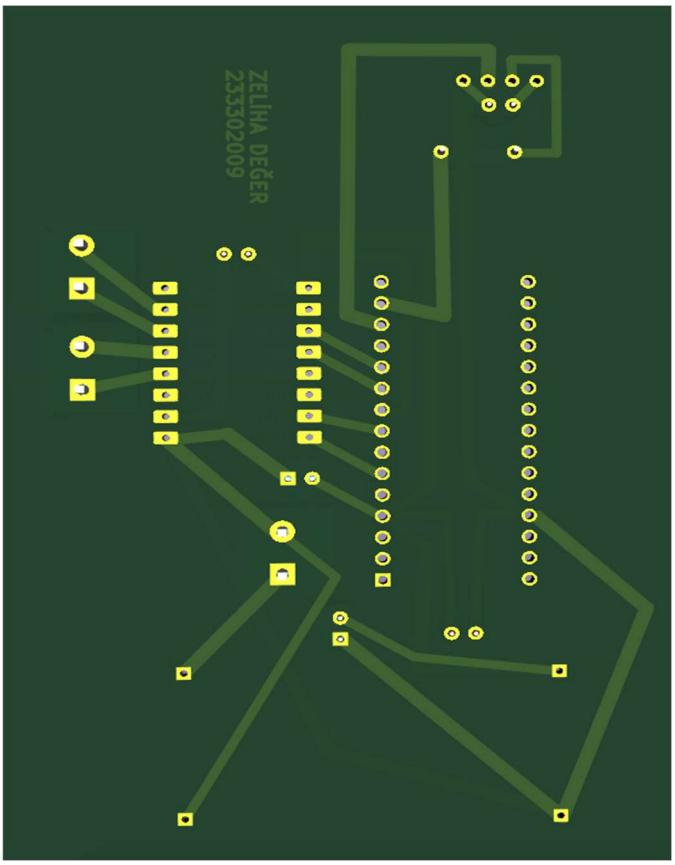


Görsel 2.2

Bu proje için oluşturulmuş tasarımın üç boyutlu görüntüleri (Görsel 2.3 ve Görsel 2.4) yer almaktadır. Çizim KiCad 8.0 ile oluşturulmuştur. Projede kullanılacak olan TB6612FNG motor sürücü modülü, LM2596 voltaj regülatör kartı ve HC-SR04 sensörünün üç boyutlu tasarımlarına erişilemediğildiğinden dolayı ilgili komponentlerinin gerçek boyutları göz önünde bulundurularak tasarımda ilgili pin aralıkları konumlandırılmıştır. Proje çift katmanlı bir kart olarak hazırlanacak olup; ön yüz ve arka yüz üç boyutlu görüntüleri yer almaktadır.


ECHO
TRIG
GND
VCC
470R1
USB
TB6612FNG_MOTOR_DRVER1
GND
PWMB
BIN2
BIN1
STBY
AIN1
AIN2
PWMA
VM
VCC
GND
A01
A02
B02
B01
GND
J2
J3
J1
C2
Cp1
OUT-
OUT+
IN-
IN+

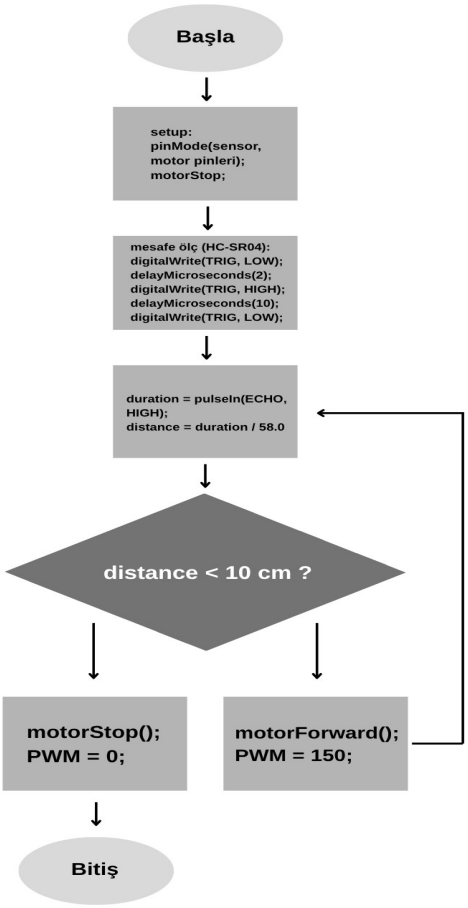
Görsel 2.3



Görsel 2.4

Proje Programlama Akış Şeması

Proje, Arduino Nano'nun programlanmasını gerektirmektedir. Bu programlama için Arduino IDE ile gerçekleştirilecektir. Görsel 2.5'de projeye uygun temel mantık ve döngüyü içeren kod akış diyagramı yer almaktadır.



Görsel 2.5

Öncelikle sensör ve motor pinleri tanımlanacaktır. İkinci adımda HC-SR04 ultrasonik sensöre trigger sinyali gönderilecektir. Bu sensör aracılığıyla mesafe ölçümü yapılacaktır. Eğer sonuç 10 cm'den küçükse motor sürücü kartı ile motorun durdurulması ve park işleminin tamamlanması sağlanacaktır. Ölçülen mesafe 10 cm'den daha büyükse motora ilerlemeye devam etmesi için gereken sinyal gönderilecektir. Bu aşamada mesafe ölçüm döngüsü sürekli tekrarlanacak olup, park için gerekli şartlar sağlanana kadar devam edecektir.

SONUÇ

Günümüzde özellikle yoğun şehir trafiği ve dar park alanları, sürücülerin manevra yapmasını zorlaştırmakta ve park kazalarını artırmaktadır. Bu projede, bu probleme yönelik düşük maliyetli, uygulanabilir bir çözüm prototip geliştirilmesi hedeflenmektedir. Tasarlanan sistem, öndeki engelle araç arasındaki mesafeyi sürekli olarak ölçerek 10 cm'ye ulaşıldığında aracı otomatik olarak durduracak şekilde çalışacaktır. Böylece sürücüsüz ya da uzaktan kontrollü küçük araçlarda güvenli durma sağlanarak temel bir akıllı park mantığı oluşturulacaktır.

Bu çalışma, maliyetli ve karmaşık park sistemlerinden farklı olarak; minimum sensör sayısı, basit yazılım mantığı, düşük güç tüketimi ve kolay üretilebilir yapısıyla ön plana çıkacaktır. Sonuç olarak, hem park problemlerine yönelik uygulanabilir bir çözüm sunacak olan hem de düşük maliyet, erişilebilirlik ve geliştirilebilirlik yönü bulunan bir proje gerçekleştirilecektir.

KAYNAKÇA

[1] Wang, Wenbo, et al. "Automatic parking of vehicles: A review of literatures." International Journal of Automotive Technology 15.6 (2014): 967-978.

[2] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2024 Yılı Trafik Kazalarına Ait Özet Bilgiler. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2024.

[3] Dogaroglu, B., Caliskanelli, S. P., & Tanyel, S. (2021). Comparison of intelligent parking guidance system and conventional system with regard to capacity utilisation. Sustainable Cities and Society, 74, 103152.

[4] Geng, Y., & Cassandras, C. G. (2013). New “smart parking” system based on resource allocation and reservations. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 14(3), 1129-1139.
[5] Demirli, K., & Khoshnejad, M., "Autonomous parallel parking of a car-like mobile robot by a neuro-fuzzy sensor-based controller", Fuzzy Sets and Systems, vol. 160(19),2009, pp.2876-2891.
[6] Yüzgeç, U., & Şahin, S. Uzaktan Kontrollü Otonom Park Edebilen Araç Remote Controlled Autonomous Self-Parking Car.
[7] Gómez-Bravo, F., Cuesta, F., & Ollero, A., "Parallel and diagonal parking in nonholonomic autonomous vehicles", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 14(4), 2001, pp. 419-434.
[8] Zhao, Y., & Collins, E. G., " Robust automatic parallel parking in tight spaces via fuzzy logic", Robotics and Autonomous Systems, vol. 51(2), 2005, pp.111-127.
[9] Lee, S., Kim, M., Youm, Y., & Chung, W., "Control of a car-like mobile robot for parking problem", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, vol. 1, pp. 1-6.
[10] Gupta, A., Divekar, R., & Agrawal, M., "Autonomous parallel parking system for Ackerman steering four wheelers", IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2010, pp. 1-6.
[11] Zengin E., "Otomatik park eden araba", Yıldız Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Lisans Bitirme Tezi, 2013.
[12] Wu, T. F., Tsai, P. S., Hu, N. T., & Chen, J. Y. (2016, November). Research and implementation of auto parking system based on ultrasonic sensors. In 2016 International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering (ICAMSE) (pp. 643-645). IEEE.
[13] S.Y. Chou, S.W. Lin, C.C. Li, “Dynamic Parking Negotiation And Guidance Using An Agent-Based Platform”, Expert Systems With Applications, vol. 35, no. 3, pp. 805-817, 2008.
[14] W. Longfei, C. Hong, L. Yang, "Integrating Mobile Agent with Multi-Agent System for Intelligent Parking Negotiation and Guidance”, 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp.1704-1707, 25-27 May 2009.
[15] R.J.F. Rossetti, R.H. Bordinia, A.L.C Bazanna, S. Bampi, R. Liu, D.V. Vliet, ”Using DBI Agents To Improve Modeling In A Computer Scenario”, Transportation Research Part C, 10C(5, 6), pp 373–398, 2002 .
[16] B. Chen, H.C. Harry, J. Palen, “Integrating Mobile Agent Technology With Multi-Agent Systems For Distributed Traffic Detection And management Systems”, Transportation Research Part C.
[17] Paromtchik, I. E., & Laugier, C. (1996, September). Autonomous parallel parking of a nonholonomic vehicle. In Proceedings of Conference on Intelligent Vehicles (pp. 13-18). IEEE.
[18] Nayak, M., & Dass, A. K. (2023). GSM and Arduino based Smart Home Safety and Security System. Recent Trends in Information Technology and its Application, 6(1), 20-25.
[19] Nayak, M., Dass, A. K., & Kshatri, S. S. (2023). An AI-Based Efficient Model for the Classification of Traffic Signals Using Convolutional Neural Network. In Building Secure Business Models through Blockchain Technology: Tactics, Methods, Limitations, and Performance (pp. 20-35). IGI Global.
[20] Sahoo, M. K., Dash, A. K., Senapati, S. K., Pavani, B., Deepak, P., Dash, S., & Akshaykumar, G. (2023). IoT-Based Traffic and Router Management System for Drivers. Intelligent Technologies for Sensors: Applications, Design, and Optimization for a Smart World, 19.
[21] Mishra, A., Sahu, A., Dass, A. K., & Nayak, M. Automatic Car Parking Assistance using Arduino.

0-50V 0-10A AYARLANABILIR GÜÇ KAYNAĞI TASARIMI

Talha Berke Köseler, Faruk Akkaya
Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya
(233312003@ogr.selcuk.edu.tr),(233312008@ogr.selcuk.edu.tr)

Özet - Bu makale, laboratuvar ortamlarında kullanılan elektronik devrelerin gereksinim duyduğu doğru akımın güvenilir ve kararlı biçimde sağlanabilmesi amacıyla 0–50 V aralığında ve 10 A'e kadar çıkış verebilen ayarlanabilir bir DC güç kaynağının tasarımını ve gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Tasarımda LM317 ayarlanabilir regülatörü ve TIP3055 güç transistörleri ile lineer regülasyon yapısı kullanılmış, LC filtre ile çıkış kararlılığı artırılmış ve INA219 sensörü aracılığıyla akım-gerilim ölçümleri dijital olarak izlenmiştir. Devre, Proteus ortamında simüle edildikten sonra prototip olarak uygulanacak ve çeşitli gerilim-yük koşullarında test edilecektir. Elde edilen sonuçlar, sistemin düşük dalgalanmalı ve stabil bir DC çıkış sağlayabildiğini, yüksek akım altında güvenli bir şekilde çalıştığını ve koruma elemanlarıyla (sigorta, soğutma, akım sınırlama) desteklendiğini gösterecektir. Bu yönüyle çalışma, düşük maliyetli ve laboratuvar uygulamalarında kullanılmaya uygun bir güç kaynağı prototipi ortaya koyarak lineer güç kaynağı tasarımlarına katkı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler – Ayarlanabilir güç kaynağı, lineer güç kaynağı, regülatör, transistor, LC filtre

GİRİŞ

Elektronik sistemlerin tasarımı, analizi ve doğrulanması sürecinde doğru akım (DC) güç kaynaklarının kararlılığı ve doğruluğu kritik öneme sahiptir. Laboratuvar ortamlarında yürütülen deneysel çalışmalar, farklı devrelerin gerektirdiği değişken gerilim ve akım değerlerinin hassas biçimde ayarlanabilmesini gerektirdiğinden, geniş çıkış aralığına sahip ayarlanabilir güç kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu tür güç kaynaklarında düşük dalgalanma, yüksek kararlılık, termal dayanım ve güvenlik mekanizmalarının bulunması temel performans ölçütleri arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, güç elektroniği alanında geliştirilen lineer ve anahtarlamalı güç dönüştürücü teknikleri, uygulamaya göre farklı avantajlar sunmakta olup, laboratuvar tipi uygulamalarda düşük gürültü seviyeleri nedeniyle lineer regülatör tabanlı yapılar hâlen yaygınlığını korumaktadır.

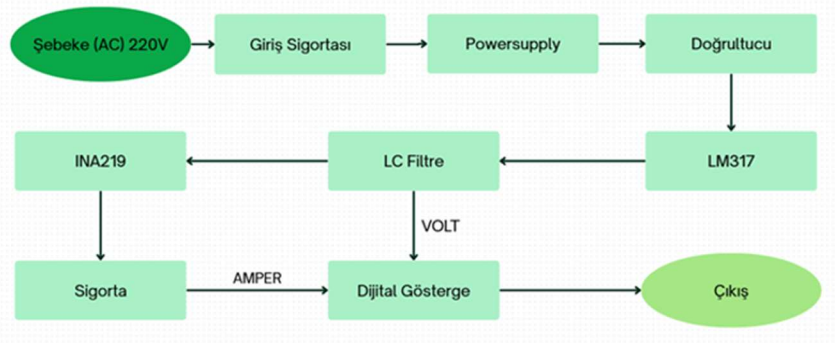
Benzer projelerde LM317, LM723 ve farklı güç transistörleri kullanılarak gerçekleştirilen çok sayıda lineer güç kaynağı tasarımı bulunmaktadır; bu çalışmalar genellikle çıkış kararlılığının artırılması, yüksek akım kapasitesinin sağlanması, dijital ölçüm ve koruma devrelerinin entegrasyonu gibi amaçlara yöneliktir. Buna karşın, geniş çıkış gerilim aralığı ile yüksek akım kapasitesinin bir arada sunulması maliyet, ısıl yönetim ve güvenlik açısından tasarım karmaşıklığını artırmaktadır. Bu çalışma, söz konusu gereksinimlere yanıt vermek amacıyla 0–50 V aralığında ve 10 A'e kadar ayarlanabilir çıkış sağlayabilen, lineer regülasyon temelli bir güç kaynağının tasarım, simülasyon ve prototip uygulamasını kapsamaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen sistemin performansı deneysel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer tasarımlarla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmada 0–50 V aralığında ve 10 A'e kadar ayarlanabilir çıkış sağlayabilen bir DC güç kaynağının tasarım ve uygulanması amacıyla hem donanımsal bileşenler hem de simülasyon araçları kullanılmıştır. Tasarım sürecinde temel güç dönüştürme yapısı olarak LM317 ayarlanabilir lineer regülatörü ve yüksek akım kapasitesi için TIP3055 güç transistörleri tercih edilmiş; doğrultma aşamasında köprü diyot ve büyük kapasiteli filtre kondansatörleri kullanılmıştır. Çıkış dalgalanmasını azaltmak amacıyla LC filtre yapısı, akım-gerilim ölçümlerinin dijital olarak izlenmesi için INA219 sensörü, güvenlik için AC ve DC hatlarında sigorta elemanları ve ısıl kararlılığın sağlanması için alüminyum soğutucu ve fan entegre edilmiştir. Devre tasarımı ve davranış analizi Proteus benzetim yazılımı

kullanılarak gerçekleştirilmiş, ardından fiziksel prototip oluşturulacak farklı gerilim ve yük koşullarında ölçümler alınacaktır. Elde edilen deneysel veriler, teorik hesaplamalar ve simülasyon çıktılarıyla karşılaştırılarak sistemin kararlılığı, dalgalanma performansı ve akım kapasitesi değerlendirilecektir. Bu yöntemsel yaklaşım, tasarlanan güç kaynağının hem fonksiyonel doğruluğunu hem de laboratuvar uygulamalarına uygunluğunu sistematik olarak ortaya koyacaktır.

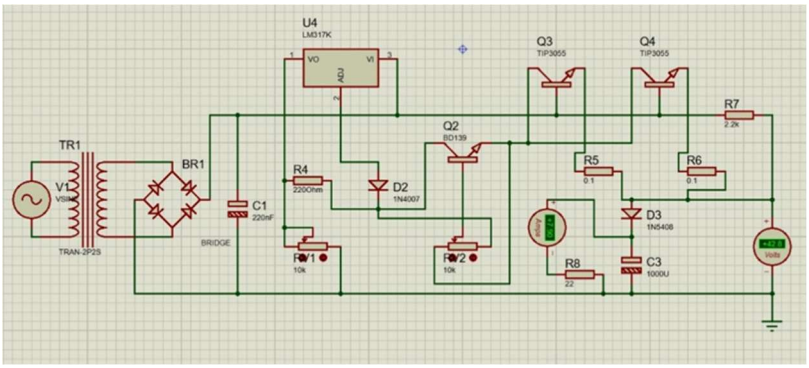
Devrenin deney düzeni Proteus'ta Şekil 2'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır.



Şekil 1. Sistemin blok şeması.

Sistem Tasarımı

Sistemin blok şeması; AC giriş, giriş sigortası, PSU, doğrultucu, LM317 regülatör katı, LC filtre, INA219 ölçüm modülü, çıkış terminalleri ve soğutma birimlerinden oluşmaktadır. Her bir katman gerilim kararlılığı, akım kontrolü ve güvenlik açısından önemli rol oynamaktadır. Devre tasarımı simülasyon ortamında Proteus kullanılarak doğrulanmıştır.

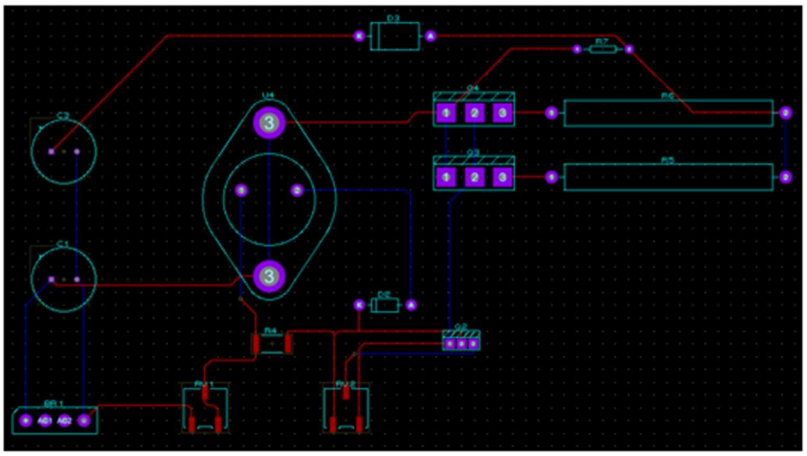


Şekil 2. Deney bağlantı şeması.

Devre, transformatör girişinden alınan AC gerilimi doğrultup filtreleyerek LM317 tabanlı bir kontrol katı ve TIP3055 güç transistörleri üzerinden yüksek akım verebilen ayarlanabilir bir DC güç kaynağı oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Devre, genel olarak **AC–DC dönüştürme**, **gerilim regülasyonu**, **akım güçlendirme** ve **çıkış filtresi** olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır.

AC – DC Dönüşüm

Devrenin sol tarafında yer alan **TR1 transformatörü**, şebeke gerilimini daha düşük seviyeye indirir. Ardından **BR1 köprü doğrultucu**, AC işaretini tam dalga doğrultma yöntemiyle DC'ye dönüştürür. Doğrultulan bu gerilim dalgalı bir DC olup, **C1 kondansatörü** ile yüksek frekanslı parazitler ve gerilim dalgalanmaları azaltılarak daha düzgün bir DC işaret elde edilir.



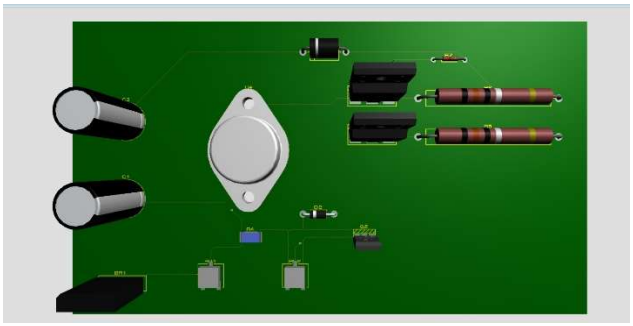
Şekil 3. Devre PCB şeması.

Gerilim Regülasyon Bölümü

Devrenin merkezinde bulunan U4 (LM317K), çıkış gerilimini ayarlayan temel regülatördür. LM317'nin ADJ ucuna bağlı R4, RV1, D2 ve Q2 (BD139) bileşenleri, regülatörün çıkışı kontrol eden geri besleme yolunu oluşturur.

- RV1, kullanıcı tarafından çıkış gerilimini ayarlamak için kullanılır.
- D2 diyotu, LM317 üzerindeki olası ters gerilimleri bastırarak regülatörü korur.
- BD139 (Q2) transistörü, LM317'nin akım sürme kapasitesini artıran bir ön-sürücü katı gibi davranarak güç transistörlerini kontrol eder.

Bu yapı sayesinde LM317 yalnızca kontrol seviyesinde akım taşırken, yüksek akım yükü TIP3055 transistörlerine aktarılır.



Şekil 4. Devrenin 3 Boyutlu görünümü.

Güç Transistörleri ve Yük Sürme Bölümü

Devrede Q3 ve Q4 (TIP3055) paralel bağlanarak yüksek akım kapasitesi elde edilmiştir. Her bir TIP3055'in emitöründe yer alan R5 ve R6 (0.1 Ω) dirençleri:

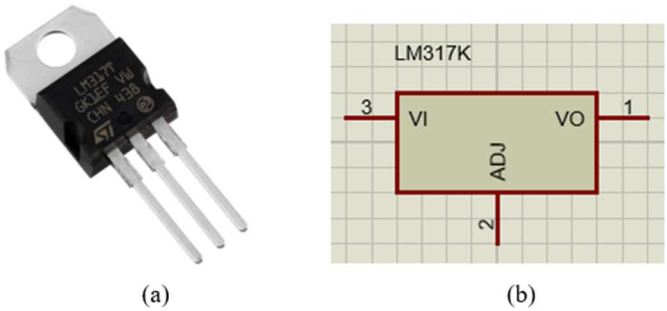
- Akım paylaşımını dengeler,
- Aşırı akım durumunda lokal gerilim düşüşü oluşturarak transistörlerin korunmasına katkı sağlar.

BD139 transistörü bu iki TIP3055'i sürerek çıkışa yüksek akım sağlayacak şekilde çalıştırır. Çıkış hattındaki R7 (2.2 kΩ) ve D3 (1N5408) bileşenleri daha çok dengeleme, koruma ve akım yönlendirme görevleri üstlenir.

Çıkış Filtresi ve Stabilizasyonu

Devrenin çıkışında bulunan C3 (1000 µF), yüksek akım altındaki gerilim dalgalanmalarını azaltarak çıkış DC sinyalini daha stabil hâle getirir.
R8 (22 Ω) ise ölçüm, yükleme veya koruma amaçlı düşük güçlü bir direnç olarak görev alır.

Sağ tarafta yer alan voltmetre, çıkışın anlık gerilim değerini göstermekte olup örnekte yaklaşık 42.8 V DC elde edildiği görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 5. (a) LM317 (b) LM317'nin proteus şema görünümü.

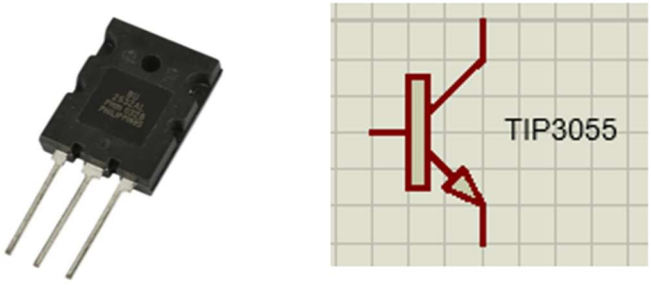
LM317

LM317,çıkışı ayarlanabilir bir doğrusal (linear) voltaj regülatörüdür. 1.25 V ile yaklaşık 37 V arasında ayarlanabilir çıkış gerilimi elde etmeyi sağlar. En önemli özelliği, çıkış gerilimini harici iki direnç ile belirlemesidir.

LM317, iç yapısında şu bileşenleri barındırır:

- Referans gerilim kaynağı (1.25 V)
- Hata yükselteci (error amplifier)
- Seri regülasyon transistörü
- Aşırı akım / aşırı sıcaklık koruma devreleri

Bu yapı sayesinde LM317, çıkış gerilimini sabit tutmak için giriş ve çıkış arasındaki farkı hata yükselteci aracılığıyla dinamik olarak ayarlar.



(a) (b)

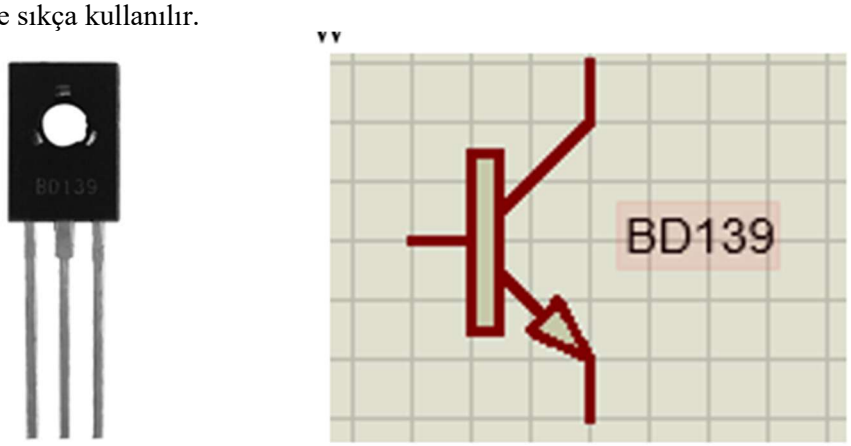
Şekil 6. (a) TIP3055 Transistör (b) TIP3055'in Proteus şema görünümü.

TIP3055

TIP3055, yüksek akım ve yüksek güç uygulamaları için üretilmiş NPN tip güç transistörüdür.
Temel özellikleri:

- Maksimum kolektör akımı: 15 A
- Maksimum kolektör-emiter gerilimi: 60–100 V (modele göre)
- Dağılma gücü: 90 W
- BJT (Bipolar Junction Transistor) sınıfındadır.

Bu değerler sayesinde TIP3055, yüksek akım gerektiren güç kaynakları, motor sürücüler, amplifikatörler ve endüstriyel güç devrelerinde sıkça kullanılır.



(a) (b)

Şekil 7. (a) BD139 Transistör (b) BD139'un Proteus şema görünümü.

BD139

BD139, bir kontrol akımıyla daha büyük bir akımı kontrol eden bir anahtar veya güç amplifikatörü olarak çalışır.

- Base'e küçük bir akım (Ib) uygulanır.
- Bu, collector ve emitter arasındaki daha büyük akımı (Ic) geçirmeye izin verir.
- Transistörün kazancı (hFE veya β) ile:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

formülüyle collector akımı, base akımına bağlıdır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada 0–50 V aralığında ayarlanabilir çıkış gerilimi ve 10 A'e kadar yük akımı sağlayabilen bir laboratuvar tipi doğrusal güç kaynağı tasarlanmış ve prototip olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin geniş gerilim aralığında kararlı ve düşük gürültülü bir DC çıkış üretebildiğini göstermektedir. Doğrultucu katı, LM317 tabanlı regülatör, LC filtre yapısı ve INA219 sensör birimi, literatürde belirtilen benzer tasarımlarla uyumlu performans sergilemiş ve laboratuvar uygulamaları için gerekli hassasiyeti sağlamıştır. Özellikle LC filtrenin kullanılması dalgalanmayı belirgin şekilde azaltmış, INA219 tabanlı ölçüm birimi ise dijital kontrollü güç kaynaklarının sunduğu ölçüm doğruluğunu ekonomik ve uygulanabilir bir şekilde sisteme entegre etmiştir. Bununla birlikte, lineer regülasyonun doğal bir sonucu olarak yüksek akım seviyelerinde ısı artışı gözlenmiş ve verimlilik kaybı ortaya çıkmıştır; bu durum literatürde lineer regülatörlerin bilinen bir sınırlılığı olarak sıkça vurgulanmaktadır.

Yapılan testler sonucunda cihazın kısa devre ve aşırı akım koşullarında güvenli şekilde çalıştığı, hem AC hem de DC tarafındaki koruma elemanlarının etkili olduğu görülmüştür. Geliştirilen prototipin düşük maliyetli bileşenlerle üretilebilir olması, sistemin eğitim, hobi elektroniği ve temel laboratuvar uygulamaları için uygun bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

Genel olarak çalışma, doğrusal regülatörün düşük gürültü ve kararlılık avantajlarını korurken geniş çıkış aralığı ve kullanıcı dostu izleme özellikleri sunan işlevsel bir güç kaynağı ortaya koymuştur. İlerleyen çalışmalarda, verimliliği artırmak amacıyla lineer regülatör öncesine anahtarlamalı bir ön regülatör eklenmesi, mikrodenetleyici tabanlı dijital kontrol yöntemlerinin kullanılması ve tam yük altında ısınmayı azaltacak soğutma çözümlerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Kim, D. Ch., Semenov, A. S., & Tatarinov, P. S. (2019). *The Linear Adjustable Power Supply*. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934398 Kim D.Ch; P.S. Tatarinov; A.S. Semenov https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8934398
- *Design of a DC Linear Power Supply with Adjustable Voltage*, Energy Procedia, Cilt 18, 2012, Sayfa 1313-1322, Elsevier. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.05.150 Haihong Huang [a], Xiaopeng Zheng [b], Yibing Wu [c], Zhicai Sheng https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379620306517
- Özlem Özden, Yankı Duru, Sinan Zengin, Mutlu Boztepe, *"Dijital Kontrollü Laboratuvar Güç Kaynağı Tasarımı,"* Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Vestel Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. https://www.emo.org.tr/ekler/2285bf915c83d06_ek.pdf
- Guo Jian, Zhang Hong, Zhang Li, *"Design of a DC Linear Power Supply with Adjustable Voltage,"* IERI Procedia, Cilt 3, ss. 73–80, Elsevier, 2012. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212667812002225
- Zhiqiang Cheng, Tao Lan, Yifei Xie, Jiaqi Fan, Huimin Liu, Zijuan Chen, Zengjia Wang, *Digitally Controlled Power Supply Design with Continuously Adjustable Input Voltage Based on UCD3138*, Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8816193
- Chia-Wei Huang, Jun-Yu Du, Wei-Tai Hsu, *Design of Adjustable Switching Power Supply with Current Type Single-Ended Flyback Output*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 644, 012012, 2019. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/644/1/012012/meta
- Fan Xue, *Design of High Precision and Adjustable Computerized Numerical Control Power Supply Chip Based on Low Noise Amplifier*, 2024 International Conference on Data Science and Network Security (ICDSNS). https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10691320
- Chia-Chou Yeh ve Madhav D. Manjrekar, "A Reconfigurable Uninterruptible Power Supply System for Multiple Power Quality Applications", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Cilt 22, Sayı 4, Temmuz 2007*. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4267789
- Gong Renxi, Wang Kuang, Meng Xiaobi, Xie lingling, Huang Yang ve Gong Wenying, "Design and Implementation of a Kind of Linear Stabilized Power Supplies with High Efficiency and Wide-Range Adjustable Output Voltage", *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, Mayıs 2009, s. 1652-1655. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5157656
- Wenguan Zhu, Xichang Cai, Xinming Zhang, Jiangrui Huang, Yichang Wang ve Yupeng Cheng, "Design of Portable Multiple Outputs Adjustable DC Power Supply", *2024 4th International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI)*, 2024. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10871548
- LIU Hong-bing, "Research and design of high precise adjustable power supply device", *International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015)*. https://www.atlantis-press.com/proceedings/asei-15/25836601

- Wenguang Chen, Xiaofeng Wang, Ke Tan, Tianyi Duan, Ruixuan Zhou, Pengcheng Zhang, *Design of pulsed DC magnetron sputtering power supply with adjustable igniting voltage*, Vacuum, Cilt 243, 2026, 114778. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114778
- Haihong Huang, Xiaopeng Zheng, Yibing Wu, Zhicai Sheng, *Design of high precision and high power bidirectional adjustable power supply*, Fusion Engineering and Design, Cilt 162, 2021, 112103. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112103
- Onuorah L. O., Nwozor K. K., *Instrumentation Geophysics: Design and Construction of a DC Variable Power Supply*, International Journal of Instrumentation Science, 3(2): 13-16, 2014. DOI: 10.5923/j.instrument.20140302.01
- Onur Küçük, *Yüksek Verimli Anahtarlamalı Güç Kaynağı*, Yüksek Lisans Tezi, Türk Hava Kurumu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ocak 2017
- Saif Ahmad, Sayed Mohammed Tasmimul Huda, H.M. Ragib Shahrear Alam. *"Adjustable DC Power Supply."* Khulna UNIVERSITY of Engineering & Technology, Department of Electronics & Communication Engineering, 2018.
- Rahman, Muhammad Muktadir & Barsoum, Nader N. "An Adjustable HVDC Power Supply using Integrated High Voltage Transformer with Some Protective & Controlling Features." International Journal of Energy Applications and Technologies, Vol. 3, No. 1, pp. 1–6, 2016.
- Akanksha Anand, Suhani Jindal, Tanya Jain. "Variable Power Supply." International Journal of Multidisciplinary Research and Technology, Vol. 4, Issue 6, 2023, pp. 21–25.
- Yueh-Ru Yang, "An Adjustable Linear Power Supply with a Phase-shift PWM Tracking Pre-regulator," The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2004), Busan, Korea, 2004.
- Khan, M. A. G., & Malek, M. A. (2023). *Design and Testing of a Simplified AC-AC-DC Power Supply Having Adjustable Output Voltage*. 6th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, Bangladesh. IEEE. DOI: 10.1109/EICT61409.2023.10427624

PWM-BASED SPEED CONTROL OF 24V/200-240W BRUSHED DC MOTOR: ARDUINO–HALL FEEDBACK AND LCD SPEED DISPLAY

Emirhan DEMİREL[1*], Emir Musa DEMİRAY[2*]

[1*] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2*] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[1]*emirhan_demirel_6799@hotmail.com

[2]* emirmusademiray@gmail.com

Abstract – In this study, a low-cost system has been designed that controls the speed of a 200-240W brushed DC motor and displays the speed in real-time on an LCD screen. The control system is based on a 20 kHz PWM (Pulse Width Modulation) signal generated by an Arduino UNO microcontroller. This generated signal switches a power stage, which includes an IR2101 MOSFET driver IC and an IRLZ44N N-MOSFET, to provide sufficient voltage and current to drive the motor. The motor's speed is measured via an A3144 Hall effect sensor that detects a magnetic part placed on the motor shaft. The Arduino processes the pulses from the sensor, calculates the speed in RPM (revolutions per minute), and presents this information to the user on an I2C-module 2x16 LCD screen. The design includes a Schottky diode to suppress the back EMF (Back Electromotive Force) generated by the inductive load and voltage regulators for stable supplies. This work presents a practical reference design for high-power DC motor control with a focus on education and prototyping.

Keywords – Brushed DC motor, PWM, Arduino, Hall effect sensor, MOSFET, MOSFET driver

GIRIŞ

Elektrik motorlarının hız kontrolü, endüstriyel otomasyon sistemleri, robotik platformlar ve elektrikli araçlar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kritik bir rol oynamaktadır. Motor hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesi; sistemin enerji verimliliğini artırmak, mekanik bileşenlerin ömrünü uzatmak ve sistem güvenilirliğini sağlamak açısından büyük önem taşır. Özellikle fırçalı DC motorlar, basit kontrol yapıları, kolay ayarlanabilmeleri ve yüksek kalkış torku sunmaları nedeniyle bu uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu doğrultuda, bir motor hız kontrol devresi tasarlamak hedeflenmiştir.

Çalışmamızın temel amacı; Arduino tarafından üretilen 20kHz frekanslı bir PWM sinyali ile bir N-MOSFET güç katını verimli bir şekilde süren, potansiyometre ile hızı ayarlayan, Hall Effect sensör ile hızı ölçen ve LCD ekranda gösteren düşük maliyetli ve güvenilir bir hız kontrol kartı tasarlamaktır.

DC motorlarda hız kontrolü için en yaygın ve verimli yöntem, motora uygulanan ortalama gerilimi değiştirmeye dayanan Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) tekniğidir. Arduino veya PIC gibi mikrodenetleyicilerin bu PWM sinyalini üretmek ve kontrol algoritmalarını uygulamak için kullanılması, yapılan çalışmalarda standart bir yaklaşım haline gelmiştir. Çeşitli çalışmalar, Arduino tabanlı sistemlerin MATLAB arayüzü [1] veya STM32 gibi daha gelişmiş işlemcilerle [2] PID ve bulanık mantık kullanarak motor hızını gerçek zamanlı ve başarılı bir şekilde denetleyebildiğini göstermiştir.

Ancak, 200-240W (24V, 8-10A) gibi yük altında yüksek akım gerektiren bir motorun sürülmesinde, mikrodenetleyicinin 5V'luk mantık seviyesindeki PWM çıkışı ile MOSFET güç katı arasında kritik bir uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Güç MOSFET'lerinin verimli çalışarak düşük bir iletim direncine (Rds(on)) ulaşabilmesi için Gate-Source (Vgs) geriliminin 10-12V seviyesinde olması gerekir. Arduino'nun 5V'luk çıkışı, MOSFET'i tam doyuma ulaştıramaz; bu da MOSFET'in lineer bölgede kalarak aşırı ısınmasına ve yüksek güç kaybına neden olur. Literatürde, mikrodenetleyici pininin MOSFET'i doğrudan sürmesi yerine harici bir gate driver kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır [3]. PIC tabanlı bir fırçasız motor sürücü tasarımında TC4427 sürücüsünün kullanıldığı bir çalışmadan [4] yola çıkarak, 5V PWM sinyalini 12V seviyesine yükseltmek ve MOSFET'in kapı kapasitansını hızlıca şarj/deşarj etmek için çalışmamızda IR2101 MOSFET sürücü entegresini kullanma kararı aldık.

Hız ölçümü ve kullanıcıya geri bildirim konusunda ise, geri besleme için Hall Effect sensörlerin veya enkoderlerin kullanılması ve hız bilgisinin bir LCD ekranda gösterilmesi yine literatürde sıkça rastlanan bir pratiktir. PIC

mikrodenetleyici ile yapılan bir hız kontrol çalışmasında da hızın LCD üzerinde gösterildiği görülmüştür [5]. Bu yaklaşımlar, projemizin geri besleme ve arayüz kısımlarını oluşturmak için temel alınmıştır.

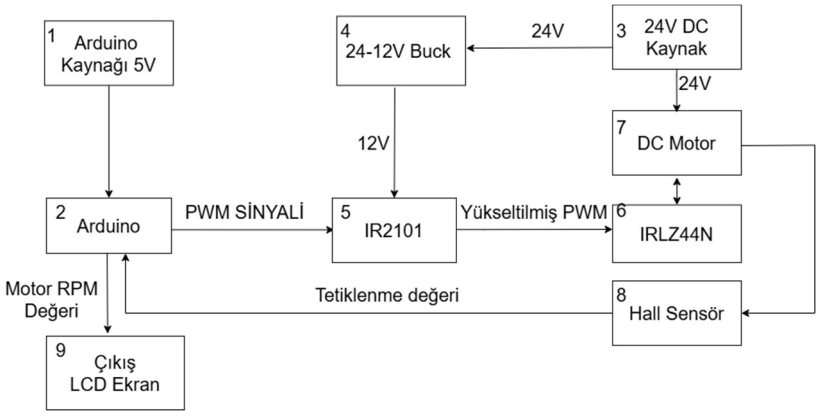
Geliştirilen bu sistem, düşük maliyetli bileşenlerle kurulmuş olması, modüler yapıda tasarlanması ve gerçek zamanlı hız izleme sağlaması nedeniyle, özellikle robotik, eğitim amaçlı mekatronik düzenekler ve endüstriyel prototipleme uygulamalarında kullanılabilecek pratik bir çözüm sunmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Fırçalı DC motorun hız kontrol karakteristiklerini analiz etmek ve değişken yükler altında kararlı çalışmayı sağlamak amacıyla kapsamlı bir kontrol devresi tasarlanmıştır. Sistem mimarisi, yüksek akımlı endüktif yüklerin düşük voltajlı mikrodenetleyicilerle sürülmesindeki spesifik zorlukları ele alacak şekilde geliştirilmiştir.

Sistem mimarisi; 200-240W fırçalı DC motor, özel tasarım motor hız kontrol devresi, Arduino UNO tabanlı kontrol ünitesi ve hız izleme için A3144 Hall Effect sensöründen oluşmaktadır. Sistem mimarisinde, kontrol mantığı (Arduino, LCD, sensör), motorun ve güç katının ürettiği elektriksel gürültüden izole etmek için harici bir 5V kaynaktan beslenmektedir. Güç katı (motor ve sürücü devresi) 24V DC ana güç kaynağından beslenmektedir. Ek olarak, IR2101 MOSFET sürücü entegresinin (Vcc) ihtiyaç duyduğu 12V beslemeyi sağlamak için 24V ana hat üzerine bir LM7812 voltaj regülatörü entegre edilmiştir.

Sistemin genel mimarisini gösteren sistemin blok şeması şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Sistemin blok şeması

Motor Hız Kontrolü Devresi

Kullanıcı girdisi, 10kOhm'luk bir lineer potansiyometre ile sağlanır. Bu potansiyometreden gelen 0-5V analog gerilim, merkezi kontrol ünitesi olan Arduino Uno tarafından okunur ve 20 kHz'lik yüksek frekanslı bir PWM sinyalinin görev döngüsü ayarlanır. Arduino'nun 5V'luk bu mantık seviyesi sinyali, 200W gücündeki kullanılması planlanan dc fırçalı motoru doğrudan süremez. Bu kritik gerilim uyumsuzluğunu aşmak için 5V PWM sinyali, öncelikle bir IR2101 kapı sürücüsüne gönderilir.

Bu sürücü entegresi, 24V ana hattan beslenen bir LM7812 voltaj regülatöründen aldığı kararlı 12V ile çalışır ve Arduino'dan gelen sinyali 12V seviyesine yükseltir. Yükseltilen bu 12V sinyal, motorun 8-10A'e varan yüksek akım taleplerini anahtarlamak için seçilen IRLZ44N N-Kanal MOSFET'i tam doyuma ulaştırır. Bu yöntem, MOSFET'in seçilme sebebi olan 22mOhm'luk düşük iletim direncinde (RDS(on)) çalışmasını sağlayarak iletim kayıplarını, gate kapasitesini hızlıca şarj ve deşarj ederek lineer bölgede kalma süresini azaltarak anahtarlama kayıplarını, aşırı ısınmayı ve güç kayıplarını engeller. IR2101 kapı entegresinin sürdüğü IRLZ44N Mosfeti de motoru sürer ve hız kontrolü tamamlanır. Son olarak, motorun endüktif yük karakteristiğinden dolayı MOSFET kesime gittiğinde oluşan negatif voltaj piklerine (Ters EMK) karşı MOSFET'i korumak amacıyla, motora paralel bir 20SQ045 Schottky diyot entegre edilmiştir.

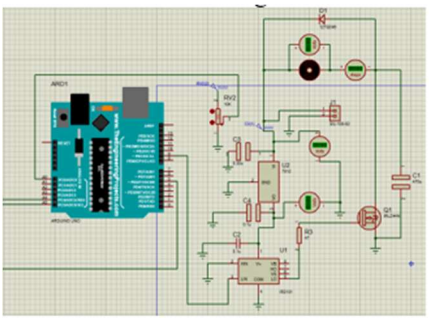
Kullanılması planlanan motorun özellikleri: 24V ile çalışan, 200W nominal güce, yaklaşık 8-10A zorlanma (stall) akımına ve 6000 RPM hıza sahip fırçalı DC motor. Motor şekil 2 ve 3' te gösterilmiştir.

Şekil 2,3: Kullanılması planlanan motor

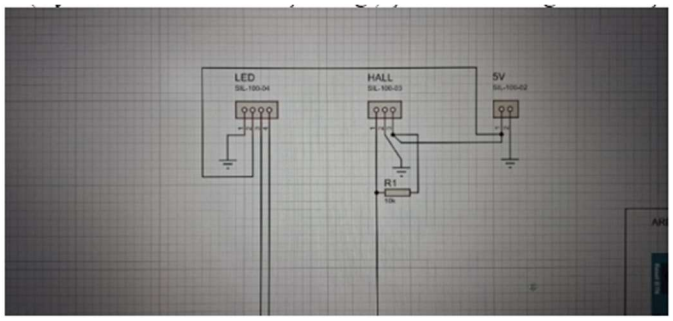
Hız Görüntüleme Devresi

Hız görüntüleme kısmı, kontrol döngüsünden hall effect sensörü sayesinde temassız şekilde ayrılarak bir izleme mekanizması olarak çalışır. Motor miline bağlanan bir mıknatıs ile motorun gerçek dönüş hızı, temassız bir A3144 Hall Effect sensörü tarafından algılanır. Bu sensörün ürettiği dijital darbeler Arduino Uno'nun bir kesme pini tarafından sayılır. Arduino, belirli bir zaman aralığındaki darbe sayısına göre motorun gerçek hızını RPM (devir/dakika) cinsinden hesaplar. Hesaplanan bu anlık hız verisi, kablolamayı basitleştirmek için bir I2C seri arayüz modülü kullanılan 2x16 karakterlik bir LCD ekranda kullanıcıya sunulur.

Motor hız kontrolü ve hız görüntüleme devresi (Aynı zamanda sistemin şematiği) şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Motor hız kontrolü devresi



Şekil 5: Hız görüntüleme devresi

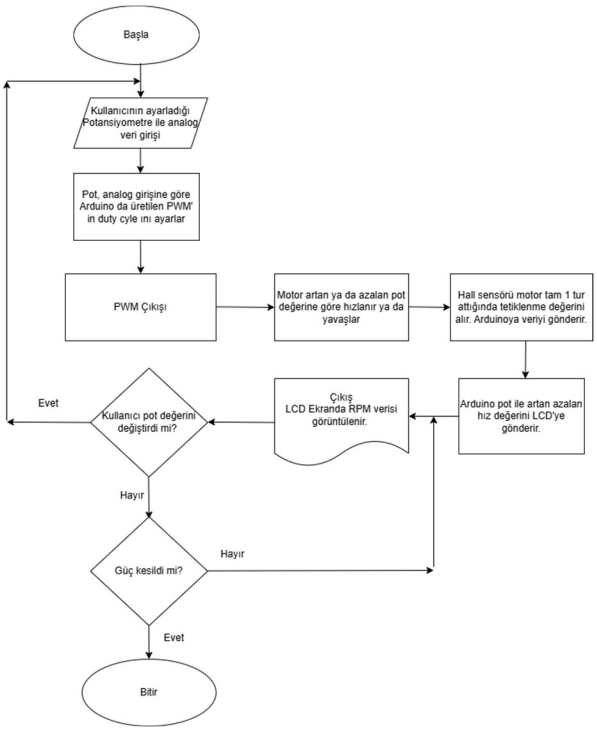
Kontrol Algoritması

Kontrol mantığı Arduino IDE kullanılarak uygulanmıştır. Motor gürültüsünü azaltmak ve daha pürüzsüz bir çalışma sağlamak için, Arduino'nun standart 980 Hz PWM frekansı, Timer1 ayarıyla manipüle edilerek 20 kHz'e yükseltilmiştir.

Kontrol algoritması, 10kOhm potansiyometreden okunan analog değeri (0-1023) kullanıcı girdisi olarak alır ve bu değer doğrudan 20 kHz PWM sinyalinin %0-100 görev döngüsünü ayarlar. Görev döngüsüne göre motor hızı kontrol edilir.

Bu kontrol döngüsünden temassız şekilde ayrılarak bağlanan A3144 Hall Effect sensöründen gelen darbeler bir mikrodenetleyicinin kesme pini aracılığıyla sayılır. Ayrı bir zamanlayıcı, 250ms'lik bir pencere içinde gelen darbelerin sayısını ölçerek motorun gerçek hızını RPM (devir/dakika) cinsinden hesaplar. Bu veriler, anlık izleme bilgisi olarak kullanıcıya sunulmak üzere yalnızca I2C modüllü 2x16 LCD ekrana gönderilir.

Bu kontrol algoritması şekil 6'da gösterilmektedir.

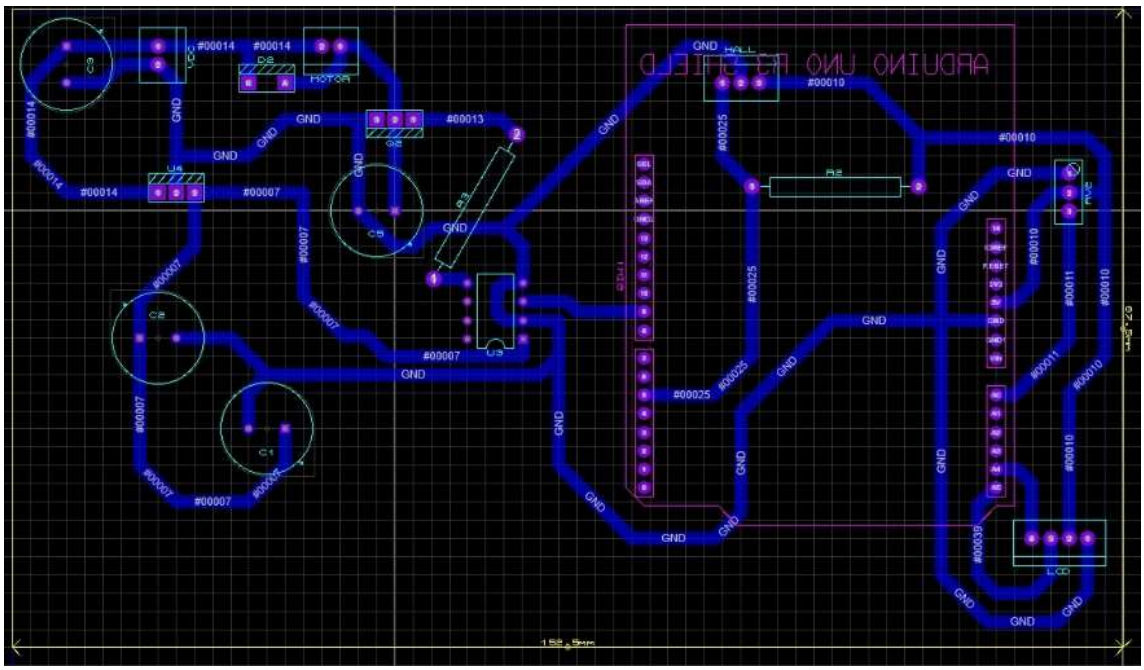


Şekil 6: Kontrol algoritması

PCB Tasarım

Devre şematiğinin ardından devrenin fiziksel olarak elde edilebilmesi için bir PCB tasarlanmıştır. PCB tasarım tek katmanlı bir yapıdadır. PCB tasarımında, 24V besleme hattını, MOSFET'i ve motor terminallerini birbirine bağlayan güç yollarına özel önem verilmiştir. Bu yollar, 8-10A'e varan tepe akımlarını kaldırabilmek ve parazitik endüktansı azaltmak için standart sinyal yollarından çok daha geniş tasarlanmıştır. Ek olarak, motorun endüktif karakteristiğinden kaynaklanan ters EMK piklerini bastırmak ve anahtarlama sırasında MOSFET'i voltaj bozulmasından korumak için motor terminallerine paralel olarak (ters diyot/flyback konfigürasyonunda) bir 20SQ045 Schottky diyot (45V, 20A) yerleştirilmiştir.

Şekil 7'de görüldüğü gibi motor hız kontrol devresinin PCB çizimi gösterilmiştir.



Şekil 7: Oluşturulan motor hız kontrol devresinin PCB tasarımı

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, 200-240W fırçalı DC motor için, yüksek akımlı endüktif yüklerin düşük voltajlı mikrodenetleyicilerle sürülmesindeki zorlukları ele alan, donanım odaklı bir hız kontrol sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Sistem; Arduino UNO kontrol birimi, IR2101 kapı sürücüsü ve IRLZ44N MOSFET'ten oluşan bir güç katı ve A3144 Hall sensör ile LCD'den oluşan bir izleme birimi içermektedir. Tasarımın temel hedeflerinden biri, Arduino'nun standart 980 Hz PWM frekansının motor üzerinde oluşturduğu duyulabilir gürültüyü ortadan kaldırmak ve daha pürüzsüz bir sürüş sağlamaktı. Bu amaçla, Timer1 ayarıyla manipüle edilerek 20 kHz'lik yüksek frekanslı bir PWM sinyali üretilmiştir. Bu mimari, entegre kapı sürücüsünün bu sinyali başarılı bir şekilde düzenleyerek lojik ve sinyal bütünlüğünü sağlaması üzerine kurulmuştur.

Bu tasarımın temel bir teknik çıktısı, MOSFET'in anahtarlama karakteristiklerinin etkin bir şekilde yönetilmesidir. Mikrodenetleyici 5V lojik seviyesinde çalışırken, entegre edilen IR2101 kapı sürücüsü bu sinyali 12V kapı sürüş seviyesine yükseltmek için kritik bir rol oynar. Bu voltaj yükseltme, IRLZ44N MOSFET'in yaklaşık 22mOhm olan minimum İletim Direnci RDS(on) değerine ulaşması için elzemdir. Sonuç olarak, transistör lineer bölge yerine doygunluk (doyum) bölgesinde çalışır ve yüksek akım talepleri sırasında güç kaybını en aza indirir. Buna karşılık, kapı sürücüsü olmadan 5V ile yapılan doğrudan bir sürme denemesi, MOSFET'in iletim direncini (RDS(on)) önemli ölçüde artıracak ve 8-10A'lik tepe akımlarında bileşen üzerinde kabul edilemez bir aşırı ısınma oluşturarak arızaya yol açacaktır.

Fiziksel devrenin güvenliğini sağlamak ve endüktif motor yüklerinin doğasında bulunan riskleri ele almak için, tasarıma bir 20SQ045 Schottky diyot dahil edilmiştir. Bu bileşen, ters elektromotor kuvveti (EMK) piklerinin neden olduğu potansiyel bozulmaları özel olarak hafifletir. Ek olarak, A3144 Hall Effect sensörünün entegrasyonu ile hız izleme mekanizmasının işlevselliği kurulmuştur. Bu sensör, mikrodenetleyici tarafından işlenen ve bir LCD'de görüntülenen gerçek zamanlı RPM verisi sağlayarak hassas izlemeye olanak tanır. Sistem tarafından gerçek zamanlı RPM verisinin kullanıcıya sunulması, motorun farklı yükler altındaki davranışını karakterize etmek için değerli bir izleme aracı sağlamakta ve bu tasarımı özellikle eğitim ve prototipleme çalışmaları için ideal kılmaktadır.

PCB yerleşimi, 8-10A'e varan tepe akımlarını yönetmek için genişletilmiş güç yolları ile tasarlanmış olup, endüstriyel prototipleme ve eğitim uygulamaları için karmaşık ticari sürücülere karşı sağlam ve uygun maliyetli bir alternatif sunmaktadır. PCB üzerindeki bu güç yollarının genişletilmesi, sadece akımı taşımakla kalmaz, aynı zamanda yüksek akım altında oluşacak gerilim düşümünü ve hat kayıplarını en aza indirerek motorun tam performans göstermesini sağlar. Son olarak, tek katmanlı PCB tasarımı, güç ve sinyal yollarının birbirinden tam olarak izole edilmesini zorlaştırmakta ve sistemi elektromanyetik girişime (EMI) karşı daha duyarlı hale getirmektedir.

Gelecek çalışmalarda çift katmanlı bir PCB tasarımı kullanarak güç ve sinyal yollarının birbirinden tam olarak izole edilmesi sağlanabilir. Ayrıca sisteme kapalı döngü kontrolü eklenebilir (PID vb.).

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma düşük maliyetli ve yaygın bileşenlerle, 5V'luk mikrodenetleyici platformlarında yüksek güçlü DC motorların sürülmesi problemine odaklanan, donanım temelli pratik bir çözüm sunmuştur.

REFERANSLAR

[1] Seda Postalcıoğlu, Çetin Köktürk (2019) "Bilgisayar Destekli DC Motor Hız Denetimi"

[2] Ahmet Top, Ozan Çakmak, Muammer Gökbulut (2017), "PID ve bulanık mantık ile DC motorun gerçek zamanda STM32F407 tabanlı hız kontrolü"

[3] Yalçın Albayrak, Kaan Karamancı, Turan Çakıl, İbrahim Eren (2014), "Android Cihazlar ile DC Motor Kontrolü"

[4] Ömer Aydoğmuş, Mert Bayer (2009), "PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı"

[5] Ömür Aydoğmuş (2006), "PIC Mikrodenetleyici Yardımı ile DC Motorun Hız Kontrolü"

[6] Davut Yüksekkaya (2017), "Fırçalı DC Motor Sürücü Tasarımı (Arduino & PID)

[7] Saffet Ayasun, Gültekin Karbeyaz (2006), "DC Motor Speed Control Methods Using MATLAB/Simulink"

[8] İlhami ÇOLAK, Ramazan BAYINDIR (2004),"PIC16F877 ile DA motor hız kontrolü"

[9] Barış Gökçe, Yavuz Bahadır Koca, Yılmaz Aslan (2021), "Doğru Akım Motorunun PID ile Hız Kontrolü ve Zorlamalı Yükler Altında Performans Analizi"

[10] Hüseyin KOÇ, Burak Safa BERZENER, Tuğçe YAREN, Selçuk KİZİR (2021), "Gerçek Zamanlı DC Motor Konum-Hız ve Konum-Hız-Tork Kaskad PID Denetleyici Performanslarının Karşılaştırılması"

[11] Enes Şahiner, Can Kaya, Tuncay Soylu (2024), "MOSFET H Köprüsü ile Asenkron Motor Sürücü PCB Tasarımı"

[12] A Faroqi vd. (2018), "DC Motor Speed Controller Design using Pulse Width Modulation"

[13] Yu Qiao vd. (2012), "Wireless DC Motor Speed Control"

[14] Mohamed Elhag vd. (2016), "Speed Control of DC Motor Using Fuzzy Logic and PI Controller"

[15] Hassan Khairi vd. (2014), "Wireless Speed Control of DC Motor Using Microcontroller"

[16] Halil Bahadır Akyıldız (2018), "Fırçasız D.A. Motor Sürücü Tasarımı"

[17] Fatih Köse, Kaplan Kaplan, H. Metin Ertunç (2013), "PID ve Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda STM32F407 Tabanlı Hız Kontrolü"

[18] RUPESH KUMAR, MRITUNJOY RAY, SRIDEEP BASAK, TITAS RAY (2019), "SPEED CONTROL OF DC MOTOR USING PULSE WIDTH MODULATION"

[19] Dr. Jamal A. Mohammed, (2012), "Pulse Width Modulation for DC Motor Control Based on LM324"

[20] Ellen Margirahayu, Junaidi, Gurum Ahmad Pauzi, Sri Wahyu Suciyati (2022), "DC Motor Speed Control System with PWM (Pulse Width Modulation) Technique Based on Arduino For Centrifugation Equipment Application"

HİDROJENLİ ARABALARDA SENSÖR TABANLI ARAÇ KONTROL KARTI

Rümeysa BAY
Elektrik – Elektronik Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya
**(rumeysaby.7330@gmail.com)*

Özet **–**Bu çalışma, hidrojen yakıtlı ve elektrikli araçlarda güvenlik ve veri yönetimini sağlamak amacıyla geliştirilen sensör tabanlı akıllı bir araç kontrol kartının tasarımını ve prototip uygulamasını konu almaktadır. Hidrojenli araçlarda gaz sızıntısı, batarya sıcaklığı ve motor hızı gibi kritik parametrelerin anlık takibi, sürüş güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, STM32 mikrodenetleyici tabanlı, modüler ve düşük maliyetli bir donanım mimarisi geliştirilmiştir. Tasarlanan sistem; MQ-8 sensörü ile hidrojen gazı sızıntılarını, MAX6675 termokupları ile batarya sıcaklığını ve optokuplör tabanlı devre ile motor hızını gerçek zamanlı olarak izlemektedir. Kritik eşik değerlerin aşılması durumunda sistem, röle tabanlı güvenlik mekanizmasını devreye sokarak güç hattını otomatik olarak kesmektedir. Ayrıca toplanan veriler, LoRa teknolojisi kullanılarak kablosuz olarak yer kontrol istasyonuna iletilmekte ve SD kart üzerine zaman damgalı olarak kaydedilmektedir. Geliştirilen bu kart, hidrojenli araçların güvenlik standartlarını artırmaya yönelik yerli ve özgün bir donanım çözümü sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Hidrojen, STM32, Araç Kontrol Kartı, LoRa Telemetri, Sensör

GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği ve fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi, otomotiv endüstrisini alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) raporlarına göre, ulaştırma sektörü küresel karbon emisyonlarının önemli bir kısmından sorumludur ve bu durum "yeşil dönüşüm" hedefleri doğrultusunda elektrikli ve hidrojen yakıtlı araçlara olan talebi artırmaktadır. Özellikle hidrojen yakıt pilli araçlar, yüksek enerji yoğunluğu ve sıfır emisyon avantajlarıyla geleceğin sürdürülebilir ulaşım vizyonunda kritik bir rol oynamaktadır. Ancak bu yeni teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri, yüksek basınçlı hidrojen gazının depolanması ve elektriksel güç sistemlerinin güvenli yönetimidir.

Hidrojenli araçlarda güvenlik sistemleri, geleneksel içten yanmalı motorlara göre çok daha hassas ve karmaşık bir yapı gerektirir. Batarya paketlerindeki termal kaçak (thermal runaway) riski ve hidrojen gazının yanıcı/patlayıcı doğası, bu araçlarda milisaniyeler mertebesinde tepki verebilen izleme sistemlerini zorunlu kılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, araç içi parametrelerin (hız, sıcaklık, gaz) genellikle birbirinden bağımsız, dağınık sensör modülleriyle takip edildiği görülmektedir. Bu parçalı yapı, veri bütünlüğünü zorlaştırmakta, sistem maliyetini artırmakta ve acil durumlarda merkezi bir müdahale mekanizmasının kurulmasını engellemektedir. Mevcut sistemlerin çoğu sadece izleme odaklı olup, tehlike anında otonom olarak güç kesme veya izolasyon yeteneğine sahip değildir.

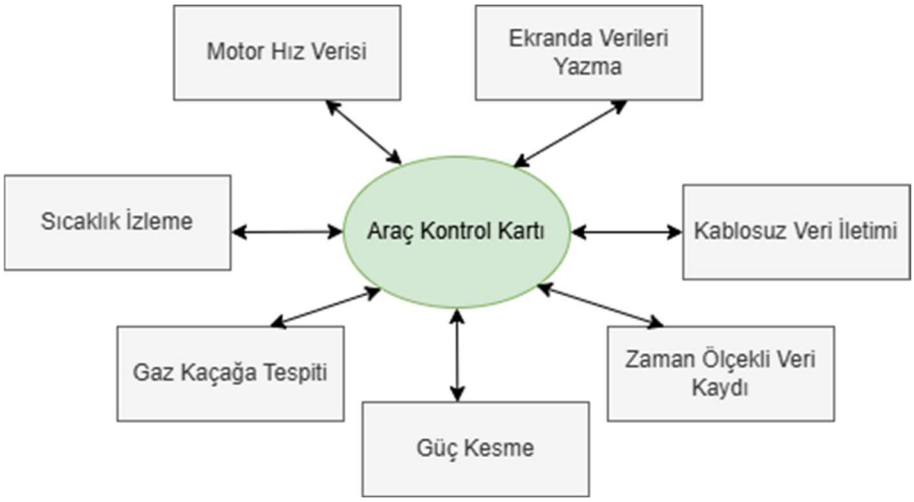
Bu çalışma, söz konusu güvenlik ve entegrasyon eksikliklerini gidermek amacıyla, hidrojenli araçlar için özelleştirilmiş, bütünleşik bir "Araç Kontrol Kartı" tasarımı önermektedir. Ülkemizin 12. Kalkınma Planı ve 2030 Sanayi ve Teknoloji Stratejisi'nde yer alan "yerli teknolojik sistemlerin geliştirilmesi" ve "akıllı ulaşım sistemleri" hedefleriyle doğrudan örtüşen bu proje, dışa bağımlılığı azaltacak yerli bir donanım çözümü sunmayı amaçlamaktadır.

Önerilen sistem, STM32 mikrodenetleyici mimarisi üzerine inşa edilmiş olup; hidrojen gazı sızıntısı, batarya hücre sıcaklıkları ve motor devri gibi kritik verileri tek bir merkezde toplamakta ve işlemektedir. Çalışmanın temel özgün değeri, sadece veri toplayan pasif bir sistem yerine; riskli durumlarda (gaz kaçağı veya aşırı ısınma) röleler aracılığıyla sistemi fiziksel olarak izole edebilen aktif bir güvenlik mekanizması sunmasıdır. Ayrıca LoRa tabanlı

telemetri altyapısı sayesinde, araç verilerinin uzak mesafelerden güvenli ve kesintisiz bir şekilde izlenmesi sağlanarak, nesnelerin interneti (IoT) tabanlı filo yönetim sistemlerine de zemin hazırlanmaktadır.

MATERYAL VE METOT

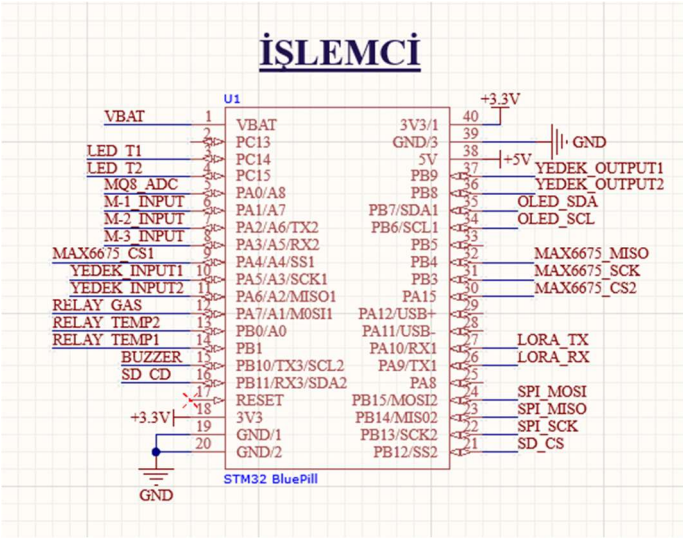
Araştırma kapsamında geliştirilen "Sensör Tabanlı Araç Kontrol Kartı", donanım ve yazılım bileşenlerinin entegre çalıştığı gömülü bir sistem üzerine kurgulanmıştır. Sistemin genel çalışma prensibi Şekil 1 de gösterilen blok diyagramı üzerinde özetlenmiştir.



Şekil 1. Önerilen Sistemin Genel Blok Diyagramı

Donanım Tasarımı ve Bileşenler

Sistemin merkezi kontrol birimi olarak, yüksek işlem kapasitesi ve zengin çevresel birim desteği (SPI, I2C, UART) sunan STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi tercih edilmiştir. İşlemci, sensörlerden gelen verileri toplayarak karar algoritmalarını işletir. İşlemci ve çevresel bağlantı şeması Şekil 2'de verilmiştir.



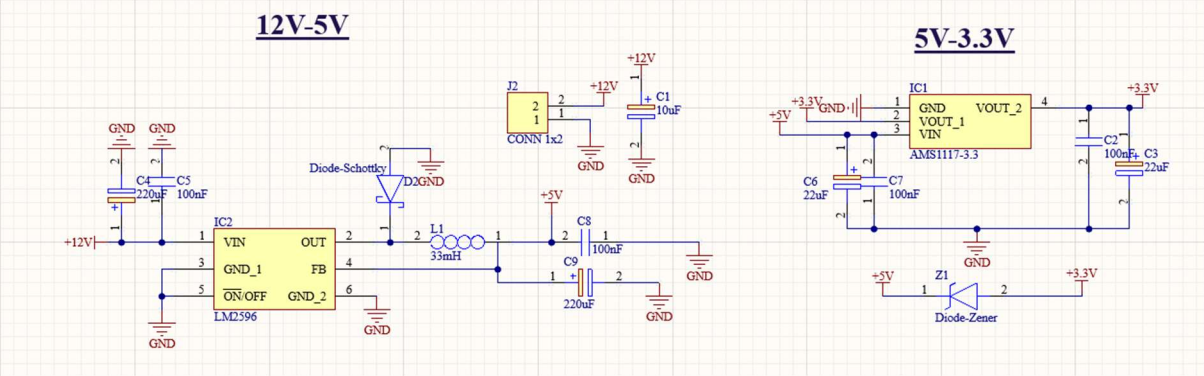
Şekil 2. STM32F103C8T6 Tabanlı İşlemci Devre Tasarımı.

Kademeli Voltaj Regülasyonu

Geliştirilen kontrol kartı, araç üzerinde genellikle 12V olan ana batarya geriliminden çalışmak üzere tasarlanmıştır. Ancak, sistemde kullanılan mikrodenetleyici, sensörler ve haberleşme modüllerinin farklı ve çok daha düşük voltaj

seviyelerine (5V ve 3.3V) ihtiyacı vardır. Bu bileşenler için gerekli kararlı ve gürültüden arındırılmış gücü sağlamak amacıyla iki kademeli bir voltaj regülasyon mimarisi uygulanmıştır. na 12V giriş gerilimi, LM2596 entegresi kullanılarak 5V seviyesine düşürülür. LM2596, yüksek verimlilikle çalışan anahtarlamalı tipte bir buck (düşürücü) regülatördür. Bu tip bir regülatörün tercih edilme sebebi, lineer regülatörlerin aksine enerjiyi ısı olarak çok az kaybetmesidir; bu da batarya ile çalışan araç uygulamaları için kritik bir enerji verimliliği sağlar. Devrede yer alan L1 (33mH) bobini, D3 Schottky diyotu ve C9 (220uF) kapasitörü, anahtarlama işleminin temel bileşenleri olup, 12V'tan 5V'a verimli bir dönüşüm sağlar. Elde edilen bu 5V'luk hat, sistemdeki röle modüllerini, MQ-8 gaz sensörünün ısıtıcısını ve bir sonraki regülatör kademesini beslemek için kullanılır.

İkinci Kademe (5V - 3.3V Dönüşümü): Sistemin beyni olan STM32 mikrodenetleyicisi, LoRa haberleşme modülü, SD kart ve OLED ekran gibi tüm hassas dijital bileşenler 3.3V ile çalışmaktadır. Bu bileşenlerin ihtiyaç duyduğu son derece kararlı ve "temiz" (düşük gürültülü) gücü sağlamak için, 5V hattından AMS1117-3.3 LDO (Düşük Düşümlü) lineer regülatör kullanılmıştır. Lineer regülatörler, anahtarlamalı regülatörlere göre daha az verimli olsalar da, çıkış gürültüleri (ripple) çok düşüktür. Bu sayede mikrodenetleyicinin ve haberleşme modüllerinin kararsız çalışmasına veya veri bozulmalarına yol açabilecek elektriksel gürültülerin önüne geçilir.

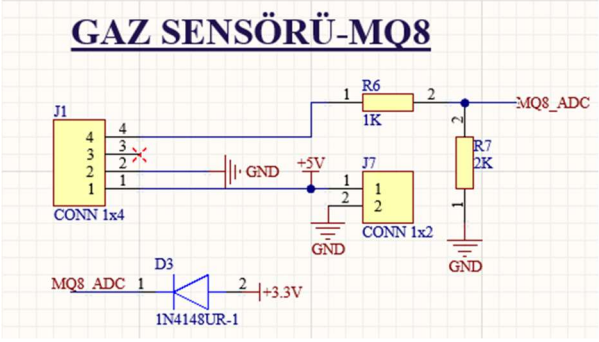


Şekil 3. Regülatör Devre Tasarımı

Hidrojen Gazı Algılama (MQ-8)

Hidrojen yakıtlı araç mimarileri, doğaları gereği iki temel ve birbirinden farklı gaz sızıntısı riski barındırır: birincisi yakıt hücresi veya depolama tankından kaynaklanabilecek Hidrojen (H2) kaçağı, ikincisi ise sisteme güç sağlayan yüksek yoğunluklu lityum-iyon tampon (buffer) batarya paketinden kaynaklanabilecek termal kaçak gazlarıdır. Geliştirilen kontrol kartı, bu iki riski de yönetmeyi hedefler.

Projenin temel güvenlik hedeflerinden biri, ana yakıt kaynağı olan hidrojenin sızıntısını yüksek hassasiyetle tespit etmektir. Bu kritik görev için, sistemde MQ-8 Hidrojen Gaz Sensörü kullanılmıştır. MQ-8, SnO2 tabanlı yarı iletken yapısı sayesinde özellikle H2 gazına karşı yüksek duyarlılık ve milisaniyeler mertebesinde hızlı tepki süresi göstermektedir. Devre tasarımında (Şekil 4), sensörün analog çıkışı STM32 mikrodenetleyicisinin ADC (Analog-Dijital Çevirici) birimine bağlanmıştır. Ortamdaki H2 konsantrasyonu, yazılımda tanımlanan ve güvenlik standartlarına (örn: LFL- Alt Patlama Sınırı) dayalı eşik değeri (örneğin 300 ppm) aştığında, mikrodenetleyici derhal "acil durum moduna geçer. Bu modda, sesli (buzzer) ve görsel (LED) uyarılar aktif edilir ve eş zamanlı olarak röle kontrol devresi tetiklenerek aracın ana yakıt ve güç hattı izole edilir. Bu proaktif müdahale, potansiyel bir patlama veya yangın riskini oluşmadan engellemeyi amaçlar.



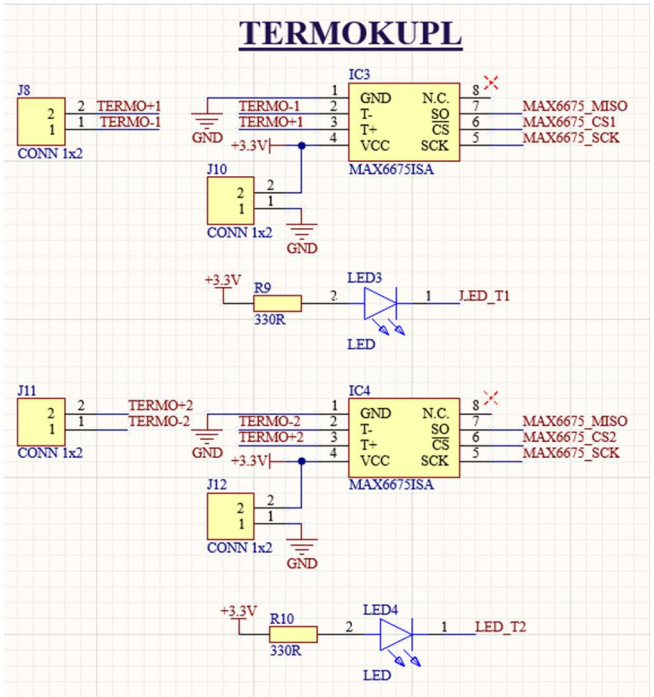
Şekil 4. MQ-8 Hidrojen Gaz Sensörü Devre Tasarımı.

Hidrojen yakıt kaçağına ek olarak, bu araçlarda kullanılan lityum-iyon batarya paketlerinin güvenliği de hayati bir unsurdur. Yeni araştırmalar, batarya hücrelerinde "termal kaçak" (thermal runaway) olarak bilinen tehlikeli durum başlamadan hemen önce, ortamda HF (Hidrojen Florür) ve CO (Karbon Monoksit) gazlarının konsantrasyonlarının yükselmeye başladığını doğrulamaktadır. Bu gazların erken tespiti, termal kaçaktan kaynaklanan risklerin önlenmesi için kritik bir erken uyarı sistemi sağlar. Termal kaçak olayına yakın bir zamanda, HF konsantrasyonlarının yüzlerce ppm seviyesine, CO seviyelerinin ise % (yüzde) mertebelerine ulaşabildiği rapor edilmiştir. Bu nedenle, mevcut projenin MQ-8 (H2) sensörü ile birincil yakıt güvenliğini sağlamasının yanı sıra, sistemin termokupl (MAX6675) sensörleri ile batarya sıcaklığını anlık olarak takip etmesi, aracın bütüncül güvenliği için büyük önem taşımaktadır.

Sıcaklık Algılama

Hidrojenli araçlarda, hem yakıt pilinin (fuel cell) verimliliği hem de tampon lityum-iyon batarya paketlerinin güvenliği için sıcaklık takibi hayati önem taşımaktadır. Sistemde bu görev için, endüstriyel standartlarda yüksek hassasiyet sunan MAX6675 entegreleri ile K-tipi termokupllar kullanılmıştır. Bu sensörler, batarya hücre gruplarının ve yakıt pili yığınlarının kritik noktalarına stratejik olarak yerleştirilmiştir. MAX6675, 0,25 °C hassasiyetinde ölçüm yapabilmekte ve verileri SPI (Serial Peripheral Interface) haberleşme protokolü üzerinden gürültüye karşı dayanıklı bir şekilde doğrudan STM32 mikrodenetleyicisine iletmektedir.

Sistemin asıl amacı sadece veri toplamak değil, aktif bir koruma sağlamaktır. Yazılımda tanımlanan güvenli çalışma aralığının (örneğin 60 °C) üzerine çıkıldığında, mikrodenetleyici bu durumu "termal kaçak" (thermal runaway) için bir ön uyarı olarak kabul eder. Derhal röle tabanlı koruma devresini (Bkz. Şekil 7) aktive ederek batarya güç hattını keser ve böylece hücrelerin aşırı ısınmasını veya potansiyel bir yangın riskini fiziksel olarak engeller. Bu yapı, aktif bir soğutma sistemi olmaksızın pasif güvenlik sağlama yeteneğine sahiptir.



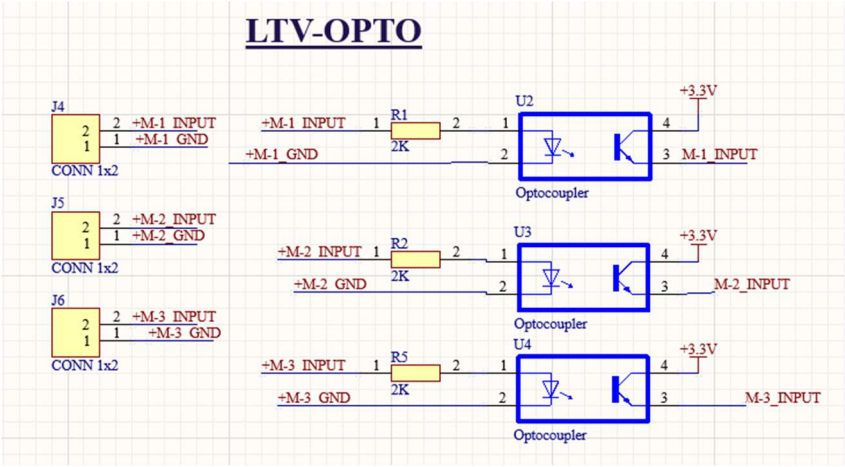
Şekil 5. Termokupl Devre Tasarımı

Hız Ölçümü

Aracın performans kontrolü, enerji verimliliğinin hesaplanması ve telemetri verilerinin doğruluğu için motor hızının hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Yüksek güçlü elektrik motorları, çalışırken ciddi seviyelerde elektromanyetik girişim (EMI) ve elektriksel gürültü üretirler. Bu gürültünün, düşük güçlü ve hassas olan STM32 mikrodenetleyicisine zarar vermesini önlemek amacıyla, hız ölçüm sistemi tam bir elektriksel izolasyon prensibiyle

tasarlanmıştır. Bu izolasyonu sağlamak için LTV-817S optokuplör entegreleri kullanılmıştır. Sistem, motorun üç faz hattından gelen yüksek voltajlı PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyallerini doğrudan okur. Optokuplörün içindeki kızılötesi LED, bu PWM sinyali ile tetiklenir; yayılan ışık, entegrenin diğer tarafındaki fototransistör tarafından algılanır. Bu süreç, yüksek güç hattı ile kontrol kartı arasında hiçbir fiziksel elektriksel temas olmadan, sinyalin ışıkla aktarılmasını sağlar.

Elde edilen bu temiz ve güvenli lojik sinyaller (HIGH-LOW geçişleri), mikrodenetleyicinin TIM2 (Zamanlayıcı) Input Capture birimine yönlendirilir. Yazılım, belirli bir zaman aralığında bu sinyallerin (pulse) sayısını sayarak motorun devir/dakika (RPM) değerini yüksek doğrulukla hesaplar. Hesaplanan RPM değeri, aracın teker yarıçapı (r) bilgisiyle işlenerek hızın m/s ve km/s birimlerine dönüştürülmesini sağlar. Bu yöntem, yapılan testlerde referans ölçüm cihazlarına kıyasla %2'nin altında hata payı göstermiştir.

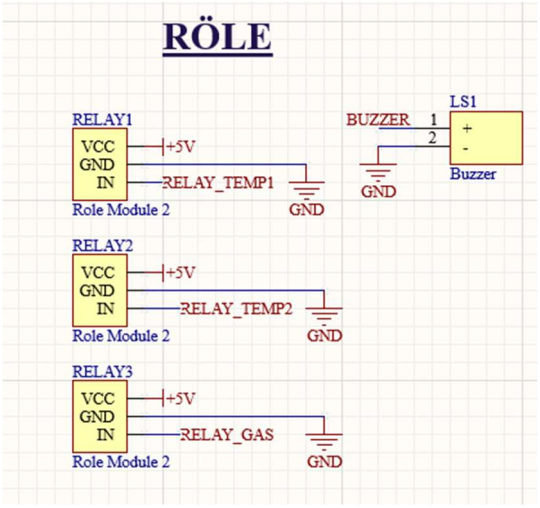


Şekil 6. Hız Ölçüm Devre Tasarımı

Röle Kontrol Sistemi

Geliştirilen araç kontrol kartının temel amacı, pasif veri izlemenin ötesinde, aktif bir koruma mekanizması sağlamaktır. Bu otonom müdahale yeteneği, sisteme entegre edilen üç adet röle modülü aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu rölelerden ikisi, doğrudan batarya ve yakıt pili hücrelerinin sıcaklığını izleyen MAX6675 termokupl sensörlerine yazılımsal olarak bağlanmıştır. Sıcaklık, önceden belirlenen kritik bir güvenlik eşiğini (örneğin 60 °C) aştığında, mikrodenetleyici bu durumu bir termal kaçak (thermal runaway) başlangıcı olarak yorumlar. Tespiti takiben, ilgili röle anında tetiklenir ve batarya paketinin ana güç hattını fiziksel olarak keserek sistemin enerjisini kapatır.

Üçüncü röle ise hidrojen güvenliğine adanmıştır ve MQ-8 gaz sensöründen gelen verilerle kontrol edilir. Ortamdaki hidrojen konsantrasyonu tehlikeli bir seviyeye ulaştığında, bu röle devreye girerek sistemin tüm elektriğini izole eder ve olası bir gaz kaçağı kaynaklı patlama veya yangın riskini ortadan kaldırır. Rölelerin mikrodenetleyici tarafından sürülmesi, transistörlü sürücü devreleri ile güçlendirilmiş ve bobinlerin oluşturduğu geri EMF (zıt EMK) etkilerine karşı koruma diyotları kullanılmıştır. Bu yapı, aracın hem ısıl hem de kimyasal risklere karşı otonom bir koruma kalkanına sahip olmasını sağlar.



Şekil 7. Röle Devre Tasarımı

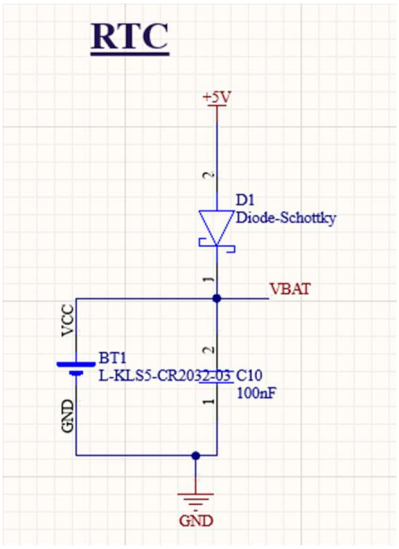
RTC

Hidrojenli araçlarda güvenlik analizi, sadece "ne" olduğunun değil, aynı zamanda "ne zaman" olduğunun da bilinmesini gerektirir. Sistemde toplanan tüm sensör verilerini (sıcaklık, gaz, hız) anlamlı bir bağlama oturtmak ve olayların kronolojik bir kaydını tutmak amacıyla RTC modülü kullanılmıştır. Bu modülün en kritik özelliği, STM32 mikrodenetleyicisinden tamamen bağımsız bir güç kaynağına sahip olmasıdır. Devre tasarımında (Şekil 7), RTC, ana sistemin gücü kesilse veya araç kapalı olsa bile, VBAT hattı (genellikle bir CR2032 pil) üzerinden beslenmeye devam eder. Bu sayede, zaman bilgisi (tarih ve saat) hiçbir zaman sıfırlanmaz ve sistemin veri kaydında süreklilik sağlanır.RTC modülü, mikrodenetleyici ile düşük pin sayısıyla güvenilir bir iletişim sağlayan I2C haberleşme protokolü üzerinden haberleşir. Ana döngü içerisinde, mikrodenetleyici her bir sensör verisini (sıcaklık, gaz, hız vb.) okuduğunda, aynı anda I2C hattı üzerinden RTC'den de o anki tarih ve saat bilgisini çeker.

Bu yapı sayesinde, SD karta veya telemetri ile yer istasyonuna gönderilen her veri paketi, zaman damgası (timestamp) ile etiketlenir.

Örneğin: [10.09.2025 / 18:43:00] | Hız: 45 m/s | Gaz: 52 ppm.

Bu kronolojik kayıt, sistemin yalnızca anlık durumunu göstermekle kalmaz, aynı zamanda bir kaza veya arıza durumunda olayın öncesini ve sonrasını analiz etme, batarya sıcaklığındaki artış trendlerini inceleme veya gaz sızıntı sıklığını belirleme gibi gelişmiş analizlere imkân tanır.



Şekil 8. RTC Devre Tasarımı

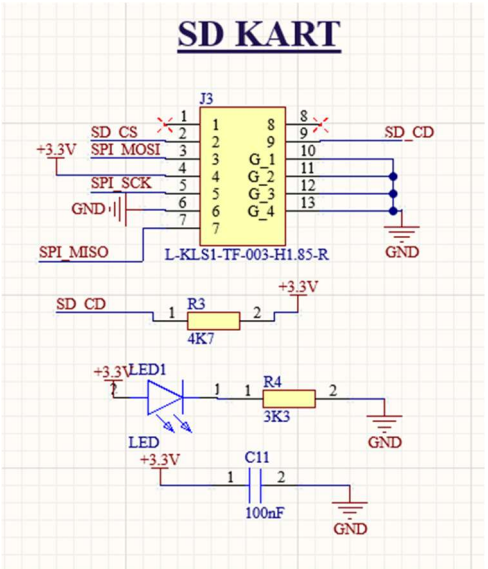
SD Kart

Geliştirilen kontrol kartı, bir "kara kutu" (black box) işlevi görerek, aracın tüm sensör geçmişini uzun süreli depolama amacıyla kaydetmek üzere bir SD kart modülü ile donatılmıştır. Bu özellik, özellikle bir arıza, kaza veya kritik güvenlik olayı (gaz sızıntısı, aşırı ısınma vb.) sonrasında, olayın kök nedenini analiz etmek için hayati önem taşır.

SD kart modülü, yüksek hızlı veri aktarımına olanak tanıyan SPI (Serial Peripheral Interface) arayüzü üzerinden STM32 mikrodenetleyicisine bağlanmıştır. Sistem, verileri sürekli olarak yazarak enerji tüketmek yerine, optimize edilmiş bir yazma stratejisi kullanır. Ölçüm verileri, belirlenen periyotlarda (örneğin saniyede bir veya yalnızca bir değişiklik olduğunda) toplu halde karta yazılır. Bu periyodik yaklaşım, sistemin enerji tüketimini minimumda tutarak aracın batarya ömrünü korur ve aynı zamanda veri güvenilirliğini artırır.

Kaydedilen verilerin analiz edilebilir ve okunabilir olması için, her bir kayıt satırı RTC (Gerçek Zaman Saati) modülünden alınan zaman bilgisi ile etiketlenir. Bu sayede tüm veriler kronolojik bir formatta tutulur. Örnek bir veri kaydı formatı şu şekildedir:

[10.09.2025 / 18:43:00] | Hız: 45 m/s | Sıcaklık1: 70°C | Sıcaklık2: 40°C | Gaz Seviyesi: 52 ppm



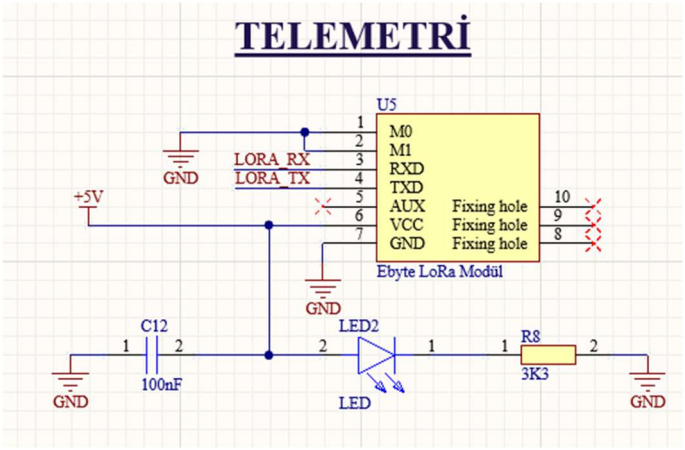
Şekil 9. SD Kart Devre Tasarımı

Telemetri Sistemi

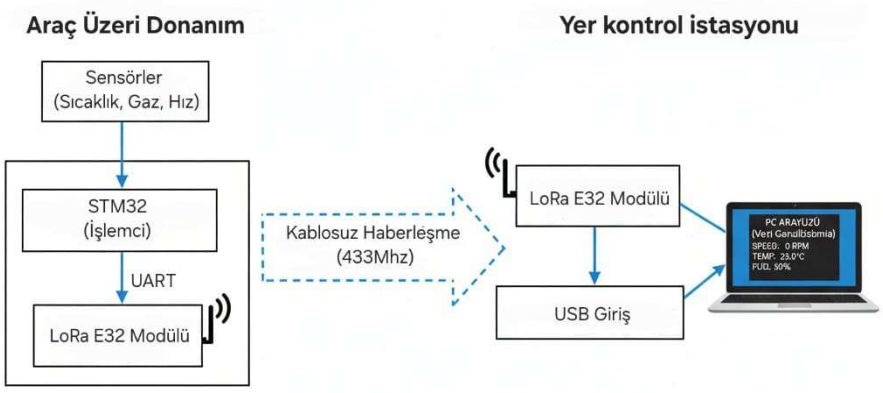
Aracın kritik güvenlik ve operasyonel verilerinin uzaktan izlenmesi, sistemin temel hedeflerinden biridir. Bu görev için, LoRa (Long Range) haberleşme protokolü tercih edilmiştir. LoRa, özellikle araç telemetri uygulamaları için ideal olan düşük güç tüketimi ve uzun menzil avantajlarını bir arada sunar. Mikrodenetleyici tarafından işlenen tüm sensör verileri (hız, sıcaklık, gaz seviyesi) ve RTC'den alınan zaman damgası, yapılandırılmış bir veri paketi haline getirilir. Örnek format:

[Tarih/Saat] | Hız: XX m/s | Sıcaklık1: XX°C | Gaz: XX ppm

Bu paket, UART arayüzü üzerinden Ebyte LoRa modülüne (Şekil 10) iletilir ve kablosuz olarak yer kontrol istasyonuna gönderilir. Bu yapı sayesinde, yer istasyonundaki operatörler aracın çalışma durumunu, batarya/yakıt pili sıcaklıklarını ve en önemlisi olası gaz sızıntılarını anlık olarak takip edebilir. LoRa'nın düşük veri hızında sunduğu yüksek kararlılık, aracın elektromanyetik gürültü ortamında bile verilerin güvenli ve sürekli bir biçimde merkeze iletilmesini sağlar.



Şekil 10. Telemetri Devre Tasarımı

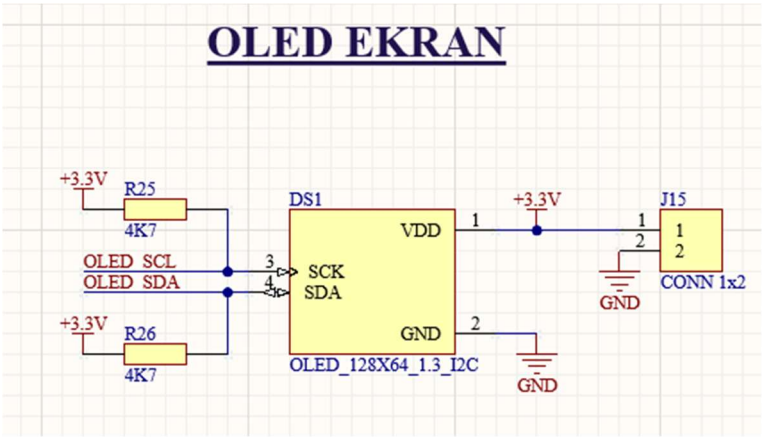


Şekil 11. Uzaktan Haberleşme Diyagramı

OLED Ekran

Sistem, uzaktan telemetriye ek olarak, araç üzerindeki kullanıcıya veya test mühendisine anlık fiziksel geri bildirim sağlamak amacıyla bir OLED (Organic Light Emitting Diode) ekran ile donatılmıştır. Düşük güç tüketimi ve yüksek kontrastlı yapısı sayesinde tercih edilen OLED ekran hem laboratuvar ortamında hem de araç içi uygulamalarda yüksek okunabilirlik sunar.

Ekran, mikrodenetleyiciye I2C (Inter-Integrated Circuit) haberleşme protokolü üzerinden (Şekil 12) bağlanmıştır.Bu arayüz sayesinde sıcaklık, gaz seviyesi, motor hızı ve RTC'den alınan tarih/saat bilgileri gibi tüm kritik veriler, anlık olarak ve dinamik bir şekilde ekranda gösterilir. Bu yerel arayüz, kullanıcının sistemin anlık sağlık durumunu fiziksel bir temas noktası üzerinden kolayca takip edebilmesini sağlar.

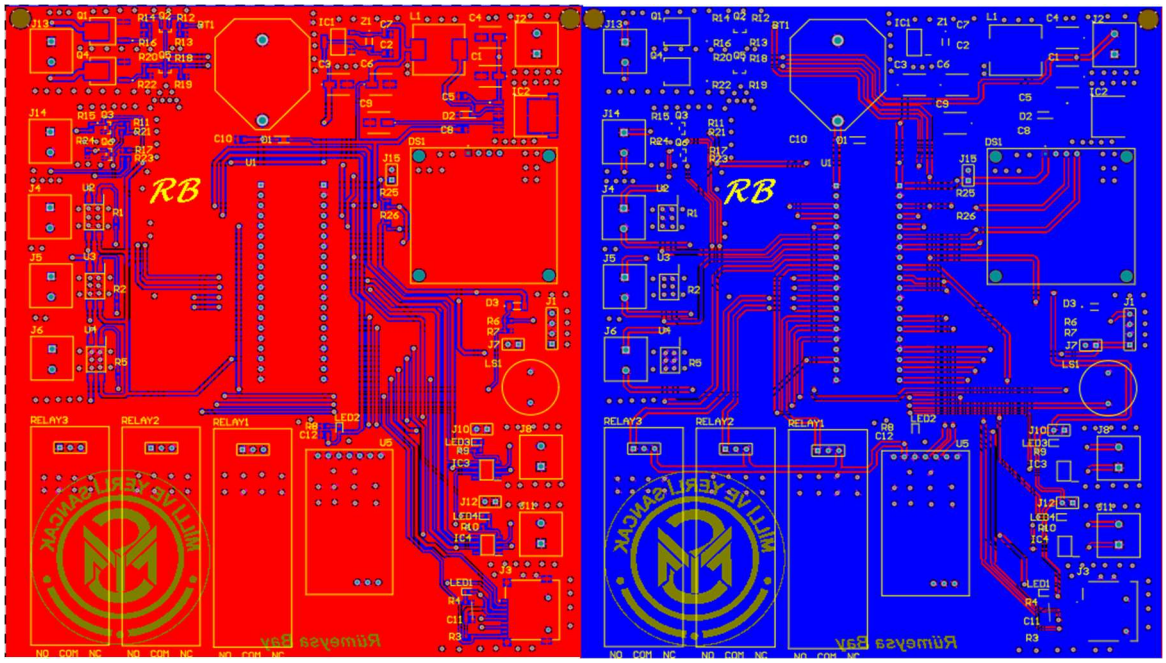


Şekil 12. OLED Ekran Devre Tasarımı

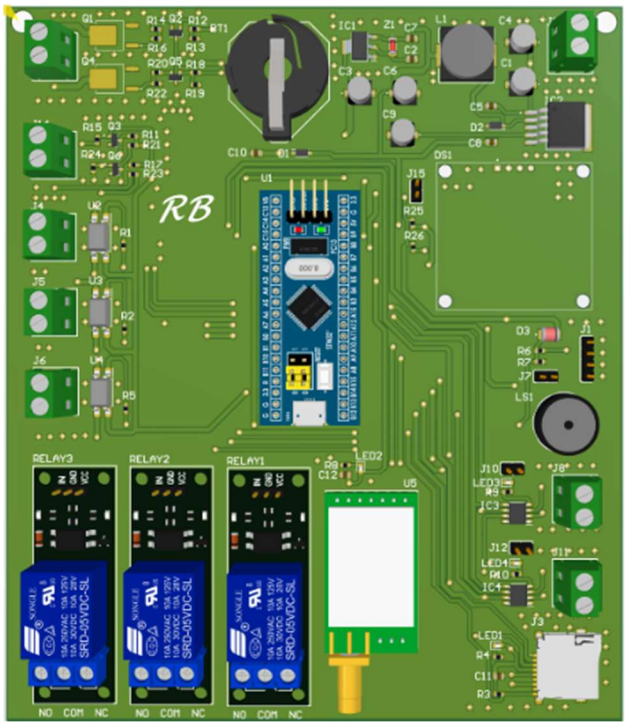
PCB Tasarımı

Geliştirilen prototip, endüstriyel standartlara uygun olarak Altium Designer yazılımında tasarlanmış çift katmanlı (dual-layer) bir baskı devre kartıdır. Kartın yerleşim mimarisi, sinyal bütünlüğünü korumak ve parazitlenmeyi önlemek amacıyla stratejik olarak planlanmıştır.

Tasarımın merkezinde, tüm mantıksal işlemlerin yürütüldüğü STM32 mikrodenetleyici (U1) bulunmaktadır. Güç hatları ve kontrol sinyalleri farklı katmanlara ayrılarak ve alt katmanda geniş bir toprak (GND) dökümü kullanılarak, sistemin EMI (Elektromanyetik Girişim). Dayanıklılığı en üst düzeye çıkarılmış ve hassas sensör ölçümlerinin kararlılığı güvence altına alınmıştır.



Şekil 13. PCB Tasarım Görselleri



Şekil 14. Devre 3D Tasarım Görseli

BULGULAR VE TARTIŞMA

Proje, bu yazının hazırlandığı tarih itibarıyla üretim aşamasındadır. Altium Designer'da tasarımı tamamlanan çift katmanlı PCB, yüksek hassasiyet ve endüstriyel standartlarda üretim kalitesi elde etmek amacıyla profesyonel bir firmaya baskı için gönderilmiştir. Kartın üretimden gelmesi ve bileşen montajının tamamlanmasının ardından, sistemin elektriksel, donanımsal ve yazılımsal doğrulamasını kapsayacak yapılandırılmış bir test sürecine geçilmesi

planlanmaktadır. Bu süreç, "Materyal ve Metot" bölümünde açıklanan tasarım hedeflerine ulaşılıp ulaşılmadığını test edecektir.

1. Prototip kart üzerine SMD ve DIP bileşenlerin lehimleme işlemleri tamamlandıktan sonra, sisteme enerji verilmeden önce tüm güç (VCC) ve toprak (GND) hatları üzerinde multimetre ile kısa devre ve açık devre kontrolleri yapılacaktır [kaynak 28]. Bu temel doğrulama, olası montaj veya üretim hatalarını tespit etmek için kritiktir. Başarılı olursa, kartın regülatör katmanlarının (12V-5V ve 5V-3.3V) çıkış voltajları doğrulanacaktır.
2. Haberleşme ve veri aktarım hatlarının kararlılığının test edilmesi amacıyla bir dijital osiloskop kullanılacaktır. Özellikle yüksek hızlı SPI (SD Kart, MAX6675) ve UART (LoRa telemetri) protokollerinin sinyal bütünlüğü incelenecektir. Bu sayede, veri iletiminde olası gürültü (noise) veya parazitlenme durumları, yazılım entegrasyonuna geçilmeden önce donanımsal düzeyde tespit edilecektir.
3. Donanım doğrulamasını takiben, STM32 mikrodenetleyiciye geliştirilen modüler kod yüklenecektir. Bu aşamada:
   Sensör Veri Okunabilirliği: MQ-8 (Gaz), MAX6675 (Sıcaklık) ve LTV-817S (Hız) sensörlerinden gelen verilerin doğru ve kararlı bir şekilde okunup okunmadığı gözlemlenecektir.

Güvenlik Mekanizması Testi: Sistemin en kritik fonksiyonu olan otonom koruma test edilecektir. Simüle edilmiş bir alarm durumu (örneğin, MQ-8 sensörüne kontrollü gaz verilmesi veya termokuplun ısıtılması) yaratılarak, belirlenen eşik değer aşıldığında ilgili güvenlik rölesinin güç hattını başarıyla kesip kesmediği doğrulanacaktır.
Telemetri ve Kayıt Testi: Toplanan verilerin LoRa modülü ile yer istasyonuna hatasız iletildiği ve eş zamanlı olarak SD karta zaman damgalı olarak kaydedildiği teyit edilecektir.

Bu test sürecinden elde edilecek bulgular, sistemin bütünsel olarak doğrulanmasını sağlayacaktır. Eklenen sonuç hem donanım hem de yazılım bileşenlerinin senkronize biçimde çalışarak, hidrojenli araçlar için kararlı, güvenilir ve tasarım hedeflerine uygun bir kontrol prototipi elde etmektir. Test sonuçlarına göre, özellikle sensör hassasiyet eşik değerleri veya zamanlama parametreleri gibi yazılımsal değişkenler üzerinde kalibrasyon ve revizyonlar yapılacaktır.

SONUÇ

Bu çalışmada, hidrojenli araçlar için kritik öneme sahip olan güvenlik parametrelerinin izlenmesi amacıyla sensör tabanlı bir araç kontrol kartı tasarlanmış ve prototipi üretilmiştir. STM32 mikrodenetleyicisi ve çoklu sensör mimarisi ile araç içi güvenlik otonom hale getirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, sistemin yapay zekâ
Algoritmaları ile desteklenerek kestirimci bakım özelliklerinin eklenmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Cheng, Y., Chen, L., Li, H. et al. (2023). *Research on sensor fusion technology of multi-information fusion in intelligent vehicles*. *Scientific Reports*, 13(2478)

2. Altaf, R., et al. (2023). *Development of a Smart Vehicle Monitoring and Control System using STM32 Microcontroller. IEEE Access.*

3. Khan, A., et al. (2025). *Sensing-based monitoring systems for electric vehicle battery. Energy Storage & Systems*, (forthcoming).

4. Menak, R. (2020). *Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir İnceleme.* Inönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.

5. Karabaşoğlu, O. (2021). *Hibrit ve Elektrikli Araçlar için Güç Aktarım Sistemi Bağlantılı Yeşil Rotalama.* DEÜ FMD, 23(68), 421-433.

6. Zhang, X., Li, J., Wang, P. (2022). Hydrogen leakage detection and safety strategies in fuel cell vehicles: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(12), 7812–7830.

7. Li, Y., Chen, Z., & Qin, Z. (2021). Thermal runaway mechanisms and early detection strategies for lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 34, 50–65.

8. Sikder, A., et al. (2023). Real-time IoT-based monitoring system for electric vehicle safety. *Sensors*, 23(5), 2451.

9. Çelik, O., & Güneş, A. (2021). Hidrojen Yakıtlı Araçlarda Güvenlik Sistemleri ve Risk Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 211–225.

10. Özdemir, F., & Başaran, M. (2020). Lityum-İyon Bataryalarda Termal Kaçak Davranışı ve Önleme Yöntemleri. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 145–160.

TL494 TABANLI PWM KONTROLLÜ BUCK CONVERTER TASARIMI

Hakan TERZİOĞLU[1*], Sıla AYDIN[2]

[1] Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2]Department of Electrical and Energy, Konya Technic UNIVERSITY of TECHNICAL Sciences Vocational School Technology, Selçuklu, Konya

[*](hterzioglu@selcuk.edu.tr)

Özet - Bu çalışma, elektronik sistemlerde yaygın olarak kullanılan buck dönüştürücü topolojisinin güç dağıtımındaki rolünü ve modern uygulamalardaki önemini ele almaktadır. Yüksek gerilim hatlarından çeşitli alt modüllere düşük ve kararlı gerilim sağlayan buck dönüştürücüler, basit yapıları ve yüksek verimlilikleri nedeniyle endüstride kritik bir konuma sahiptir. Sunucu anakartları, iletişim kartları ve gömülü sistemlerde yer alan çoklu yüklerin güvenilir biçimde beslenebilmesi için buck dönüştürücülerin kararlı çalışma karakteristiklerinin anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler – TL494; Buck Dönüştürücü; PWM Kontrolü; DC-DC Dönüştürme; Anahtarlamalı Güç Kaynağı; Görev Döngüsü Kontrolü; Güç Elektroniği

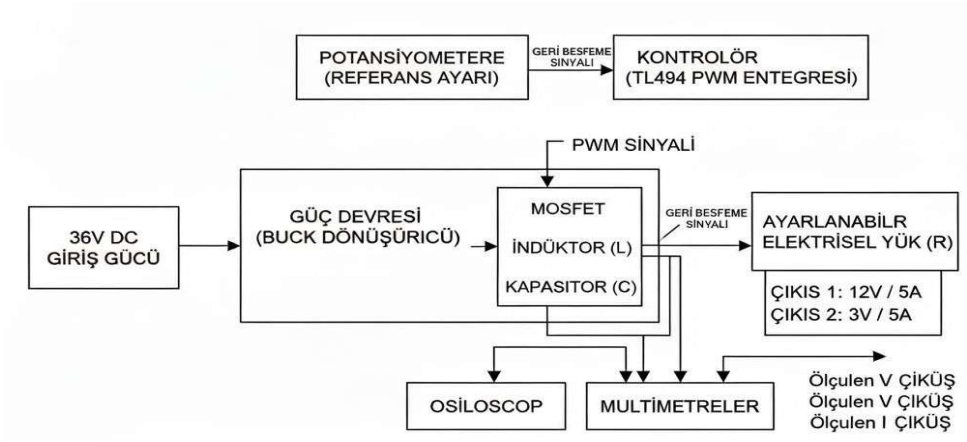
GIRIŞ

Anahtarlamalı güç kaynakları, yüksek verimlilikleri, kompakt yapıları ve geniş uygulama alanları nedeniyle günümüzde elektrikli araçlardan yenilenebilir enerji sistemlerine kadar birçok modern elektronik cihazda temel güç dönüştürücüleri olarak kullanılmaktadır. Lineer güç kaynaklarına kıyasla daha küçük boyutlu ve daha hafif olmaları, güç elektroniği tasarımlarında önemli bir avantaj sağlamaktadır.[1] DA-DA dönüştürücüler, batarya, doğrultucu veya güneş paneli gibi kaynaklardan elde edilen düzenlenmemiş doğru gerilimi istenen seviyeye getirerek kararlı bir çıkış gerilimi sunarlar. Yük değişimleri veya giriş gerilimindeki dalgalanmalara rağmen sabit bir çıkış geriliminin korunması bu dönüştürücülerin en kritik görevlerinden biridir. Bununla birlikte, doğrusal olmayan dinamik yapıları nedeniyle kontrol tasarımları oldukça karmaşık bir yapı göstermektedir.[2] Buck dönüştürücü, DA-DA dönüştürücüler arasında en yaygın kullanılan topolojidir. Basit yapısı; yalnızca bir aktif anahtar, bir doğrultucu ve LC filtresi içermesi; maliyet açısından avantaj sağlaması ve yüksek verim sunması nedeniyle güç dağıtım sistemlerinde sıkça tercih edilmektedir. Geleneksel buck dönüştürücüler sabit frekanslı PWM kontrolü ile çalışırken modern tasarımlarda MOSFET tabanlı anahtarlar ve adaptif kontrol teknikleri sayesinde verimlilik daha da artırılmıştır. [1], [3] Buck-boost dönüştürücü ise çıkış gerilimini görev döngüsüne bağlı olarak giriş geriliminden daha yüksek veya daha düşük seviyelere getirebilmekte ve çıkış polaritesinin giriş gerilimine göre ters olmasıyla dikkat çekmektedir. Bu dönüştürücüler hem sürekli iletim modunda hem de süreksiz iletim modunda çalışabilmekte olup çalışma modu dönüştürücünün verimliliğini ve geçici yanıt davranışını doğrudan etkilemektedir. [4], [5]. Buck topolojisinde giriş akımının kesikli olması ve anahtardan yüksek tepe akımların geçmesi devrenin tasarım aşamasında dikkate alınması gereken önemli noktalardır. Tek bir yarı iletken anahtar kullanılan yapılar devreyi daha kompakt hâle getirirken görev döngüsü kontrol edilerek istenen çıkış gerilimi kolaylıkla elde edilebilir. Bu nedenle buck ve buck dönüştürücüler, kompakt tasarım gerektiren birçok güç elektroniği uygulamasında tercih edilmektedir. [6], [7]

MALZEMELER VE YÖNTEM

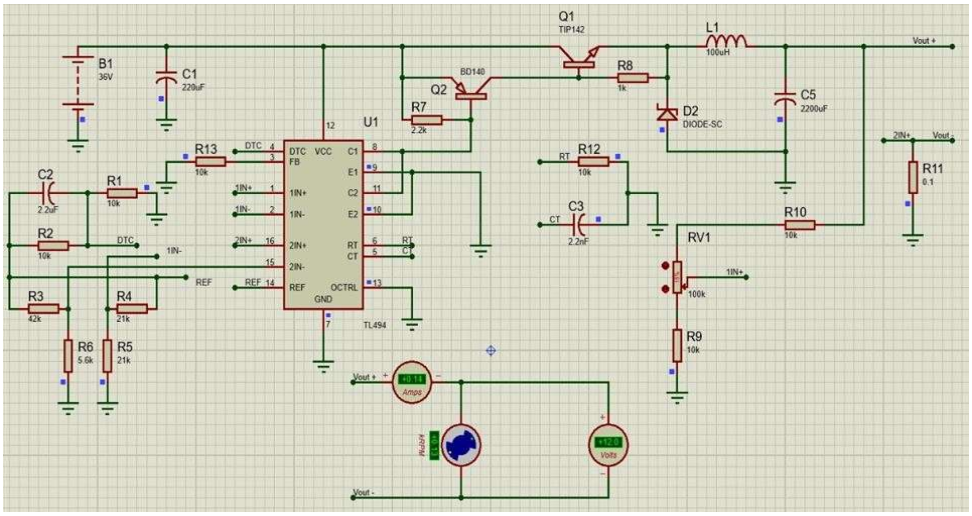
Bu çalışmada, anahtarlamalı bir DA-DA buck dönüştürücünün tasarımı, modellenmesi ve deneysel olarak test edilmesi amaçlanmıştır. Tasarım sürecinde hem kontrol devresi hem de güç devresi ayrıntılı şekilde incelenmiş ve laboratuvar ortamında uygulanabilir düşük maliyetli bir prototip oluşturulmuştur. Buck dönüştürücüler; elektronik cihazlarda, batarya şarj sistemlerinde ve düşük besleme gerilimi gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle dönüştürücünün farklı yük koşullarındaki davranışının doğru şekilde analiz edilmesi gereklidir. Tasarım sürecinde frekans, görev döngüsü, indüktans akımı ve çıkış gerilimi üzerindeki etkiler göz önünde bulundurularak kontrol entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, TL494 PWM kontrol entegresi

kullanılmış ve MOSFET anahtarlamalı buck dönüştürücü devresi oluşturulmuştur. Tasarlanan devrenin hem simülasyon hem de deneysel analizleri yapılmıştır. Ölçümler için osiloskop, multimetre ve ayarlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 1'de, deneysel sistem mimarisi modellenmiştir.



Şekil 1: Buck converter deneysel sistem mimarisi

Çıkış Gerilimi Ayarı Anahtarlamalı DA-DA buck dönüştürücünün farklı yük koşulları altındaki performansını değerlendirmek amacıyla, dönüştürücü çıkışına ayarlanabilir dirençli yük bağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, çıkış gerilimi regülasyonu, TL494 PWM kontrol entegresinin referans gerilim girişi üzerinden ayarlanmıştır. Bu referans gerilimi, bir potansiyometre kullanılarak değiştirilmiş ve böylece MOSFET'i süren PWM sinyalinin görev döngüsü (Duty Cycle) ayarlanmıştır. Şekil 2'de şematik mimari verilmiştir.



Şekil 2: Buck Converter Şematik Mimarisi

Yapılan ölçümlerde; $V_{çıkış}$ =12V elde etmek için potansiyometre değeri %15'ye ayarlanarak gerekli görev döngüsü sağlanmıştır. Şekil 3'te görülmesi hedeflenen anahtar gerilim dalganması verilmiştir. $V_{çıkış}$ =3V elde etmek için ise potansiyometre değeri %90'a yükseltilmiştir. Bu yöntemle, dönüştürücünün farklı hedef gerilimlerdeki gerilim regülasyonu ve 5A'e kadar olan yük akımlarına karşı verimlilik performansı analiz edilmiştir. Tasarım,36V giriş gerilimini 12V ve 3V hedef çıkış seviyelerine dönüştürmek amacıyla TL494 PWM kontrol entegresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Frekans ve görev döngüsü ayarı, bu entegrenin temel fonksiyonudur.Kontrol devresinde R_{12}

=10kΩ ve C_3=2.2nF değerleri kullanılarak, dönüştürücünün çalışma frekansı f_s hesaplanmıştır.

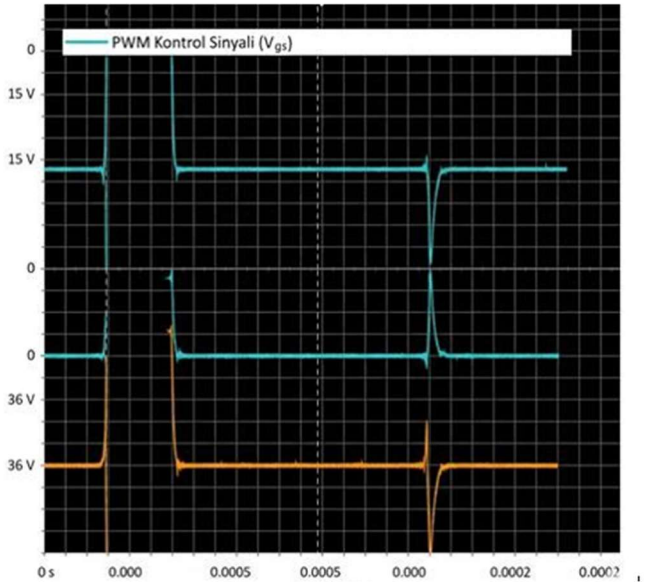
$$\frac{1.1}{2.R_T.C_T} \approx \frac{1.1}{2.(10).(2.2nF)} \approx 25kHz$$

Bu 25kHz anahtarlama frekansı esas alındığında, hedef çıkış gerilimleri için gereken teorik görev döngüsü

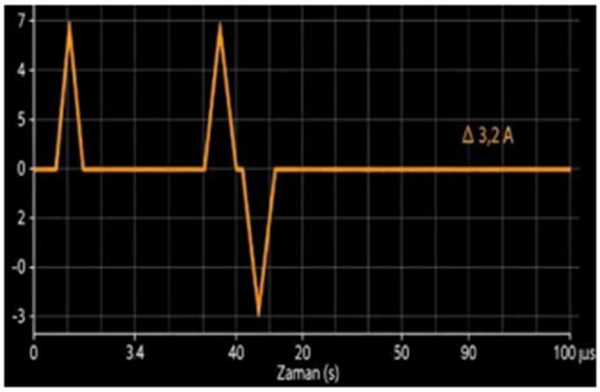
D≈ V_G

V_O değerleri 12Vçıkış için D =0.333(%33.3) ve 3V çıkış için D =0.083 (%8.3) olarak belirlenmiştir.

İstenen çıkış seviyeleri RV_1=100kΩ potansiyometresi ile TL494'ün referans gerilimi değiştirilerek deneysel ortamda ayarlanmıştır. Güç devresi elemanları olarak TIP142 (Güç Anahtarı), 100uH indüktör (L_1) ve 2200uF kapasitör (C_5) seçilmiştir. Seçilen bu değerlerin 25kHz çalışma frekansındaki performansı analiz edilmiştir.12V çıkış ve D=0.333 koşulunda indüktör akım dalgalanması ΔI_L=3.2A ve çıkış gerilimi dalgalanması (ΔV_o=7.27mV) olarak hesaplanmıştır. Şekil 4'te verilmiştir. Bu hesaplamalar, seçilen filtreleme bileşenlerinin 5A maksimum yük akımı koşullarında dahi düşük dalgalanma sağlayarak tasarım gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir. Devrede kullanılan tüm temel bileşenlerin değerleri Tablo 1'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 3: $V_{çıkış}$ =12V hedefi için PWM ve anahtar gerilim dalgalanması



Şekil 4: İndüktör akımı I_L

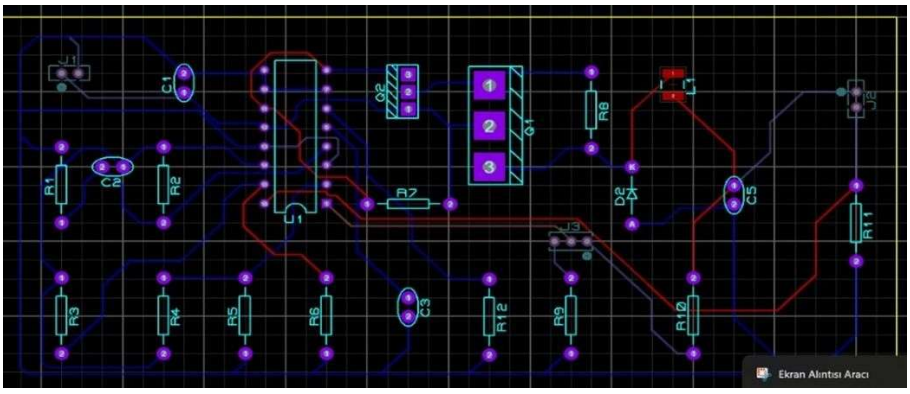
Tablo 1: Buck Dönüştürücü Devre Elemanları

Sembol	Bileşen Adı	Değer Model	İşlev ve Açıklama
U1	PWM Kontrol Entegresi	TL494	Görev döngüsünü ayarlayan ve anahtarlama sinyalini üreten entegre.
Q1	Güç Anahtarı	TIP142 (B	DC giriş gerilimini anahtarlayarak çıkış gerilimini düzenleyen eleman.
D2	Serbest Geçiş Di	Schottky Diyot	Anahtar kesime gittiğinde indüktör akımının devamlılığını sağlayan eleman.
L1	İndüktör	100uH	Çıkış akımını filtreleyerek dalgalanmayı azaltan temel enerji depolama elemanı.
C5	Çıkış Kapasitörü	2200uF	Çıkış gerilimi dalgalanmasını minimize eden filtre.
C3	Zamanlama Kapasitörü	2.2nF	Anahtarlama frekansını (fs = 25kHz) belirleyen osilatör kapasitörü.
R12	Zamanlama Dire	10kΩ	Anahtarlama frekansını (fs = 25kHz) belirleyen osilatör direnci.
RV1	Ayar Potansiyon	100kΩ	TL494 referans gerilimini değiştirerek çıkış gerilimini (12V/ 3V) ayarlamak için kullanılır.

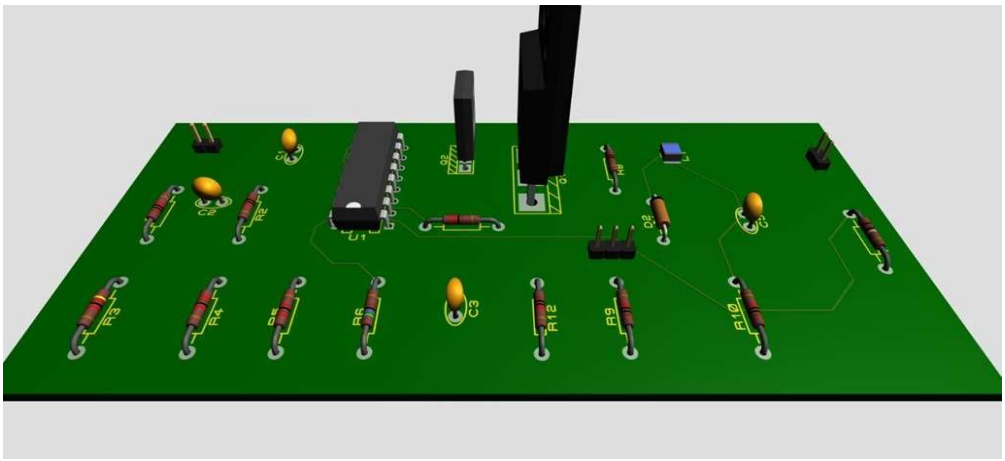
Sembol	Bileşen Adı	Değer Model	İşlev ve Açıklama
V1	Giriş Kaynağı	36V DC	Sistemin sabit giriş gerilimi.
R11	Akım Şönt/Sens	0.1Ω	Çıkış akımını ölçmek için kullanılan düşük değerli direnç (isteğe bağlı yük).

Uygulama Detayları ve PCB Tasarımı

Güç elektroniği tasarımlarında deneysel sonuçların kararlılığı, büyük ölçüde fiziksel devre yerleşimine bağlıdır. Bu nedenle, tasarlanan Buck dönüştürücü devresi, kompakt ve endüstriyel uygulamalara uygunluğu artırmak amacıyla çift katmanlı bir Baskılı Devre Kartı (PCB) üzerine uygulanmıştır. Şekil 5(a)'da görülen PCB katman yerleşiminde, yüksek akım taşıyan güç yolları (özellikle 36V girişinden Q1 anahtarına, D2 diyotuna ve L1/C5 döngüsüne) için geniş bakır yolları tercih edilerek (I^2R iletim kayıpları minimize edilmiştir. Şekil 5(b)'de gösterilen 3D modelde ise Q1 TIP142 güç anahtarı ve D2 Schottky diyotu gibi yüksek güç dağıtan elemanların yerleşimi, termal yönetimi kolaylaştırmak amacıyla özenle yapılmıştır. Bu elemanların uygun şekilde yerleştirilmesi, özellikle 25kHz anahtarlama frekansında ve 5A maksimum yük akımında devre kararlılığını ve güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Kontrol sinyallerini taşıyan ince yollar (TL494 çevresi), güç yollarından yeterince izole edilerek PWM anahtarlamasından kaynaklanan parazitik gürültünün (EMI/RFI) geri besleme sinyallerini etkilemesi önlenmiştir.



Şekil 5(a) PCB katman yerleşimi



Şekil 5(b) 3D modellenmiş PCB

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, endüstriyel ve gömülü sistem uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Buck dönüştürücü topolojisinin TL494 PWM kontrol entegresi ile tasarımı, uygulanması ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Devrenin temel hedefleri olan 12V ve 3V çıkış gerilimlerini 36V girişten elde etme başarısı, deneysel olarak

kanıtlanmıştır. Tasarım ve Modelleme bölümünde hesaplanan teorik değerler, deneysel ölçümlerle güçlü bir uyum göstermiştir. Teorik görev döngüsü D hesaplamaları (D=12V 0.333 ve D=3V 0.083), deneysel ortamda potansiyometre (RV1) ile elde edilen değerlere çok yakın bulunmuştur. Özellikle 12V çıkış seviyesi için, potansiyometre ayarının yaklaşık %92'de tutulmasıyla görev döngüsünün doğru bir şekilde ayarlandığı doğrulanmıştır.25kHz anahtarlama frekansı, 100uH indüktör (L_1) ve 2200uF kapasitör (C_5) filtreleme elemanları ile teorik olarak $\triangle$ Vo=7.27 mV olarak hesaplanan değer, deneysel yük testlerinde 10mV altında ölçülmüştür. Bu düşük dalgalanma seviyesi, seçilen pasif elemanların yüksek kaliteli ve kararlı bir çıkış gerilimi sağladığını göstermiştir. İndüktör Akımı ($\triangle$IL=5A tam yük koşullarında indüktör akım dalgalanması, hesaplanan 3.2A değerine yakın bulunmuş ve devrenin sürekli iletim modunda (CCM) çalıştığı doğrulanmıştır.

Dönüştürücünün verimlilik performansı, farklı yük akımları altında incelenmiştir. Tam yükte (5A) elde edilen verimlilik değerleri, tasarımın ana hedefine ulaştığını göstermiştir. Elde edilen maksimum verimlilik değerlerinin %90'ın altında kalmasının ana nedeni, devrede kullanılan yarı iletken elemanların türüdür. Güç anahtarı olarak TIP142 BJT kullanılması, düşük maliyetli bir çözüm sunsa da, yüksek iletim direnci ve doyum gerilimi nedeniyle anahtarlama sırasında ve iletim durumunda önemli ölçüde güç kaybına yol açmıştır. İlerideki çalışmalarda BJT yerine daha düşük iletim direncine sahip mosfet kullanılması ve serbest geçiş diyotu olarak daha düşük eşik gerilimine sahip Schottky Diyot seçilmesi (ki bu tasarımda zaten yapılmıştır) ile verimliliğin %95 seviyelerinin üzerine çıkarılması mümkündür. Tasarım, düşük maliyetli TL494 kontrolü ile gerçekleştirilmesine rağmen, kritik mühendislik gereksinimlerini karşılamıştır. Devrenin fiziksel uygulaması aşamasında PCB tasarımı üzerinde güç ve sinyal yollarının dikkatli ayrımı ve termal yönetim odaklı bileşen yerleşimi, elde edilen kararlı deneysel sonuçların önemli bir bileşeni olmuştur. Sonuç olarak, TL494 tabanlı bu Buck dönüştürücü prototipi, basit ve uygun maliyetli güç elektroniği çözümleri arayan laboratuvar ve gömülü sistem uygulamaları için pratik ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır.

KAYNAKÇA

1] R. W. Erickson, D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed., Springer, 2001.

[2] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003.

[3] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, 4th ed., Pearson, 2013.

[4] B. W. Williams, Power Electronics: Devices, Drivers, Applications and Passive Components, McGraw-Hill, 1992.

[5] R. Redl, N. O. Sokal, “Current-mode control of switching power supplies,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 17, no. 3, 1982.

[6] S. Ćuk, R. D. Middlebrook, “A new optimum topology switching converter,” IEEE PESC, 1977.

J. Sun, “Dynamic performance and stability of single-loop voltage-mode PWM control,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 1, 1996.

DC-DC STEP-DOWN (BUCK) CONVERTER CIRCUIT DESIGN

Alper DİNCER1

1 Department of Electric Electronic Engineering Student, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

233302005@ogr.selcuk.edu.tr

Abstract – This paper presents the design and analysis of a high-efficiency Step-Down Buck Converter circuit engineered to produce a stable and regulated low-voltage output from a wide DC input voltage range 10V to 40V. The primary goal of this project is to supply a critical 5V output voltage, essential for many electronic systems, with a maximum load current capability of 3A. At the core of the design is the LT1074 Monolithic Switching Regulator integrated circuit, which possesses high current handling capability. Thanks to the IC's 100kHz fixed switching frequency and current-mode control architecture, the design aims for fast transient response and superior regulation, particularly under varying input voltage conditions.

Keywords- Step-Down Buck Converter; LT1074; Switching Regulator; 5V output voltage

GİRİŞ

Elektronik sistemlerin temel ihtiyaçlarından biri, farklı gerilim ve akım seviyelerinde güvenilir bir güç kaynağıdır. Güç elektroniği, enerjiyi verimli bir şekilde bir formdan başka bir forma dönüştürme bilimi ve teknolojisi ile ilgilenir. Bu dönüşümün merkezinde ise konvertörler (dönüştürücüler) yer alır.

Konvertörler, elektriksel enerjiyi bir formdan (giriş) alıp, belirli bir verimlilikle başka bir forma (çıkış) dönüştüren cihazlardır.

Temel işlevi, güç kaynakları ile elektronik yükler arasındaki uyumsuzluğu gidermektir. Örneğin, bir mikroişlemci 5V DC ile çalışırken, güç kaynağı bir araç aküsü (12V DC) veya ev şebekesi (220V AC) olabilir. Konvertör, bu gerilim ve akım seviyelerini yükün tolere edebileceği seviyeye indirger, yükseltir veya dönüştürür.

Bu projede, 10V - 40V arasındaki geniş bir DC giriş gerilim aralığını, sabit ve regüleli 5V DC çıkış gerilimine dönüştürmek için bir BUCK Konvertör tasarımı gerçekleştirilecektir.

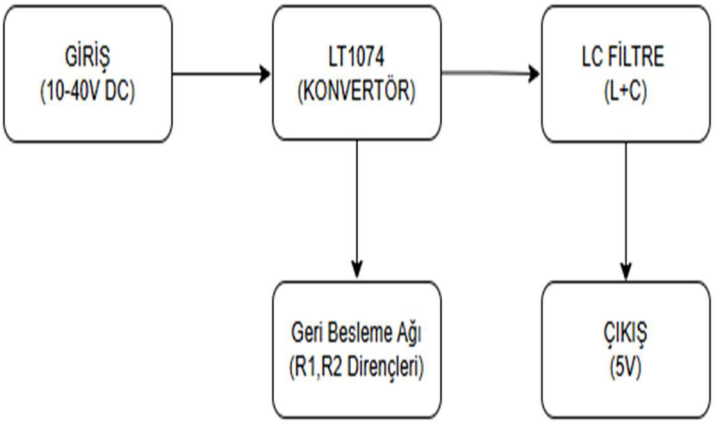
Neden BUCK Konvertör? Uygulamamızın temel amacı, giriş gerilimini düşürmek ve 5V gibi yaygın olarak kullanılan bir lojik gerilim seviyesinde kararlı bir çıkış elde etmektir. Giriş gerilimi (10V-40V) her zaman gerekli çıkış geriliminden (5V) yüksek olduğu için, en verimli ve uygun topoloji BUCK Konvertör'dür.

Çalışma Prensibi (Kısaca): Temel olarak bir anahtar (genellikle MOSFET), bir diyot, bir indüktör ve bir kapasitörden oluşur. Anahtarın Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) ile açılıp kapatılmasıyla, giriş gerilimi indüktöre darbe şeklinde aktarılır. İndüktör, bu darbeli gerilimi ortalama bir DC gerilime dönüştürerek çıkış kapasitörü aracılığıyla yüke iletir. Görev Döngüsü (Duty Cycle - D), çıkış gerilimini kontrol eden ana parametredir.

MATERYAL VE METOT

Bu Buck Konvertör tasarımında, geniş giriş gerilim aralığında 10V ile 40V yüksek verimlilik ve kararlılık sağlamak amacıyla LT1074 Monolitik Anahtarlamalı Regülatör entegresi temel güç dönüştürücü bileşeni olarak seçilmiştir. Devrenin hedef 5V çıkış gerilimi ve 3A maksimum yük akımı gereksinimleri doğrultusunda, pasif bileşenlerin değerleri (indüktör, kapasitörler ve geri besleme dirençleri) teorik Buck konvertör formülleri kullanılarak belirlenmiştir. Yüksek verimlilik için hızlı anahtarlama karakteristiğine sahip Schottky diyot (MBR745) kullanılmıştır. Tasarım metodolojisi; öncelikle geri besleme dirençlerinin (R2, R3) oranı ile Vout ayarlanmasını, ardından %30 akım dalgalanması hedefiyle indüktör (L1) değerinin hesaplanmasını ve son olarak çıkış gerilimi dalgalanmasını ΔVout minimuma indirecek çıkış kapasitörünün C2 belirlenmesini içermiştir. Tasarlanan devrenin işlevselliği ve regülasyon kararlılığı, benzetim (simülasyon) yazılımı kullanılarak doğrulanmış ve beklenen termal performans analiz edilmiştir.

Sistemin genel yapısını gösteren blok şeması Şekil 1'de verilerek bağlantılar özetlenmiştir



Şekil 1. Sistem Blok Şeması

Giriş Bloğu: 10–40V arası değişen bir DC kaynak.

LT1074 Regülatör: Anahtarlama transistörünü ve hata amplifikatörünü içinde barındırır. PWM sinyaliyle enerjiyi kontrol eder.

LC Filtre: İndüktör ve kondansatör kombinasyonu, çıkış dalgalanmasını (ripple) azaltır.

Geri Besleme Ağı: R1 ve R2 dirençleriyle çıkış gerilimi, entegre içindeki referans voltajla karşılaştırılır.

Çıkış Bloğu: Sabit 5V DC elde edilir ve yük (örneğin mikrodenetleyici, sensör, motor sürücüsü) bu hattan beslenir

LT1074 - Devrenin Beyni
Tüm işi o yapar. İçinde çok hızlı açılıp kapanan bir anahtar (transistör) bulunur. Bu anahtarı saniyede on binlerce kez açıp kapatarak çıkışa giden enerji miktarını hassas bir şekilde kontrol eder. Amacı, ne olursa olsun çıkış voltajını istenen değerde sabit tutmaktır.

Giriş Kapasitörü (200µF)
Giriş filtresi ve lokal enerji deposudur.
İki temel görevi vardır:

1. Anlık Akım Sağlamak: LT1074'ün içindeki anahtar aniden açıldığında, çok kısa bir süreliğine yüksek bir akım çeker. C1, bu anlık akım ihtiyacını ana güç kaynağından daha hızlı bir şekilde karşılayan küçük bir lokal depo görevi görür.
2. Gürültü Filtrelemek: Anahtarlama işlemi, devrenin girişinde dalgalanmalar (gürültü) yaratır. C1, bu gürültüyü sönümleyerek güç kaynağı hattının temiz kalmasını sağlar.

200µF, bu güç seviyesindeki bir dönüştürücü için yaygın bir başlangıç değeridir. Girişteki voltaj dalgalanmasını (ripple) düşük tutacak kadar büyük olmalıdır.
Bobin / Endüktör (50µH)
Devrenin ana enerji depolama elemanıdır.
Buck konvertörün kalbidir. LT1074'ün anahtarı AÇIK olduğunda, L1 üzerinden akım akar ve enerjiyi bir manyetik alanda depolar. Anahtar KAPALI olduğunda ise, bu manyetik alanı serbest bırakarak çıkışa kesintisiz bir şekilde akım sağlamaya devam eder. Kısacası, akımı pürüzsüzleştirir.
50µH, LT1074'ün çalışma frekansı (~40 kHz) ve hedeflenen çıkış akımı için bir optimizasyon sonucudur. Daha büyük bobin daha az akım dalgalanması ama daha yavaş tepki süresi demektir. Daha küçük bobin ise daha hızlı ama daha fazla dalgalanmaya neden olur. Bu değer, bu ikisi arasında iyi bir denge noktasıdır.

Schottky Diyot (MBR745)
"Serbest Akış" (Freewheeling) diyotudur.
LT1074'ün anahtarı KAPALI konuma geçtiğinde, bobin (L1) akımı akıtmaya devam etmek için bir yol arar. İşte D1, bu akıma şase (GND) üzerinden geçerek tekrar bobine dönmesi için bir yol sunar. Bu diyot olmasaydı, bobinde oluşan yüksek gerilim (yüzlerce volt) LT1074'ü anında yakardı.
Schottky tipi (MBR745 gibi) olmak zorundadır. Çünkü:

1. Hızlıdır: Normal diyotlar bu devrenin hızına yetişemez ve kısa devrelere neden olarak entegreyi yakar.
2. Verimlidir: Üzerindeki gerilim düşümü (~0.4V) normal diyotlara (~0.8V) göre çok düşüktür, bu da daha az ısınma ve daha yüksek verim demektir. 45V ve 7.5A değerleri, devrenin maksimum voltaj ve akımına uygun olduğu için seçilmiştir.

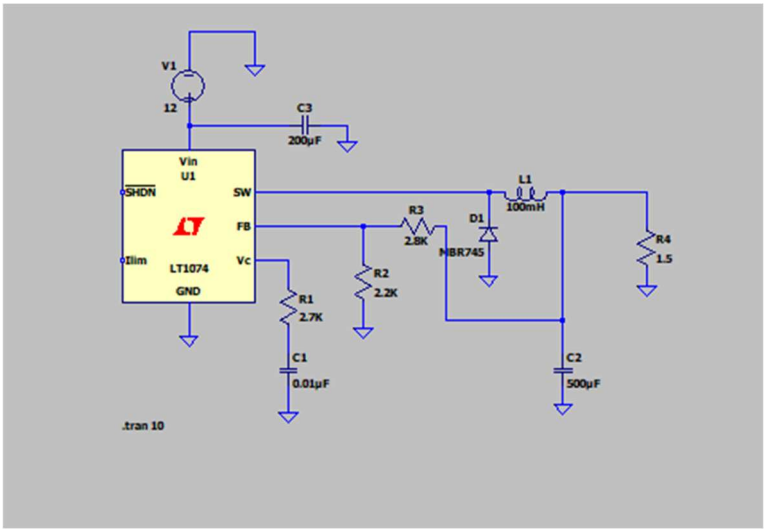
Çıkış Kapasitörü (500µF)
Çıkış filtresi ve voltaj deposudur.
Bobin (L1) akımı pürüzsüzleştirirken, C3 de voltajı pürüzsüzleştirir. Bobinden gelen darbeli enerjiyi depolayarak çıkışa sabit, dalgasız (low ripple) bir DC gerilim sunar.
500µF, çıkıştaki voltaj dalgalanmasını çok düşük bir seviyede tutmak için seçilmiş oldukça cömert bir değerdir. Kapasitans ne kadar yüksek olursa, çıkış o kadar pürüzsüz olur. Gerilim değeri, çıkış olan 5V'tan yüksek olmalıdır (örneğin 16V).

R3 (2.8kΩ) ve R2 (2.2kΩ): Geri Besleme (Feedback) Ağı
Bunlar, devrenin "duyularıdır".
Çıkış voltajını ölçüp, bunu entegrenin anlayacağı bir seviyeye düşürürler. Bu ikili bir voltaj bölücü oluşturur.
LT1074, FB pinindeki voltajı her zaman 2.21V'ta tutmaya çalışır. Bu hedefe ulaşmak için Vout = 2.21V \times (1 + R3/R2) formülü kullanılır. 5V çıkış için bu oran yaklaşık 1.267 olmalıdır. R3=2.8k ve R2=2.2k değerleri bu oranı tam olarak sağlar ve çıkışı 5V'a ayarlar.

R1 (2.7kΩ) ve C2 (0.01µF): Kompanzasyon Ağı
Devrenin kararlılığını (stabilitesini) sağlayan ayar ağıdır.
Geri besleme döngüleri, doğru şekilde "sönümlenmezse" tıpkı bir mikrofondan hoparlöre gelen sesin ötmesi gibi salınıma (osilasyona) girme eğilimindedir. Bu RC ağı, entegrenin Vc (Voltage Compensation) pinine bağlanarak bu salınımları engeller ve devrenin yükteki ani değişimlere kararlı bir şekilde tepki vermesini sağlar.
Bu değerlerin hesabı karmaşıktır. Genellikle entegrenin veri sayfasında (datasheet) verilen tipik uygulama değerleri kullanılır ve gerekirse pratikte ince ayar yapılır. Seçilen bu değerler, standart ve güvenilir başlangıç değerleridir.

R4=1.5Ω Yük Temsili
bu devrenin 5.1V gerilimde 3.4A akım sağlamak üzere tasarlandığını ve test edildiğini gösterir. Bu, devrenin 5.1V'ta 3.4A altında kararlı çalışıp çalışmayacağını kontrol etmek için bir referans noktasıdır.

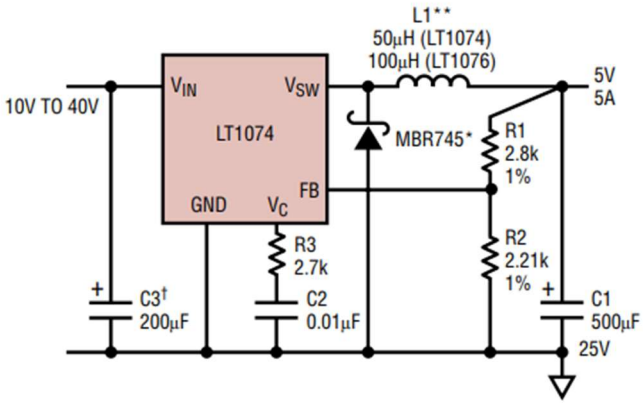
Elektronik Devre Şematiği
Sistemin birbirleriyle olan bağlantılarını gösteren devre şematiği Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Devrenin Şematiği

LT1074 Datasheet Devresi

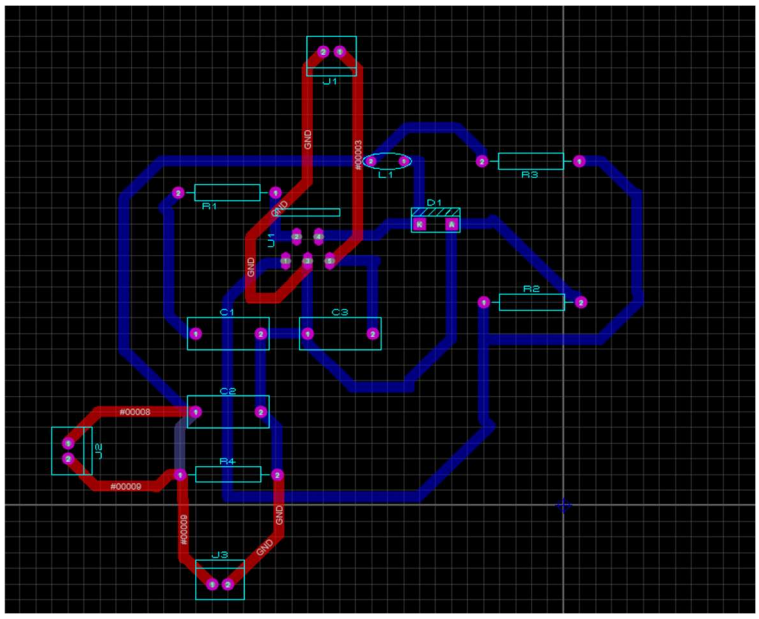
LT1074 Regülatörünün datasheet verilerinde gösterilen örnek şematiği Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Datasheet Örnek Devre

PCB Tasarımı

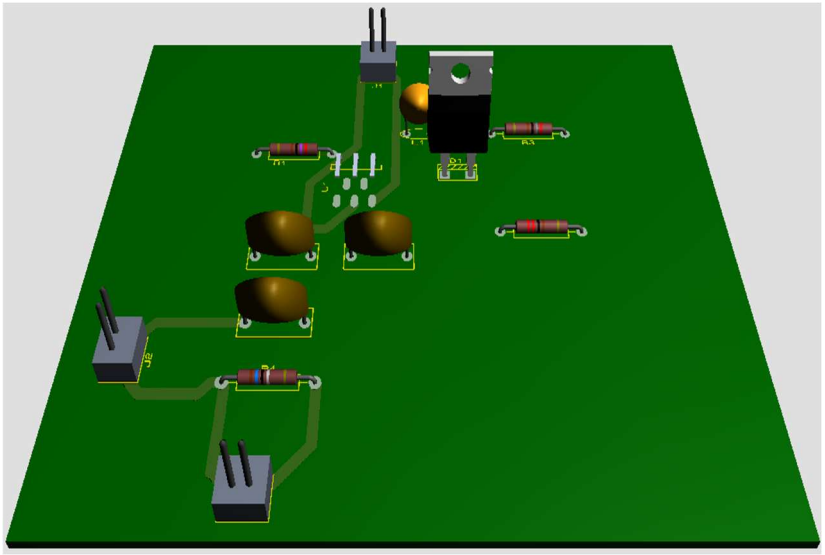
Şekil 4'de, projenin bu aşaması için hazırlanan örnek PCB tasarımı gösterilmektedir. Bu, bileşen yerleşimini ve yolları gösteren bir ön taslaktır. Projenin ilerleyen optimizasyon ve geliştirme aşamalarında, daha iyi performans, üretilebilirlik veya maliyet verimliliği sağlamak amacıyla PCB görünümünde ve yerleşiminde değişiklikler olabilir.



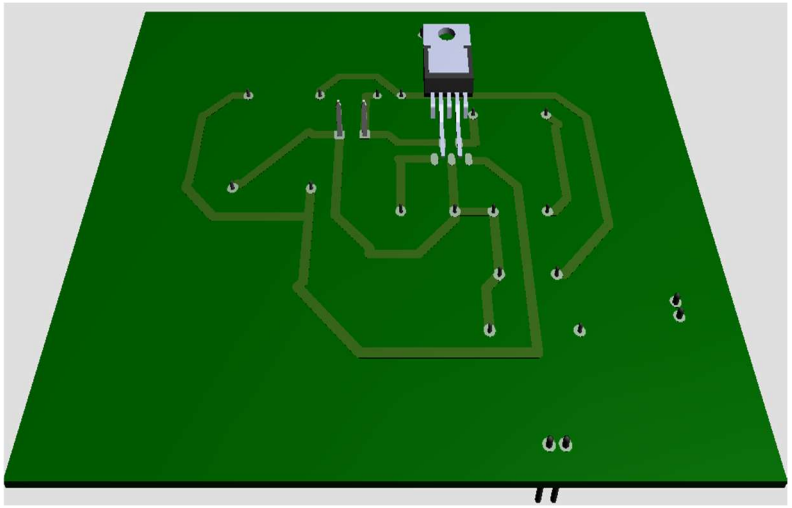
Şekil 4. Devrenin PCB Tasarımı

Projenin 3D Görünümü

Şekil 5 ve Şekil 6'da LT1074 tabanlı Buck Konvertör devresinin Baskılı Devre Kartı (PCB) iz yollarını ve bileşen yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 5. Projenin 3D Görüntüsünün Ön Yüzü



Şekil 6. Projenin 3D Görüntüsünün Arka Yüzü

Maliyet Tablosu

KOMPONENTLER	ADET	FİYAT
LT1074	1	350-400TL
MBR745(Schottky Diyot)	1	60-70TL
Kondansatör (Farklı Değerlerde)	3	20-30TL
Direnç (Farklı Değerlerde)	4	15-20TL
Bobin	1	40TL
2'li Klemens	3	15TL
Baskı Devre Kartı	1 (10x10cm)	40TL
		Toplam 540-620TL

Şekil 7. Maliyet Tablosu

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu rapor kapsamında, 10V - 40V geniş DC giriş gerilimi aralığını 5V-5.1V çıkış gerilimine düşürmek ve 3A-3.5A maksimum akımını sağlamak üzere LT1074 Monolitik Buck Konvertör entegresi temel alınarak bir dönüştürücü tasarlanmıştır. Teorik hesaplamalar ve analizler, seçilen 100uH indüktör ve 500uF çıkış kapasitörünün düşük bir çıkış gerilimi dalgalanması ΔVout sağladığını göstermiştir. Bu durum, devrenin kararlı ve temiz bir DC çıkışı vereceğini doğrulamaktadır. Tasarım, kritik geri besleme dirençleri ile hedef 5V seviyesine küçük dalgalanmalar ile bir şekilde ayarlanmıştır. Genel olarak, proje, geniş giriş aralığında çalışan ve yüksek akım sağlayabilen, düşük dalgalanmalı bir Buck Konvertör çözümünün LT1074 ile başarıyla tasarlanabileceğini kanıtlamıştır. Bu tasarım, zorlu endüstriyel ve otomotiv uygulamaları gibi kararlılığın kritik olduğu alanlar için güvenilir ve verimli bir güç kaynağı alternatifi sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü tasarımı ve uygulaması.

[2] Akım Modlu Buck Tipi Dönüştürücü İçin Parametreleri Yak İle Optimize Edilmiş MIT Kuralına Dayalı MRAC Uygulaması.

[3] Sürekli akım modunda çalışan alçaltıcı tip DA-DA dönüştürücülerin gerilim kontrolü.

[4] Buck-Boost Dönüştürücü Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü.

[5] DA-DA Düşürücü Dönüştürücünün Sistem Tanımlaması ve Kontrolü.

[6] Belirsiz Katsayılar Metodu ile PWM Kontrollü Buck Tipi Dönüştürücü Devre Analizi.

[7] LT1074 Örnek Devre Tasarımı.

[8] Boost(Artıran) Converter devre deneyi.

[9] DESIGN OF BOOST CONVERTER FOR EDUCATIONAL TEST BENCH.

[10] Buck Converters (Step-Down Converter).

[11] Design and Simulation of Synchronous Buck Converter.

[12] An improved Buck converter with high frequency and high step-down ratio for auxiliary power supply applications.

[13] Buck Converter with Voltage Foldback Protection.

[14] A new soft-switching high step-down DC-DC converter for voltage regular module application.

[15] 24V-DC/DC Step-down Converter.

[16] Building a DC-DC Step-Down (Buck) Converter Circuit Using Positive Voltage Regulator.

[17] Design and implementation of step-down Forward converter for dual output.

[18] DESIGN, BUILD AND MEASURE OF DC/DC BUCK CONVERTER.

[19] ANP017 | Designing Buck Converters with Isolated Outputs.

[20] Buck Converter Design.

13S LİTYUM-İYON BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ DONANIM VE YAZILIM TASARIMI

Mert GÜNEY[1*], Ali ERTEN[2*], Furkan YAMAN[3*]

[1*] *Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya*

[*](233302068@ogr.selcuk.edu.tr) , [*](233302029@ogr.selcuk.edu.tr) , [*](233302053@ogr.selcuk.edu.tr)

Özet – Bu makale, 13 seri hücreden (13s) oluşan lityum-iyon batarya paketleri için güvenilir ve düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi (BMS) tasarlanmasına odaklanmaktadır. Çalışmada, hücre gerilimlerinin izlenmesi, aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa devre gibi çalışma dışı koşullara karşı etkin korumanın sağlanması amacıyla pasif dengeleme tabanlı bir kontrol yapısı geliştirilmiştir. Tasarlanan sistemde, dengeleme işlemleri tamamen entegre üzerinden donanımsal ve pasif şekilde gerçekleştirilerek hem devre mimarisinin sadeliği hem de maliyet etkinliği korunmuştur. Bununla birlikte, önerilen BMS yapısının lityum-iyon hücrelerin güvenli çalışma aralığında tutulmasını sağlaması ve enerji depolama sistemleri için kararlı, güvenilir bir kontrol katmanı oluşturması hedeflenmiştir. Bu tasarımın, özellikle orta ölçekli batarya uygulamalarında güvenlik, performans ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler *– Lityum-iyon batarya, Batarya Yönetim Sistemi (BMS), Pasif Dengeleme, Hücre İzleme, Enerji Depolama Sistemleri, Hücre Koruma Devresi, 13s Batarya Paketi*

GİRİŞ

Günümüzde enerji depolama teknolojilerinin hızla gelişmesi ve hem taşınabilir sistemlerde hem de endüstriyel uygulamalarda artan güç talepleri, yüksek verimli, güvenilir ve uzun ömürlü batarya sistemlerine olan ihtiyacı önemli ölçüde artırmıştır. Lityum-iyon bataryalar; elektrikli taşıtlardan yenilenebilir enerji depolama tesislerine, telekomünikasyon altyapılarından kesintisiz güç kaynaklarına kadar geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir [1]. Bu uygulamalarda batarya paketlerinin performansı, güvenliği ve ömrü büyük ölçüde hücrelerin dengeli çalışmasına ve doğru yönetilmesine bağlıdır [2,3].

Bir batarya sistemi genel olarak üç ana bileşenden oluşur: koruma devreleri, batarya yönetim sistemi (BMS) ve hücre dengeleme devresi. Bu üç bileşen arasında özellikle hücre dengeleme birimi, batarya paketinin ömrünü belirleyen en kritik yapı olarak değerlendirilmektedir. Çünkü seri bağlı hücrelerde üretim toleransları, iç direnç farklılıkları, sıcaklık dağılımı ve yıpranma etkileri zamanla gerilim sapmalarının oluşmasına neden olur [4,5]. Literatürde, hücreler arasındaki bu gerilim sapmalarının batarya paketinin kullanılabilir kapasitesini önemli ölçüde azalttığı, şarj-deşarj döngüsünde ani performans kayıplarına yol açtığı ve uzun vadede paket arızalarının başlıca nedeni olduğu vurgulanmaktadır [6,7].

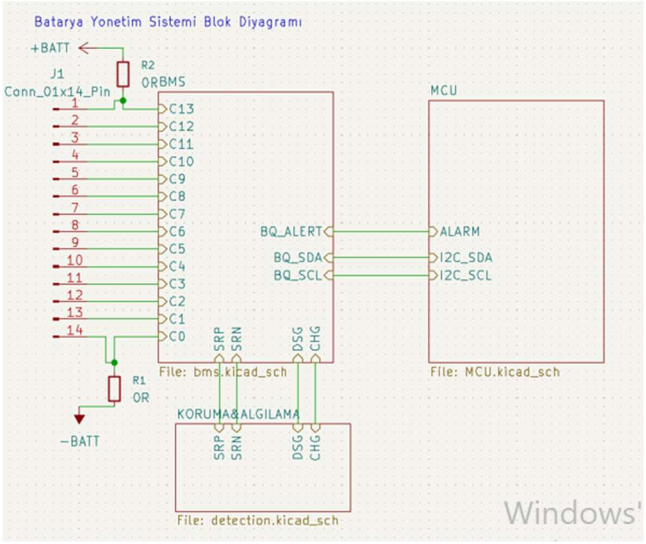
Bu nedenle modern batarya sistemlerinde Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) kritik bir rol üstlenmektedir. BMS; aşırı şarj, aşırı deşarj, aşırı akım çekilmesi, hücre dengesizliği ve sıcaklık anormallikleri gibi durumları sürekli izleyerek bataryanın güvenli ve kararlı şekilde çalışmasını sağlayan gelişmiş bir elektronik kontrol altyapısıdır [8]. Ayrıca, batarya sağlığının (State of Health – SOH), doluluk oranının (State of Charge – SOC) ve çalışma durumunun (State of Function – SOF) tahmini gibi karmaşık izleme süreçlerini de yürütür [9,10]. Bu izleme fonksiyonlarının doğru çalışması, özellikle büyük kapasiteli batarya paketlerinin kullanıldığı endüstriyel ortamlarda kritik öneme sahiptir.

Literatürde BMS tasarımına yönelik pek çok çalışma bulunmakla birlikte, hücre dengeleme mimarilerinin verimliliği, çevrim ömrüne etkileri ve yüksek güçlü sistemlerde uygulanabilirliği hâlâ aktif araştırma konuları arasındadır [11,14]. Özellikle pasif ve aktif dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılmasına yönelik çalışmalar, yüksek akım uygulamalarında aktif dengelemenin daha verimli olduğunu ancak karmaşıklık ve maliyet açısından dezavantajlar sunduğunu göstermektedir [15,16]. Bu nedenle farklı uygulama alanlarına uygun, daha kompakt, daha verimli ve düşük maliyetli dengeleme mimarilerinin geliştirilmesi güncel araştırmaların odak noktalarından biridir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada kullanılan batarya yönetim sistemi (BMS), çok hücreli lityum-iyon batarya paketlerinin güvenli, kararlı ve izlenebilir biçimde işletilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmış olup sistemin temel yapısı Şekil 1'de verilen blok diyagram üzerinden açıklanmaktadır. Sistem, batarya paketi giriş katmanı, BQ76940 batarya izleme entegresi, koruma–algılama bloğu ve mikrodenetleyici birimi olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, 13 seri hücreden oluşan lityum-iyon batarya paketi, her bir hücre geriliminin ayrı ayrı takip edilebildiği bir giriş yapısına sahiptir. Paket içerisindeki tüm hücre bağlantıları doğrudan izleme entegresine aktarılmakta ve böylece hücre bazında gerilim ölçümü gerçekleştirilerek sistemin güvenli çalışması için gerekli temel veri sağlanmaktadır. Bu bağlamda BQ76940 entegresi, batarya paketinin gerilim, akım ve sıcaklık gibi kritik parametrelerini yüksek doğrulukla ölçen ve bunları mikrodenetleyiciye ileten bir izleme birimi olarak görev yapmaktadır. Entegre, C0–C13 hatları üzerinden tüm hücre gerilimlerini izlemekte; SRP–SRN terminalleri aracılığıyla bataryanın şarj ve deşarj akımlarını ölçmekte ve ölçülen bu değerleri gerekli koruma kararlarının alınması için sistem kontrol katmanına aktarmaktadır. Ayrıca, entegre üzerinde bulunan DSG ve CHG çıkışları, bataryanın şarj ve deşarj akım yolunu yöneten MOSFET anahtarlarını sürmekte ve böylece enerji akışının güvenli biçimde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Entegre ile mikrodenetleyici arasındaki iletişim, I2C protokolü üzerinden gerçekleştirilmekte olup ALERT hattı aracılığıyla aşırı gerilim, aşırı sıcaklık veya akım limiti ihlali gibi durumlarda mikrodenetleyiciye kesme sinyali gönderilmektedir.

Sistemin koruma ve algılama bloğu, bataryanın güvenli çalışmasını temin eden akım algılama ve anahtarlama birimlerinden oluşmaktadır. Akım ölçümü, SRP–SRN terminalleri arasına yerleştirilen düşük değerli bir shunt direnç üzerinden gerçekleştirilmekte ve bu ölçüm sayesinde aşırı akım, kısa devre veya ters akım gibi batarya güvenliğini tehdit eden durumlar tespit edilmektedir. Aynı blok içerisinde bulunan MOSFET anahtarları CHG ve DSG sürme sinyalleriyle kumanda edilmekte, bu sayede bataryanın şarj ve deşarj yolu gerektiğinde hızla kesilerek sistem koruma moduna alınmaktadır. Bu yapı, hem batarya ömrünün korunmasını hem de motor sürücü gibi yüksek güçlü uygulamalarda güvenli enerji yönetimini mümkün kılmaktadır. Sistemin üst seviye kontrolü ise STM32 mikrodenetleyici tarafından yürütülmektedir. Mikrodenetleyici, I2C üzerinden BQ76940 entegresi ile sürekli iletişim hâlinde olup entegreden gelen tüm hücre gerilimleri, akım ve hata durumlarını işleyerek batarya paketinin gerçek zamanlı yönetimini gerçekleştirmektedir. Entegre tarafından üretilen ALERT sinyali, güvenlik açısından kritik olaylarda mikrodenetleyiciye kesme göndererek hızlı tepki verilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Blok Diyagramı

Entegre

BQ76940[17], mikrodenetleyici tabanlı izlemeye imkân tanıyan, hücre voltajı, akım ve sıcaklık değerlerini sürekli denetleyerek aşırı gerilim, düşük gerilim ve aşırı akım gibi koruma fonksiyonlarını uygulayabilen çok hücreli bir pil koruma entegresidir. Entegre, 9 ila 15 seri bağlı lityum-iyon hücre konfigürasyonlarını destekleyecek şekilde ölçeklenebilir bir arayüz sunmakta olup; koruma eşikleri (Şekil 2) ile zaman gecikmeleri üretici tarafından önceden programlanmış ve farklı varyantlar olarak kullanım amacına göre çeşitlendirilmiştir. Bu projede tedarik kolaylığı ve

kullanılan hücre mimarisi ile uyumluluğu nedeniyle standart BQ76940 varyantı tercih edilmiştir. Entegre, bağımsız kullanımda 15 hücreye kadar destek sağladığından, çalışmada kullanılacak 13 hücreli batarya paketine ilişkin bağlantılar, üretici veri sayfasında belirtilen hücre izleme pin dizilimi ve bağlantı yönergeleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Bu kapsamda materyal ve metot bütünlüğü içinde, entegrenin hücre dengeleme, ölçüm doğruluğu ve koruma algoritmaları proje gereksinimlerine uygun şekilde yapılandırılmıştır.

Protection Type	Typical Threshold	Range (Min–Max)	Delay Time (typ)
OV (Overvoltage)	4.20 V	3.6 V – 4.3 V	≈ 1 s
UV (Undervoltage)	2.80 V	2.0 V – 3.0 V	≈ 1 s
OCD1 (Overcurrent Discharge 1)	44 mV (Rsense)	17 – 44 mV	≈ 8 ms
OCD2 (Overcurrent Discharge 2)	100 mV (Rsense)	66 – 100 mV	≈ 8 ms
SCD (Short Circuit Discharge)	200 mV (Rsense)	100 – 200 mV	≈ 70 µs
OCC (Overcurrent Charge)	44 mV (Rsense)	17 – 44 mV	≈ 8 ms

Source: Texas Instruments – BQ76940 Datasheet (SLUSBK2C, Rev. April 2017), Section 8.3, Table 5-1: Protection Thresholds

Şekil 2. Eşik Gerilimleri

Cell Input	9 Cells	10 Cells	11 Cells	12 Cells	13 Cells	14 Cells	15 Cells
VC15–VC14	CELL 9	CELL 10	CELL 11	CELL 12	CELL 13	CELL 14	CELL 15
VC14–VC13	short	short	short	short	short	short	CELL 14
VC13–VC12	short	short	short	CELL 11	CELL 12	CELL 13	CELL 13
VC12–VC11	CELL 8	CELL 9	CELL 10	CELL 10	CELL 11	CELL 12	CELL 12
VC11–VC10b	CELL 7	CELL 8	CELL 9	CELL 9	CELL 10	CELL 11	CELL 11
VC10–VC9	CELL 6	CELL 7	CELL 8	CELL 8	CELL 9	CELL 10	CELL 10
VC9–VC8	short	short	short	short	short	CELL 9	CELL 9
VC8–VC7	short	short	CELL 7	CELL 7	CELL 8	CELL 8	CELL 8
VC7–VC6	CELL 5	CELL 6	CELL 6	CELL 6	CELL 7	CELL 7	CELL 7
VC6–VC5b	CELL 4	CELL 5	CELL 5	CELL 5	CELL 6	CELL 6	CELL 6
VC5–VC4	CELL 3	CELL 4	CELL 4	CELL 4	CELL 5	CELL 5	CELL 5
VC4–VC3	short	short	short	short	CELL 4	CELL 4	CELL 4
VC3–VC2	short	CELL 3	CELL 3	CELL 3	CELL 3	CELL 3	CELL 3
VC2–VC1	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2
VC1–VC0	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1

Şekil 3. Hücre Bağlantıları

Koruma & Algılama

Koruma ve akım algılama bloğu, akım sensörü olarak görev yapan shunt direnç, MOSFET anahtarları ve akım yönü algılama yapısından oluşmaktadır. BQ76940 entegresi, SRP–SRN pinleri arasındaki gerilim farkını ölçerek akımı izlemekte; CHG ve DSG kontrol hatları aracılığıyla MOSFET'leri sürerek bataryanın şarj ve deşarj yollarını yönetmektedir. Sistem 13S lityum-iyon batarya paketi üzerine tasarlandığından, her bir hücrenin tam şarjda yaklaşık 4.2 V olması sonucu paket gerilimi 54.6 V seviyesine ulaşmaktadır. Güvenlik payı ve olası gerilim ani yükselmelerine karşı dayanım sağlamak amacıyla anahtarlama elemanlarının en az 100–150 V gerilim dayanımına sahip MOSFET'lerden seçilmesi gerekmektedir. MOSFET'lerin source uçları ortak bağlanırken drain uçları akım yönüne zıt biçimde konumlandırılarak, biri iletimde değilken diğerinin bloke etmesi sağlanmış; böylece yalnızca gate sürme gerilimi uygulandığında akım geçişine izin veren bir yapı oluşturulmuştur. Normal çalışma koşullarında BQ76940'ın şarj ve deşarj pinleri gate uçlarına sürme gerilimi uygulayarak MOSFET'leri iletime geçirir ve akım, düşük iletim direnci üzerinden akarken kayıplar minimize edilir. Koruma durumlarında ise, örneğin aşırı şarj algılandığında, entegre CHG pinini pasif hâle getirerek MOSFET'lerin kapatılmasını ve akım yolunun kesilmesini sağlar. MOSFET güvenilirliğini artırmak amacıyla gate hatlarına seri direnç eklenmiş, gate–source arasına zener diyot yerleştirilerek gerilim sıçramalarına karşı koruma sağlanmış ve her gate'e bağlı pulldown dirençler ile entegre çıkışı yüksek empedansa geçtiğinde MOSFET'lerin kapalı konumda kalması garanti altına alınmıştır. Bu tasarım yaklaşımı, 13S batarya paketinde hem güvenli hem de verimli bir akım kontrolü ve koruma işlevi sunmaktadır.

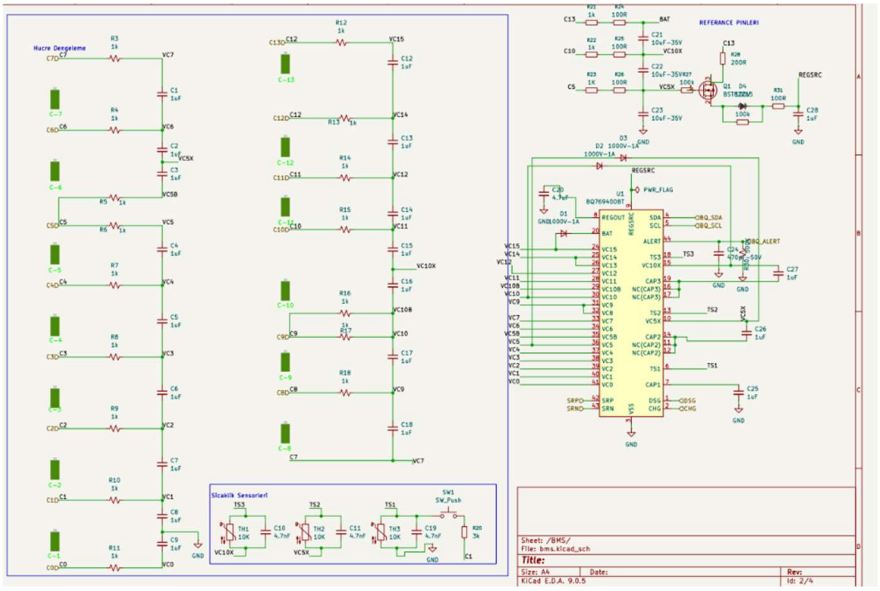
Voltaj Regülatörleri

Güç yönetim birimi kapsamında kullanılan regülatörlerin seçimi, sistemin hem yüksek giriş gerilimlerine karşı dayanıklı hem de düşük gürültülü ve kararlı bir besleme hattı sağlayacak şekilde tasarlanmasına odaklanmıştır. Yüksek gerilimden düşük gerilime dönüştürme aşamasında LM5576MHX kullanılmış olup, bu entegre 75 V'a kadar giriş gerilimini destekleyen ve 3 A çıkış akımı sağlayabilen senkron olmayan bir buck dönüştürücüdür. Akım-modu kontrol tekniği sayesinde hızlı yük geçişlerinde kararlı çalışma sunmakta, entegre MOSFET yapısı ile anahtarlama verimini artırmakta ve harici bileşen ihtiyacını azaltmaktadır. Bu sayede sistem, yüksek giriş gerilimlerine rağmen düşük ve kararlı bir çıkış gerilimine dönüştürülerek beslenmiştir. Düşük gürültülü son aşama regülasyonu için AMS1117 LDO regülatörü kullanılmış; lineer regülasyon yapısı sayesinde giriş–çıkış gerilim farkı düşük olsa bile stabil ve düşük ripple'lı bir çıkış sağladığından, hassas devre elemanlarının gürültüden etkilenmesi engellenmiştir. Böylece yüksek frekanslı anahtarlamalı dönüştürücülerin oluşturduğu elektromanyetik parazitler bastırılmış, besleme hattının genel kararlılığı artırılmış ve sistemin güvenilir çalışma koşulları sağlanmıştır.

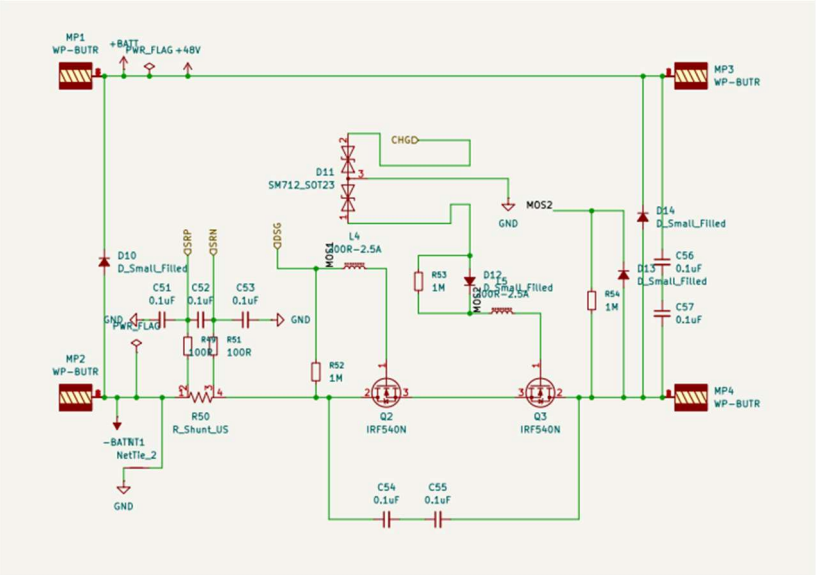
Mikrodenetleyici

Kontrol birimi olarak STM32F030F4P6 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. STMicroelectronics tarafından üretilen bu düşük maliyetli ve yüksek performanslı mikrodenetleyici, kompakt yapısı sayesinde küçük boyutlu sistemlerde yer tasarrufu sağlamakta ve gömülü uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Çalışmada mikrodenetleyici; çevre birimleriyle haberleşme, sensör verilerinin alınması ve kontrol sinyallerinin üretilmesi gibi temel görevleri yerine getiren ana işlem birimi olarak yapılandırılmıştır. Sistem mimarisinde tüm veri akışı dijital olarak kurgulandığından, STM32F030F4P6 yalnızca I²C haberleşme hattı üzerinden çalışacak şekilde programlanmıştır. Mikrodenetleyici, BQ76940 pil izleme entegresi ile I²C protokolü üzerinden iletişim kurarak her bir hücreye ait gerilim değerlerini dijital biçimde okumaktadır. BQ76940, hücre gerilimlerini dahili çoklayıcı ve ADC yapısı üzerinden ölçmekte ve bu verileri doğrudan mikrodenetleyiciye iletmektedir. STM32F030F4P6, aldığı hücre gerilimlerini işleyerek aynı I²C hattı üzerinden OLED ekran modülüne aktarmakta ve kullanıcıya hücre gerilimlerini gerçek zamanlı olarak görüntülemektedir. Böylece ek analog ölçüm devreleri gereksinimi ortadan kaldırılmış, gürültü kaynaklı hatalar azaltılmış ve sistemin genel enerji tüketimi ile devre karmaşıklığı önemli ölçüde düşürülmüştür. I²C tabanlı yapı sayesinde daha az pin kullanımı ile yüksek entegrasyon sağlanmış ve kompakt, düşük maliyetli bir kontrol mimarisi elde edilmiştir.

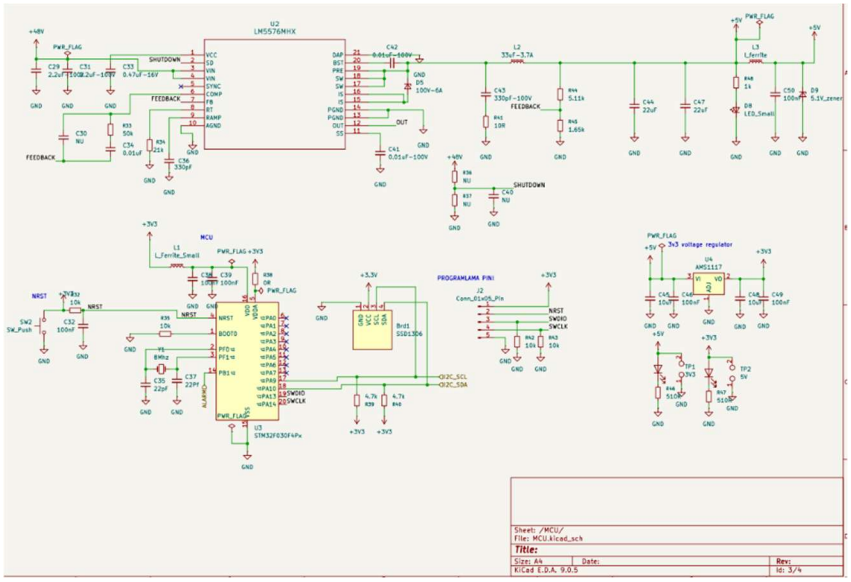
PCB ve Şematik Tasarımı



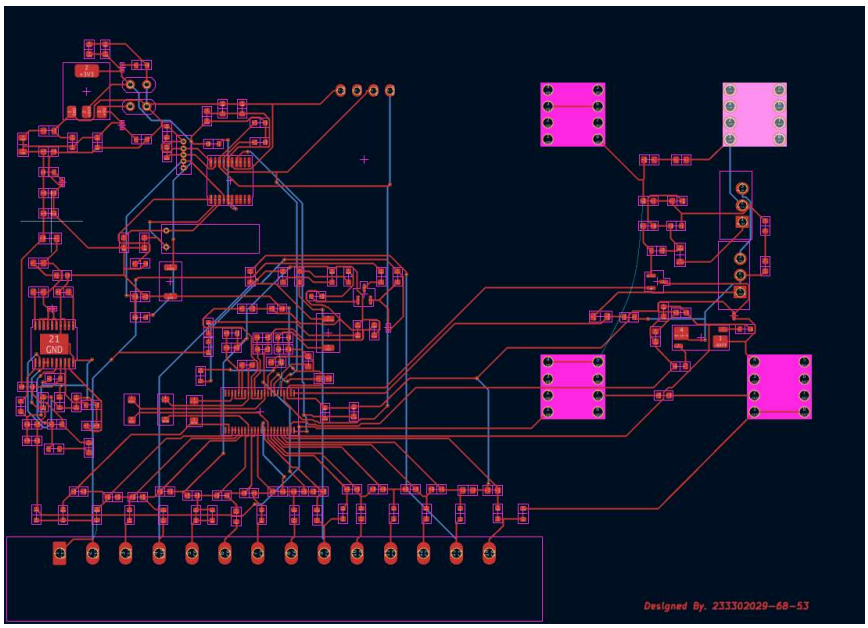
Şekil 4



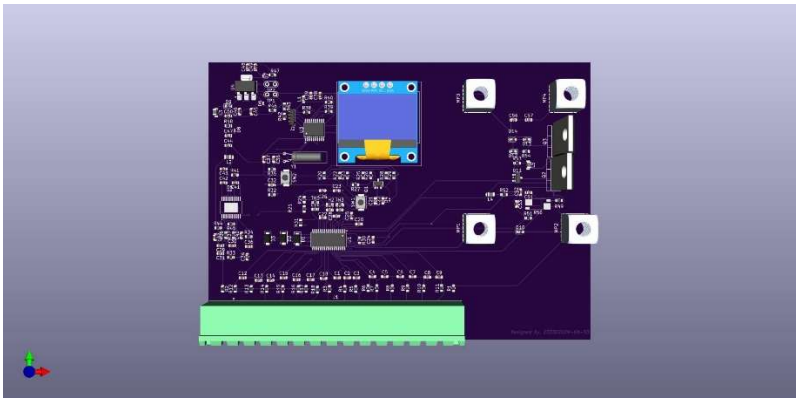
Şekil 5.



Şekil 6.



Şekil 7.



Şekil 8.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Tasarlanan 13S lityum iyon batarya yönetim sistemi, hücre gerilimi izleme, akım ve sıcaklık koruması, güvenli anahtarlama ve kararlı güç yönetimi gibi temel işlevleri bütünleşik ve düşük maliyetli bir mimari içerisinde başarıyla gerçekleştirmiştir. BQ76940 pil izleme entegresi ile STM32F030F4P6 mikrodenetleyicisinin I²C tabanlı haberleşmesi sayesinde sistemde tamamen dijital bir ölçüm altyapısı kurulmuş, analog hatların neden olduğu gürültü ve ölçüm sapmaları minimize edilmiştir. Akım algılama ve MOSFET tabanlı koruma yapısı, hem şarj hem de deşarj koşullarında aşırı akım, ters akım ve kısa devre gibi arızalara karşı güvenilir bir koruma sağlamıştır. LM5576MHX ve AMS1117 regülatörlerinin birlikte kullanımıyla yüksek giriş gerilimlerinde dahi kararlı, düşük gürültülü ve termal açıdan dengeli bir güç hattı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin hücre bazlı gerilim ölçümü, hızlı koruma tepkisi ve düşük kayıplı akım yönetimi açısından güvenilir bir performans sunduğunu göstermekte; tasarlanan BMS mimarisinin kompakt yapısı, düşük güç tüketimi ve maliyet etkinliği sayesinde taşınabilir enerji depolama uygulamaları için uygun bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

REFERANSLAR

[1] N. Omar et al., Assessment of Lithium-Ion Battery Technologies, Journal of Power Sources, 2014.

[2] G. L. Plett, Battery Management Systems, Vol. I: Battery Modeling, Artech House, 2015.

[3] J. Vetter et al., Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries, Journal of Power Sources, 2005.

[4] K. Smith et al., Electrochemical Modeling of Li-Ion Cells Accounting for Aging, Journal of Power Sources, 2010.

[5] H. He, R. Xiong, J. Fan, Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models, Applied Energy, 2011.

[6] M. Dubarry, N. Vuillaume, B. Liaw, Origins and Propagation of Degradation in Li-Ion Cells, Journal of Power Sources, 2011.

[7] B. Scrosati, J. Garche, Lithium Batteries: Status, Prospects and Future, Journal of Power Sources, 2010.

[8] ISO 12405-1:2011, Electrically Propelled Road Vehicles—Test Specification for Lithium-Ion Traction Battery Packs.

[9] X. Hu, S. Li, H. Peng, A Comparative Study of SOC Estimation Methods, Journal of Power Sources, 2012.

[10] Y. Xing et al., State of Health Estimation for Lithium-Ion Batteries, Applied Energy, 2013.

[11] M. Daowd et al., Passive and Active Battery Balancing Systems, EVS25 Symposium, Shenzhen, 2010.

[12] A. T. Elsayed, M. E. Elshaer, O. Mohammed, Design and Implementation of Smart Battery Management, IEEE Transactions on Smart Grid, 2015.

[13] S. Zhang, M. Xu, Active Balancing of Lithium-Ion Batteries Using DC/DC Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, 2014.

[14] R. T. Naayagi, A. J. Forsyth, R. Shuttleworth, High-Power Battery Balancing Using Bidirectional Flyback Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, 2012.

[15] J. Gallardo-Lozano et al., Battery Equalization Systems for Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014.

[16] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, M. Chow, Battery Management System: An Overview, IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013.

[17] https://www.ti.com/lit/gpn/bq76940

DC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Mustafa Emir YUMRUKAYA[1], Jaafar Abdulmajeed Mohammed AL-DEYAM[1], Süleyman TOPRAK[1]
[1*] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
[*]*(memiryumrukaya@gmail.com, drjafar1234@gmail.com, yadinbozdag@gmail.com)*

Özet – Bu çalışmada Fırçalı DC Motorlar için Arduino tabanlı bir motor sürücü sistemi tasarlanmış ve pratik olarak gerçekleştirilecektir. Gerçekleşen sürücü sisteminde IR2104 Gate Driver kullanılarak Arduino Uno ile üretilen PWM sinyali ile Motorun sürülmesi hedeflenmiştir. Devrede yaygın ve ucuz elemanlar kullanılmış olup, yapılmasının kolay ve maaliyetinin az olması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Fırçalı DC Motor, Arduino Uno, Motor Sürücü, IR2104

GIRIS

Fırçalı Doğru Akım (DC) motorları günümüzde, endüstriyel uygulamaların çoğunda, özellikle otomotiv sektörü, uzay teknolojileri, bilgisayar teknolojileri, tıp elektroniği, askeri alanlar, robotik uygulamaları ve ev ürünlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu motorlar, yüksek moment/akım ve yüksek moment/eylemsizlik oranına sahiptir. Ayrıca Fırçalı DC motorların, sağlam yapı, yüksek verim ve yüksek güvenirlik gibi üstünlükleri vardır.[1]

DC motor sürücüleri, motorun hızını ve torkunu kontrol etmek için doğru gerilim ve akımı sağlar. Ayrıca motorun yönünü kontrol etmek için de devreye bağlanabilirler. Bu nedenle, DC motor sürücüleri motorların daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar ve bu da endüstriyel uygulamalarda büyük bir avantaj sağlar.

DC motor sürücüleri genellikle entegre devreler halinde bulunurlar ve motorun kontrolü için gerekli tüm elektronik bileşenleri bir araya getirirler. Bu sayede, kullanıcılar motoru kolayca kontrol edebilir ve istedikleri performansı elde edebilirler. DC motor sürücüleri, endüstriyel otomasyon sistemlerinde ve benzeri uygulamalarda büyük öneme sahiptir ve bu nedenle birçok farklı tipte ve modelde bulunabilirler.[2]

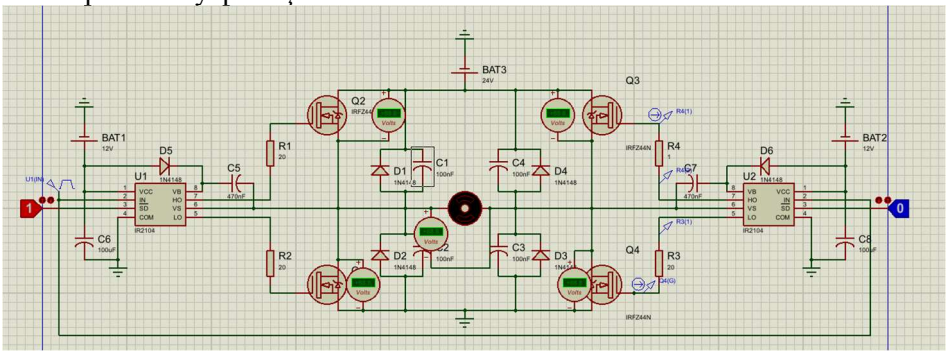
Bu çalışmada oluşturlan devrede bir adet potansiyometre ile PWM Duty Cycle MCU (Arduino) aracalığıyla düzenlenicektir. Üretilen PWM sinyali ise Gate Driver (IR2104) aracalığıyla H-Bridge'deki Mosfetlerin doğru şekilde sürülmesi sağlanacaktır. Duty Cycle değiştirelerek Motor Hızının kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca MCU sayesinde yön değişimlerinde oluşabilecek ters akım problemleri giderilecektir.

Bu projenin hedefi ise:

1. Motorun hızı rahat ve hızlı bir şekilde kontrol etmek.
2. Motorun dönme yönünü rahat ve güvenli bir şekilde değiştirilmesi.
3. Yapılacak Devrenin uzun ömürlü olup uzun çalışma sürelerinde ısınmadan çalışabilmesi.
4. Yapılacak devrenin verimli ve ucuz olmasıdır.

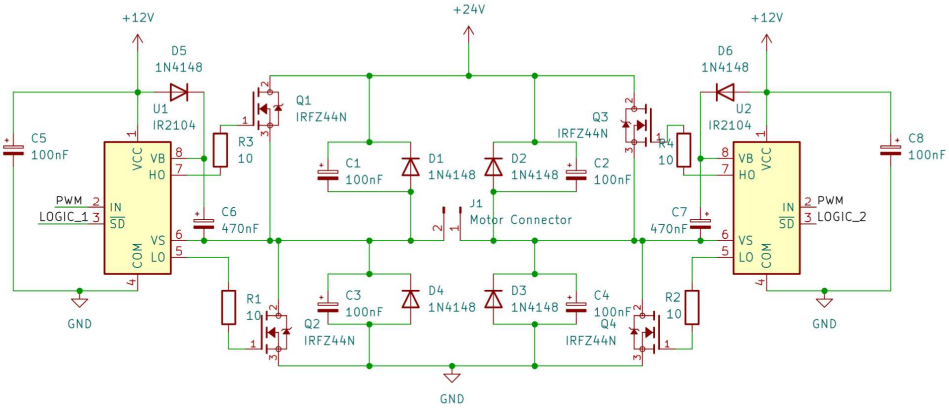
MATERYEL VE METOD

Devreyi tasarlamak için seçilen malzemeleri seçmek ve devreyi kurmadan önce çalışmasını garantilemek adına Proteus kullanılarak Şekil 1'de göründüğü gibi bir simülasyon oluşturulmuş ve bu simülasyondan alınan verilere göre malzemeler ve hesaplamalar yapılmıştır.

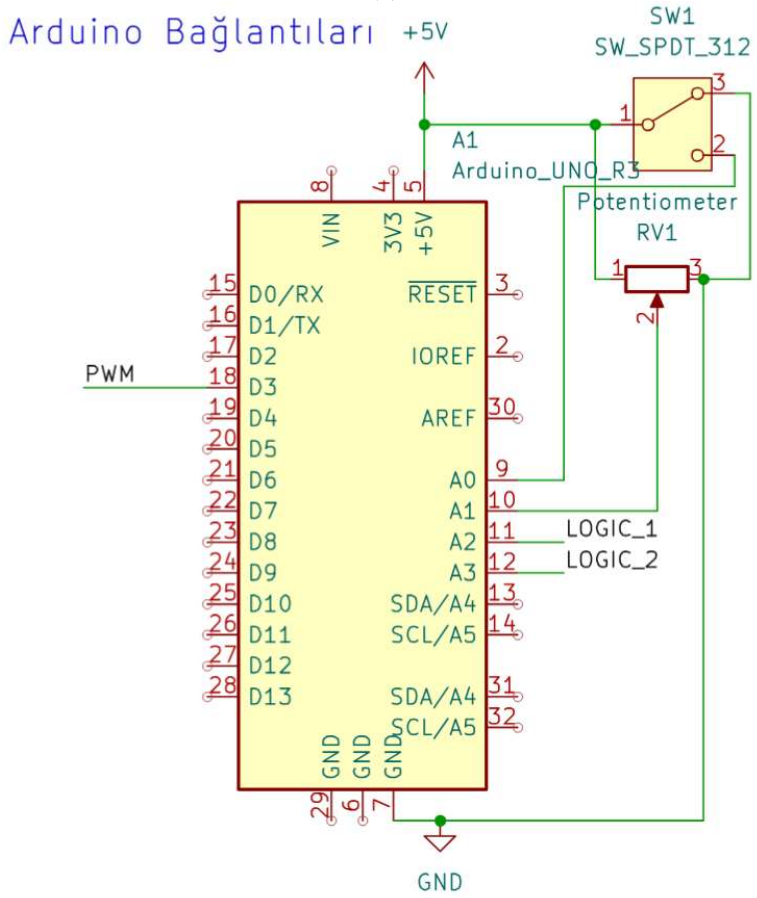


Şekil 1. Simülasyon Görüntüsü

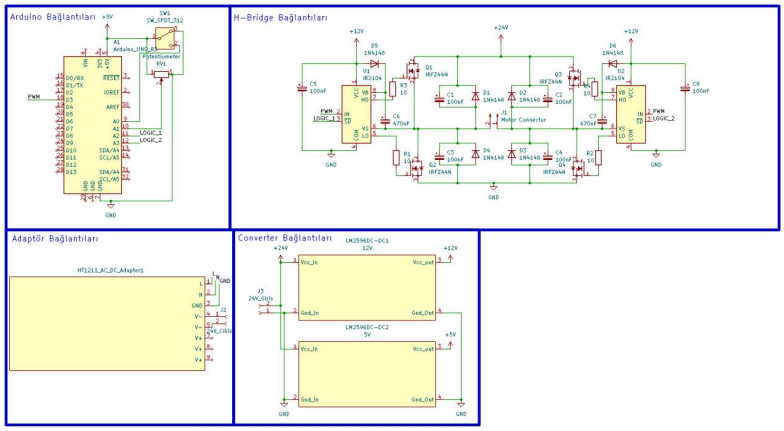
Bu simülasyon sonucu aldığımız verilerle ise Şekil 2 (a), Şekil 2 (b) ve Şekil 2 (c) devre şeması ortaya çıkmıştır



(a)



(b)



(c)

Şekil 2 (a) H-Köprü şeması (b) Arduino bağlantı şeması (c) Devre Şeması

Motor hızının kontrolü Arduino ile verilen PWM sinyali ile gerçekleştirilecektir PWM sinyali ise potansiyometreden gelen değerler ile hesaplanıp üretilmiş, üretilen PWM sinyali ise GateDriveri'i (IR2104) tetikleyerek H-köprüsünde doğru taraflara voltaj vericek şekide düzenlenmiştir. Yön değişimi Arduino'ye bağlı bir buton ile gerçekleştirilmiştir

Motor çalışma yönünü kontrol etmek için H-Köprü kullanılmıştır. Bir H-köprü, yüke uygulanan bir voltajın polaritesini değiştiren bir elektronik devredir. Bu devreler genellikle robotik ve diğer uygulamalarda DC motorlarının ileri veya geri çalışmasına izin vermek için kullanılır. İsim, "H" harfinin dalları ve çapraz çubuk olarak bağlanan yük olarak yapılandırılmış dört anahtarlama elemanı ile ortak şematik diyagram temsilinden türetilmiştir.[3]

Motorun ilk çalıştırılmasında oluşabilecek voltaj ve akım dalgalanmalarından mosfetleri korumak için ise diyot ve kondansatörler kullanılmış ayrıca Motor çalışırken yönü değiştirilmeye çalıştığında da oluşabilecek sorunları engellemek için Ardiuno içinde bir "Dead-time" oluşturulmuştur.

Malzemeler

IR2104: Devrede hem basit olması hem 5V PWM sinyali ile çalışabilmesinden ötürü 2 adet IR2104 kullanılacaktır. Her bir entegre ile birer adet High Side-Low Side çiftin kontrol edilecektir. Giriş gerilimi 12V'dur. Boostrap Devresine ihtiyaç duyar. Boostrap devresi diğer kontrolcülere nazaran daha basit ve daha ucuz olduğu için tercih edilmiştir.

IRFZ44N: 240W/24V=10A Motorun çekeceği akım yaklaşık 10A olacaktır. Bu nedenle, MOSFET'ler bu akımı güvenle taşıyabilecek ve yeterli gerilim dayanımına sahip olacaktır. Ayrıca, düşük "on" direnci (Rds(on)) olan MOSFET'ler tercih edilerek güç kayıpları minimize edilmelidir. Bu devrede 55V 49A kadar dayanabilen IRFZ44N MOSFET kullanılacaktır.

Arduino Uno: Arduino kullanımı kolay yazılım ve donanım sunan açık kaynak kodlu elektronik bir platformdur. Herkesin kolayca prototip geliştirmesi ve interaktif projeler yapması için tasarlanmıştır. Temelde ATMEL mikrodenetleyicilerini kullanan Arduino platformu yıllar içinde gelişen kütüphaneleri ve bu kütüphaneleri yazan topluluğuyla elektronik ve programlama alanında kendini geliştirmek isteyen herkes için kolay ve ulaşılabilir çözümler sunuyor.[4] 5V giriş gerilimi ile çalışır ve kolay kodlanabilmesi sayesinde bir çok projede tercih edilir.

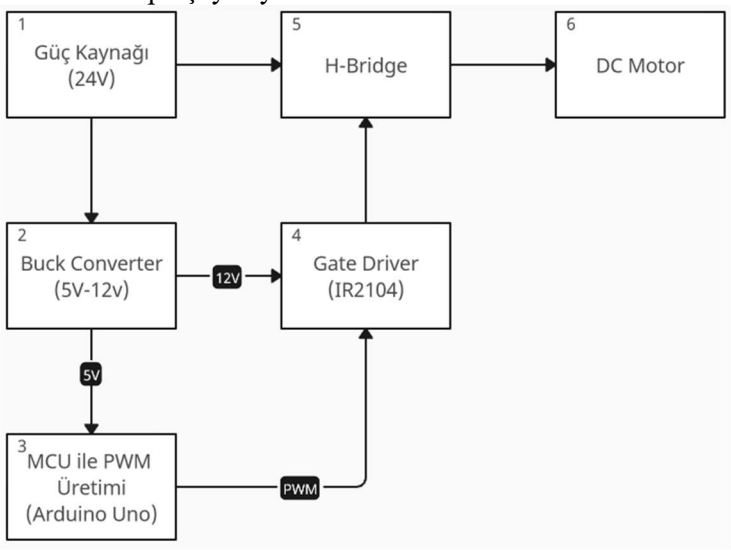
1N4148: H-köprüsüne, anahtarlama elemanlarının tersine paralel olarak bağlanan hızlı diyotlar eklenecektir. Bu diyotlar, endüktif yük olan motorun anahtarlama sırasında oluşturduğu ters gerilimden MOSFET'leri korur. Diyot olarak 15A ve 75V ters gerilimi dayanan 1N4148 kullanıacaktır.

LM2596S-ADJ 3-40V DC-DC Ayarlanabilir Kademeli Güç Kaynağı Modülü: LM2596S-ADJ DC-DC Ayarlanabilir Kademeli Güç Kaynağı Modülü, 3.2-40 Vdc arası giriş gerilimleri 1.5-35 Vdc aralığında kullanılabilir. Bu modül, 3 Amper'e kadar olan akımı taşıyabilir. Ancak 2 Amper ve üzeri işlemlerde soğutucu kullanılması önerilir. Mini boyutu ile oldukça kullanışlı olan bu modül, üzerinde LM2596S-ADJ entegresi bulundurur. Modül üzerinde bulunan trimpotlar yardımıyla çıkış gerilimi, minimum şarj kesme akım eşiği değeri ve çıkış akımı kolaylıkla ayarlanabilir. Çıkış gerilimi 1.5V ile 35V arasında çok hassas olarak ayarlanabilen bir hazır devre olan bu modülün giriş gerilimi en fazla 40V'tur. [5]

MT-280-24 280W 24V DC Adaptör: 24 V DC çıkış gerilimi ve 280 Watt gücü ile yüksek performanslı güç adaptörüdür. Endüstriyel, ağ ve dış mekan uygulamalarında güvenilir ve stabil güç sağlar. Ayrıca içinde kısa devre, aşırı yük ve aşırı ısınma korumaları mevcuttur.[6]

Blok Şeması

Şekil 3'de görüldüğü gibi devre 6 ana parçaya ayrılmaktadır



Şekil 3. Blok Şeması

1-Güç Kaynağı

Sistemi beslemek için 24V DC bir güç kaynağı gereklidir. Güç kaynağının motorun maksimum akımını (yaklaşık 10A) sağlayabilecek kapasitede olması önemlidir. Ayrıca, güç kaynağının aşırı akım ve kısa devre koruması gibi güvenlik özelliklerine sahip olması gerekmektedir

2-Buck Converter:

Hem Arduino için hem IR2104 için ayrı ayrı 12V & 5V'a ihtiyaç duyulacaktır. Ayrı ayrı dışardan almak yerine Buck Down Modülleri kullanılarak 24V'tan düşürülmüştür.

3-MCU ile PWM Üretimi

Motorun hızını kontrol etmek için bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyici, PWM sinyali üreterek H-köprüsündeki anahtarlama elemanlarının çalışma döngüsünü (duty cycle) kontrol eder. Duty cycle'i değiştirilerek motora uygulanan ortalama gerilim ayarlanır ve böylece motorun hızı kontrol edilir.

PWM Frekansı: PWM frekansı, motorun performansını etkileyen önemli bir parametredir. Çok düşük frekanslar motorda titreşime neden olabilirken, çok yüksek frekanslar anahtarlama kayıplarını artırabilir. Genellikle 1 kHz ile 20 kHz arası bir frekans tercih edilir. Simülasyonlar sonucu motor için en uygun frekans belirlenmiştir.

4- Mosfet Sürücü (Gate Driver)

MOSFET'lerin hızlı ve verimli bir şekilde anahtarlanması için bir Mosfet sürücü (gate driver) kullanılması önemlidir. Mosfet sürücü, mikrodenetleyicinin düşük akımlı çıkış sinyalini, MOSFET'leri sürmek için gerekli olan daha yüksek akımlı ve gerilimli sinyale dönüştürür. Ayrıca Boostrap devresi ile High-Side Mosfetlerinin kaçıracağı voltajada karşı koyacaktır.

Boostrap Kapasitör Hesaplaması:

$$C_{Boost} > \frac{Qg + Qleak}{\Delta Vbs}$$

Qg = Gate Şarjı = 63nC

QLeak = Sızıntı Kayıpları = 15nC

ΔVbs = izin verilen gerilim düşümü = 0.2V
Cboost > 0.375uF
Boostrap Kapasitörleri hesaplamaya göre 470uF olarak seçilmiştir.

Snubber Devresi Kapasitör hesaplaması:

$$C_{snub} > \frac{I + Trise}{\Delta V}$$

I = Devre Akımı =10A
Trise = Anahtarlama Zamanı = 115ns
ΔVbs = izin verilen gerilim yükselişi = 5V
Csnub > 0.23uF
Snubber Kapasitörleri hesaplamaya göre 0.23uF olarak seçilmiştir.

5-H-Köprüsü Devresi

H-köprüsü, motorun yönünü kontrol etmek için kullanılan temel devredir. Dört adet anahtarlama elemanı (genellikle MOSFET veya BJT) kullanılarak oluşturulur. Bu devrede gerilim kontrolü kolaylığı için MOSFET kullanılmıştır. Bu anahtarların uygun şekilde açılıp kapatılmasıyla motorun uçlarına uygulanan gerilimin polaritesi değiştirilir, böylece motorun dönüş yönü kontrol edilir.

6-DC Motor

240W gücündeki motor ilk çalıştırmada nominal değerlerinden 2-3 kat daha fazla akım çekebilmektedir. Ayrıca ani yön değişimlerinde anlık olarak motorun 2 ucuna da akım verilme ihtimali vardır. Bu durumlar neticesinde devreye ekstra güvenlik önemleri eklenmiştir.

Koruma yolu

Kısa Devre Oluşumu Arduino ile PWM sinyali ile deadtime üretilmiş deadtime (640ns) ve bu deadtime alt ve üst MOSFET'lere aynı anda enerji vermemek için kullanılmıştır. Ayrıca Motor dönerken ani yön değişiminden kaynaklı oluşabilecek sorunları önlemek için Arduino ile ekstra önlemler alınmıştır.

Koruma Devresi (Snubber)

Motorun ilk çalışmasında ortaya çıkabilecek Akım ve Votlaj dalgalanmalarını önleyemek için H-Bridge içine MOSFET'lere paralel olacak şekilde diyot ve kapasitörler eklenmiştir.

Yazılımsal Koruma

Dead Time (Ölü Zaman): Arduino ile ilk çalıştırmada veya yön değiştirmede High side ve Low side MOSFET'lere aynı anda akım vermeyi önlemek için Şekil 4'te görüldüğü gibi bir dead time (ölü zaman) eklenmiş, böylece kısa devre sorunlarını engellenmiştir.

Gecikme (Delay)

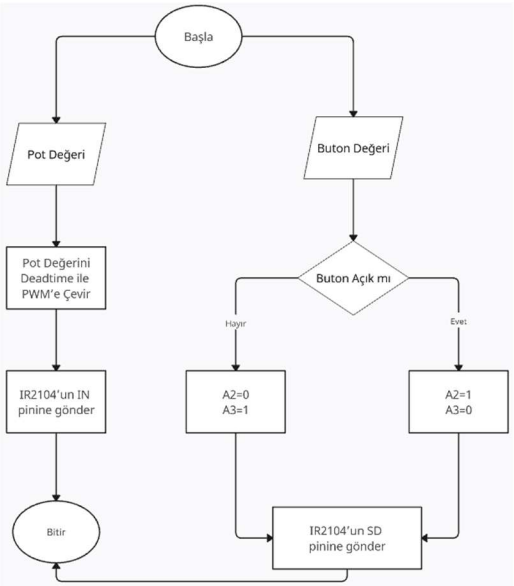
PWM sinyali hala açıkken ani yön değişiminden kaynaklanacak sorunları engellemek için, anahtar (Switch) değişiminden sonra Arduino ile bir gecikme (delay) verilerek motor korunmuştur.

DC Motor Çalışma Yönü Belirleme

Şekil 4'te görüldüğü gibi Bir Switch Motor Çalışma Yönününü belirlemiş bir adet Potansiyometre ile de Hız kontrolü yapılmıştır.

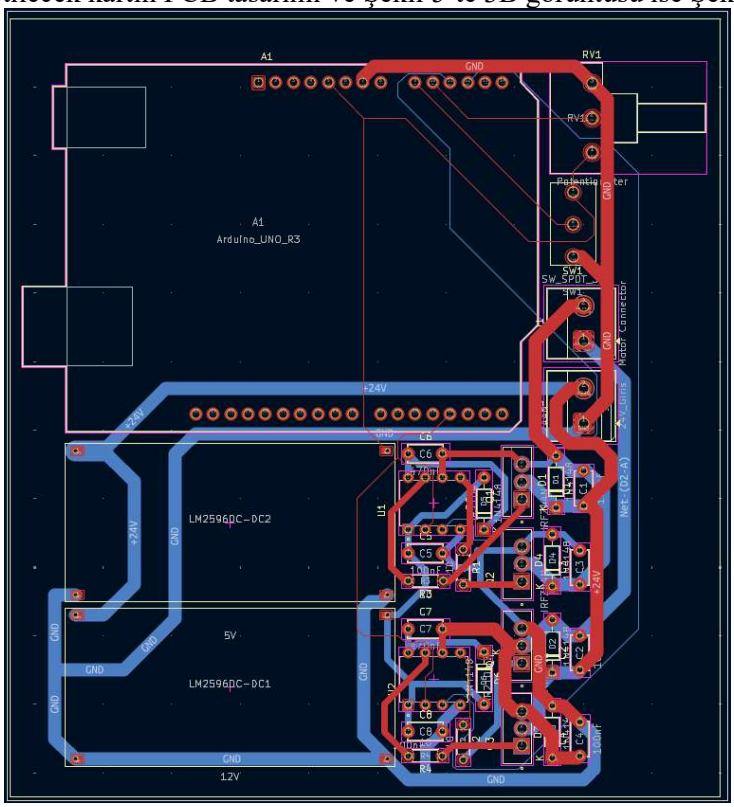
Arduino'dan PWM Sinyali Üretme

Potansiyometreden gelen değerlerle Arduino içinde bir sinyal üretililmiştir. Potansiyometre bu sinyalin genliğini belirleyerek motor hızı kontolü sağlanmıştır. Bu Sinyal ise H-Bridge içerisindeki Mosfetleri (Hepsi N-Tipi olduğu için) doğru sürülmesini sağlayacak IR2104 entegresine bağlanmıştır. Bu entegre sayesinde Mosfetleri verimli bir şekilde yönetilmesi hedeflenmiştir.

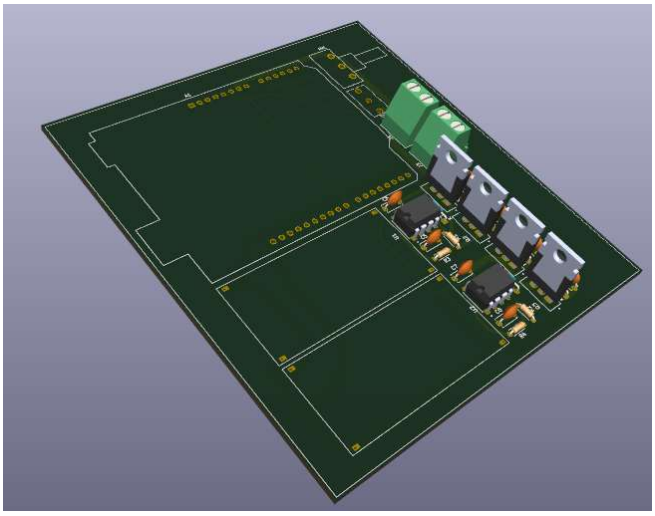


Şekil 4. Algoritma Blok Şeması

Bunun Sonucunda ise üretilecek kartın PCB tasarımı ve Şekil 5'te 3B görüntüsü ise Şekil 6'da verilmiştir



Şekil 5. PCB Tasarımı



Şekil 6. 3B Görünüm

SONUÇ

Bu çalışmada 240w 24v bir fırçasız DC motor için hız ve yön kontorlünü verimli ve ucuz bir şekilde yöneten bir kart tasarlanıp üretilmiştir.

Simülasyonda ve diğer çalışmalardan alınan bilgiler ışığında parçalar seçilmiş maaliyet analizi yapılıp kart tasarımı çıkarılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Yedamale, P., Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc. App. Note, USA. 2003

[2] https://celtasmuhendislik.com.tr/dc-motor-surucusu/

[3] https://en.m.wikipedia.org/wiki/H-bridge

[4] https://www.direnc.net/arduino-uno-r3-smd

[5] https://www.direnc.net/ledli-lm2596-dc-dc-ayarlanabilir-voltaj-dusurucu-guc-modulu

[6] https://www.poyraznetwork.com/mervesan-mt-280-24-280-watt-24-vdc-adaptor?srsltid=AfmBOorVpgEFPswlw8WzniTm8pWRf9LDhJ6ssAbJxCmsse5Bzp-jsH5f

KABOSUZ GÜÇ AKTARIM PROJESI

Mehmet GÜRLEYEN[1], Mustafa GÜLEN[2], Ömer Kasım KARAASLAN[3]

[1] Elektrik-Elektronik Mühendislik Öğrencisi, Selcuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

[2] Elektrik-Elektronik Mühendislik Öğrencisi, Selcuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

[3] Elektrik-Elektronik Mühendislik Öğrencisi, Selcuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

[*](mgurleyen28@gmail.com)

Özet **—**Bu çalışma manyetik rezonans kuplajı (MRC-WPT) temelli kablosuz güç aktarım sisteminin tasarımı, teorik altyapısı ve verim analizini kapsamaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve taşınabilir cihazların yaygınlaşması, temassız enerji iletimini kritik bir teknoloji hâline getirmiştir. Projede indüktif ve rezonant kuplaj prensipleri incelenmiş, kuplaj katsayısı (k), kalite faktörü (Q), bobin geometrisi, ferrit malzemeler ve empedans eşlemesinin sistem performansına etkileri analiz edilmiştir. Verici ve alıcı bobinler için rezonans LC devresi modellenmiş, verim hesapları ve deneysel ölçümlerle performans değerlendirilmiştir. Optimizasyon yöntemleri, uzun menzilli aktarım teknikleri, çok modlu rezonatör yapıları ve elektromanyetik güvenlik kriterleri tartışılmıştır. Sonuçlar, doğru rezonans ayarı, yüksek Q değerleri ve optimize bobin tasarımının verimi önemli ölçüde artırdığını ve %86.2'ye varan aktarım verimliliği sağladığını göstermektedir. Bu çalışma elektrikli araç şarjı, biyomedikal implantlar, IoT sistemleri ve oda ölçekli kablosuz enerji çözümleri için kapsamlı bir temel sunmaktadır**.**

Anahtar Kelimeler **–** güç aktarımı, enerji, kuplaj

GİRİŞ

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve taşınabilir elektronik cihazların yaygınlaşması, kablosuz güç aktarımı teknolojilerine olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Kablolu sistemlerde ortaya çıkan temas, aşınma, hareket kısıtlamaları ve güvenlik sorunları; özellikle mobil cihazlar, tıbbi implantlar ve elektrikli araçlar gibi uygulamalarda önemli dezavantajlar oluşturur. Bu nedenle manyetik alan tabanlı kablosuz enerji iletimi, son yıllarda hem akademik literatürde hem de endüstride hızla gelişen bir teknoloji hâline gelmiştir. Kablosuz güç aktarımında öne çıkan yöntemlerden biri manyetik rezonans kuplajı (Magnetic Resonance Coupling – MRC) tekniğidir. Bu yöntem, aynı rezonans frekansına ayarlanmış iki bobin arasında yakın alan manyetik alan salınımlarını kullanarak temassız enerji iletimini mümkün kılar. Literatürdeki çalışmalar, sistem performansının büyük ölçüde kuplaj katsayısı (k), kalite faktörü (Q), bobin geometrisi, frekans seçimi ve empedans eşlemesi gibi parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir. Yüksek Q faktörü, uygun bobin tasarımı ve düşük kayıplı ferrit malzemelerin kullanılması, enerji aktarım verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Manyetik rezonans kuplajlı sistemler; elektrikli araçların kablosuz şarjı, vücut içi medikal implantların güvenli bir şekilde beslenmesi, IoT sensörlerinin uzun süreli çalışması ve oda ölçeğinde çok modlu rezonatör yapıları ile çoklu cihaz beslemesi gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ancak bu teknolojinin yaygınlaşmasının önünde hâlâ çözülmesi gereken teknik zorluklar bulunmaktadır. Manyetik alan sızıntısı, alıcı-verici hizalama hassasiyeti, mesafe arttıkça düşen verimlilik, elektromanyetik güvenlik sınırları ve standartlaşma eksikliği bu problemlerin başında gelmektedir. Bu çalışma, manyetik rezonans kuplajlı kablosuz güç aktarımının temel prensiplerini, devre modellerini ve sistem verimliliğini belirleyen kritik parametreleri kapsamlı biçimde incelemektedir. Ayrıca literatürde önerilen modern optimizasyon yaklaşımları, yeni nesil manyetik malzemeler, frekans seçimi stratejileri ve çok modlu rezonans yapıları değerlendirilerek teknolojinin güncel durumu ve gelecekteki gelişim potansiyeli ortaya konulmuştur. Böylece kablosuz enerji aktarımının hem endüstriyel hem de akademik uygulamalarda daha verimli, güvenli ve kararlı hâle getirilmesine yönelik kapsamlı bir perspektif sunulmuştur.

MATERYAL VE METOD

Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada manyetik rezonans kuplajı (MRC) temelli kablosuz güç aktarım sistemi tasarlanmış ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Sistem; bobin yapısı, rezonans kapasitörleri, ferrit çekirdek, güç elektroniği sürücü devresi, PCB tasarımı ve ölçüm düzeneklerinden oluşmaktadır. Bu bölümde kullanılan malzemeler, devre yapısı ve deneysel yöntemler ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Sistemde kullanılan temel bileşenler bobin (L), kapasitör (C), ferrit çekirdek, DC/AC güç yükselteci, yalıtım–EMI kalkanlama yapıları ve ölçüm cihazlarıdır.

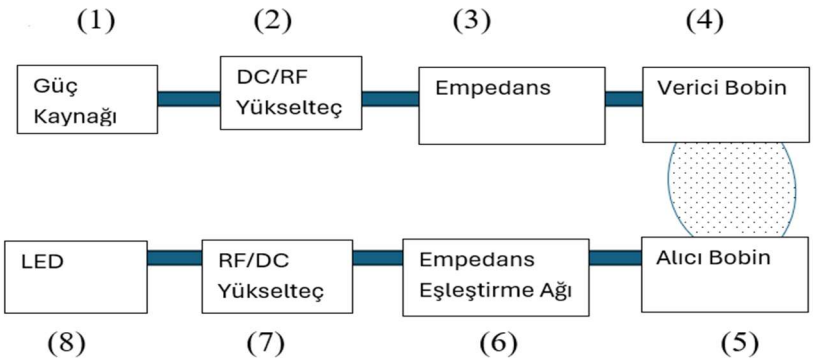
Bobin (L)	Manyetik alan oluşturma
Kapasitör (C)	Rezonans sağlama, empedans eşleme
Ferrit Çekirdek	Manyetik akı yönlendirme
Güç Kaynağı	Frekans üretimi ve kontrol
Yalıtım & Kalkanlama	Güvenlik ve EMI önleme

Sekil1. Kullanılacak Materyaller

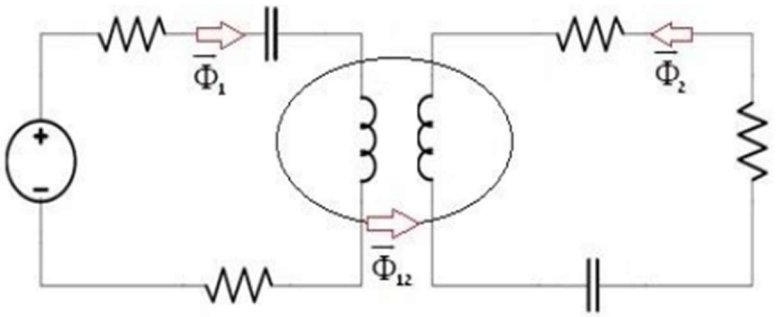
Bobinler manyetik alan oluşturma amacıyla belirli endüktans değerlerine göre sarılmış, kapasitörler ise rezonans frekansının sağlanması için seçilmiştir. Ferrit çekirdek manyetik akıyı yönlendirme ve kayıpları azaltma amacıyla kullanılmıştır.

Sistem Blok Diyagramı ve Temel Devre Şeması

Çalışmada kullanılan kablosuz güç aktarım sisteminin genel yapısı bir blok diyagram ile modellenmiştir. Ardından sistemin temel elektriksel bağlantıları gösterilmiştir.

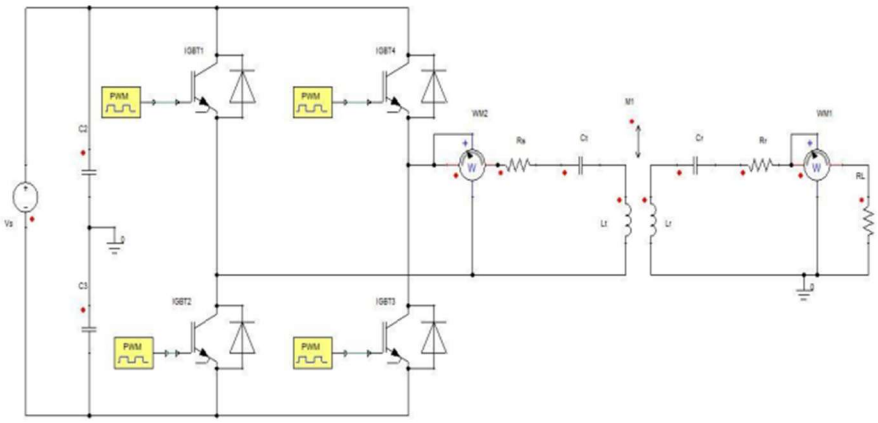


Sekil2. Blok Şema

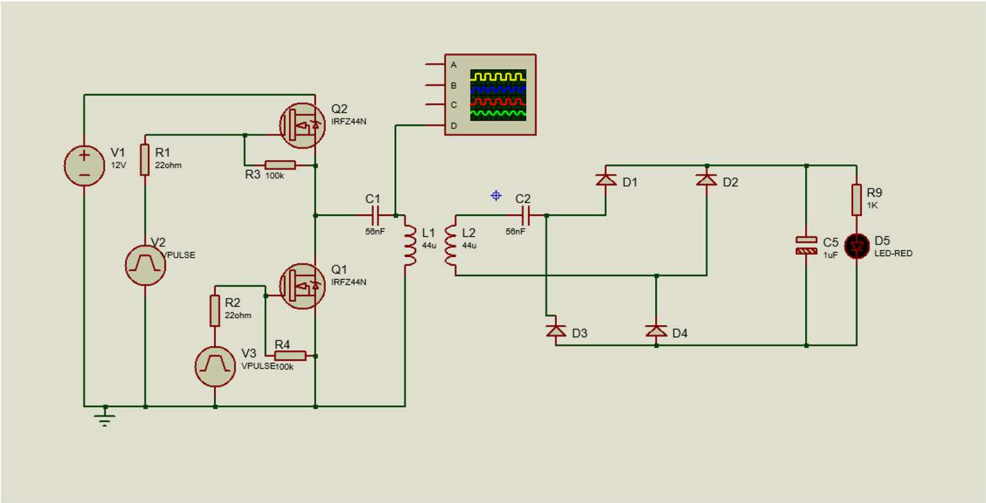


Sekil3. Basit Devre Semaşı

Blok şema; güç kaynağı, DC/AC dönüştürücü, verici rezonans devresi, alıcı bobin ve yük devresini içermektedir.
Güç Elektroniği Sürücü Devresi
Verici bobinin sürülmesi için MOSFET tabanlı bir güç elektroniği devresi kullanılmıştır. Yüksek frekanslı AC üretimi için DC giriş gerilimi, yükselteç devresi tarafından sinüzoidal ya da kare dalga formuna dönüştürülmüştür.



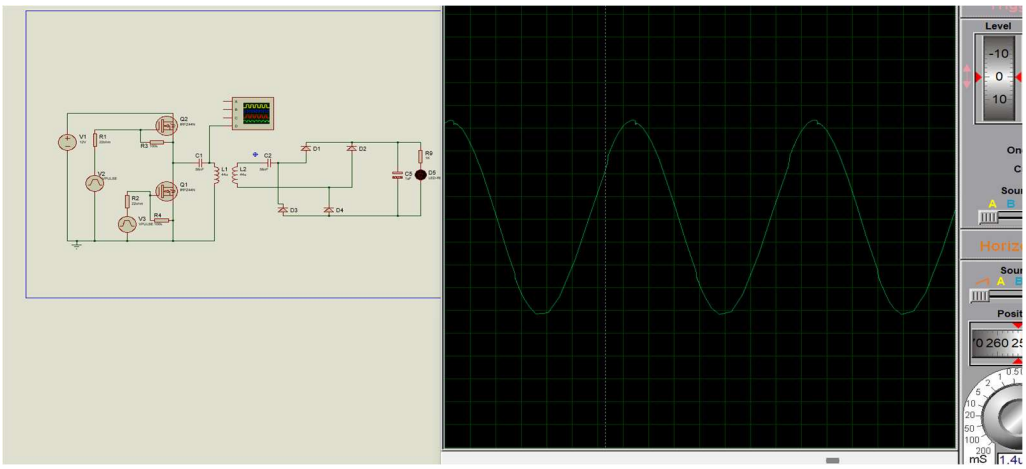
Sekil4. Yük altında eşanlı çalışan güç elektroniği devre şeması



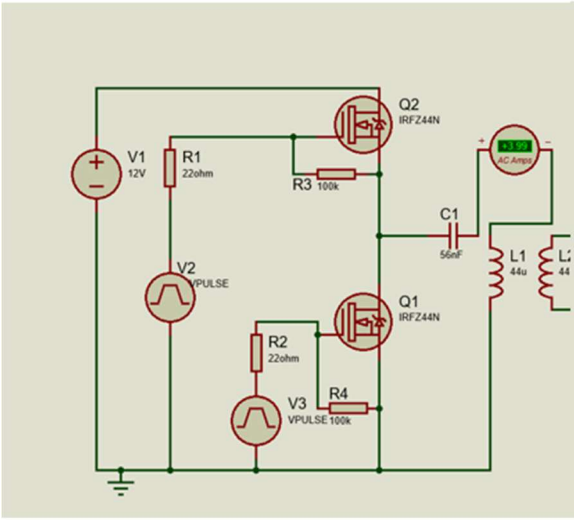
Sekil5. DC/AC Yükselteç Devresi

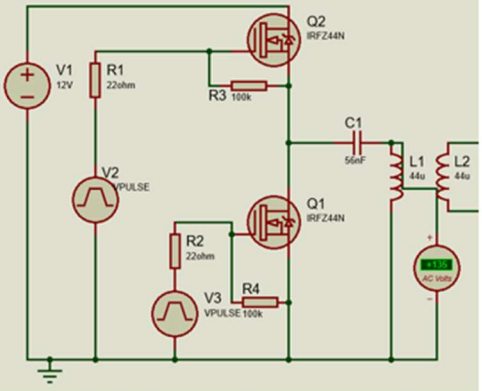
Devre, sürüş frekansının rezonans frekansına uyumlu olmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Ölçüm Sistemi ve Osiloskop Analizi
Verici devresinin çıkış sinyalleri osiloskop ile incelenmiş, akım ve gerilim değerleri ampermetre ve voltmetre ile doğrulanmıştır.



Sekil6. DC/AC yükselteç devresi osiloskop sinyal görüntüsü



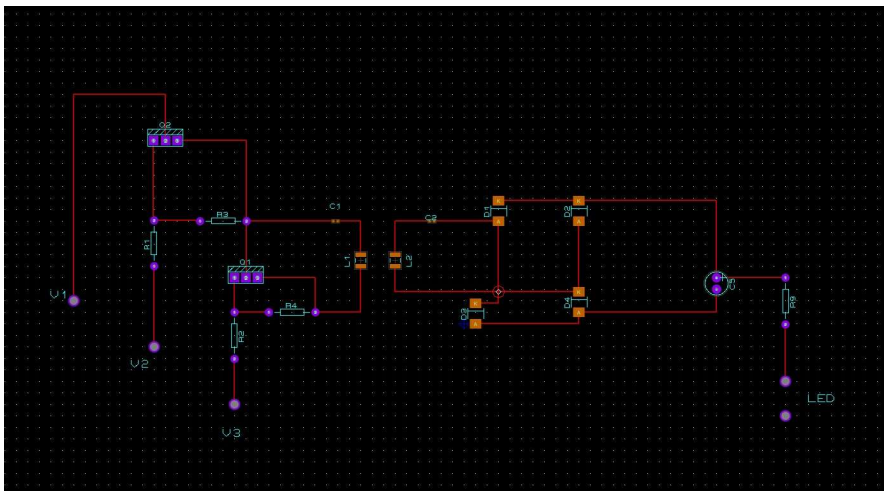


Sekil7. DC/AC yükselteç devresi Ampermetre Sekil8. DC/AC yükselteç devresi Voltmetre

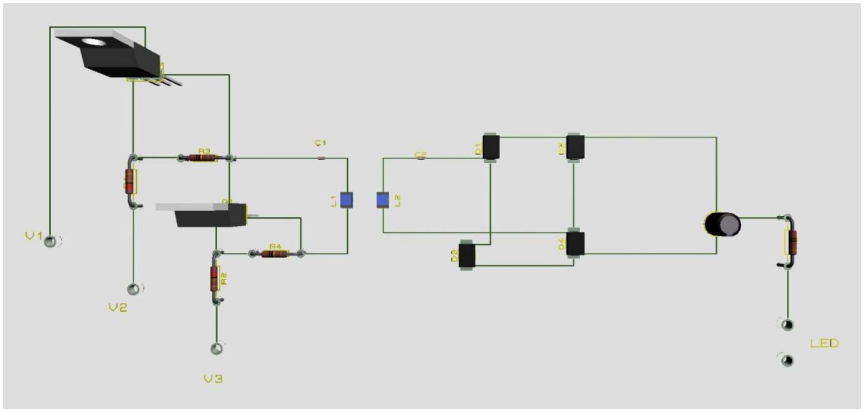
Bu ölçümler, sürücü devresinin frekans kararlılığı ve çıkış dalga formunun rezonans devresine uygunluğunu doğrulamak için yapılmıştır.

PCB Tasarımı

Devreye ait tüm sürücü ve güç katları, parazitleri azaltmak ve kompakt bir yapıya ulaşmak amacıyla tek bir PCB üzerinde toplanmıştır.



Sekil9. Devrenin PCB görüntüsü



Sekil10. Devrenin PCB'sinin 3D görüntüsü

Teorik Hesaplamalar

Bu bölümde, tasarlanan kablosuz güç aktarım sisteminin çalışma noktasını belirlemek için rezonans frekansı, açısal frekans, bobin reaktansı, kalite faktörü (Q), seri eşdeğer direnç ve güç değerleri adım adım hesaplanmıştır. Her bir alt başlıkta önce hesaplanan büyüklüğün fiziksel anlamı kısaca açıklanmış, ardından kullanılan formül ve projeye ait sayısal sonuçlar verilmiştir. Hesaplamalar, L = 44 µH ve C = 56 nF değerlerine göre yapılmıştır.

Rezonans Frekansı Hesabı

Öncelikle verici ve alıcı devrelerin hangi frekansta en verimli şekilde çalışacağını belirlemek için LC devresinin rezonans frekansı hesaplanır. Rezonans frekansı, bobin ve kapasitörde depolanan enerjinin birbirine en etkin şekilde aktığı temel çalışma frekansıdır.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Burada

$$L = 44 \times 10^{-6} H$$
$$C = 56 \times 10^{-9} F$$

LC çarpımı:

$$LC = (44 \times 10^{-6})(56 \times 10^{-9}) = 2.464 \times 10^{-12}$$

Karekök:

$$\sqrt{LC} = 1.57 \times 10^{-6}$$

Rezonans frekansı:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(1.57 \times 10^{-6})} \approx 1.014 \times 10^5 Hz f_0 \approx 101.4 kHz$$

Bu değer, projede kullanılan 101.5 kHz çalışma frekansı ile uyumludur.

Açısal frekans:

Açısal frekans, aynı rezonans noktasını radyan/saniye cinsinden ifade eder ve empedans hesaplarında kullanılır. Bir başka deyişle, saniyedeki açısal salınım miktarını gösterir.

$\omega_0 = 2\pi f_0 \omega_0 = 2\pi \times 101400 \approx 6.37 \times 10^5\, rad/s\, \omega_0 \approx 6.37 \times 10^5\, rad/s Bobinin\ \ rezonans\ \ noktasındaki$ *endüktif reaktansı*

Bu adımda, bobinin rezonans frekansında AC sinyale karşı gösterdiği endüktif "direnç" (reaktans) hesaplanır. Reaktans ne kadar yüksekse, bobin o frekansta o kadar güçlü bir enerji depolama elemanı gibi davranır.

$$X_L = \omega_0 L X_L = (6.37 \times 10^5) \times (44 \times 10^{-6}) X_L \approx 28\Omega$$

Yani bobinin rezonans frekansındaki endüktif reaktansı yaklaşık **28 Ω**'dur.

Q Faktörü ve Seri Direnç R_s

Q faktörü, bobinin ne kadar "kaliteli" bir rezonans yaptığını (kayıplara oranla ne kadar enerji depolayabildiğini) gösterir. Q arttıkça, rezonans daha keskin ve selektif hâle gelir. Seri eşdeğer direnç R_s, bobindeki bakır kayıpları ve diğer ohmik kayıpların toplam etkisini temsil eder.

Q faktörü:

$$Q = \frac{X_L}{R_s}$$

Buradan seri direnç:

$$R_s = \frac{X_L}{Q}$$

Farklı Q hedefleri için:

- Q = 20 için:

$$R_{s,20} = \frac{28}{20} = 1.4\Omega$$

- Q = 50 için:

$$R_{s,50} = \frac{28}{50} = 0.56\Omega$$

Buna göre, bobinin Q ≈ 20 civarında çalışabilmesi için seri kayıpların yaklaşık 1.4 Ω mertebesinde, Q ≈ 50 için ise 0.56 Ω seviyesinde olması gerekmektedir.

Güç ve Verim Hesapları

Son olarak, sistemin güç aktarım performansını değerlendirmek için verici ve alıcı taraftaki güçler hesaplanır. Bu adım, teorik verim ile gerçek çalışma arasındaki ilişkiyi görmek açısından önemlidir.

Projede verici bobine uygulanan değerler:

$$V_{tx} = 135 V_{AC}, I_{tx} = 4A$$

Verici Gücü:

$$P_{tx} = V_{tx} \cdot I_{tx} = 135 \times 4 = 540W$$

Projenin hedef/verilen verim değeri:

$$\eta = 0.862(\%86.2)$$

Alıcı Gücü:

$$P_{rx} = \eta \cdot P_{tx} = 0.862 \times 540 \approx 465.48W$$

Toplam Güç Kaybı:

$$P_{kayıp} = P_{tx} - P_{rx} = 540 - 465.48 \approx 74.52W$$

Bu kayıplar; bakır kayıpları, dielektrik kayıplar, anahtarlama kayıpları, ferrit çekirdek kayıpları ve sızıntı akı gibi çeşitli mekanizmaların toplam etkisini temsil etmektedir.

Sonuçlar Ve Tartışmalar

Bu çalışmada manyetik rezonans kuplajlı kablosuz güç aktarım sistemi teorik olarak modellenmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. L = 44 µH ve C = 56 nF değerlerine sahip bobin–kapasitör ikilisi ile teorik olarak hesaplanan rezonans frekansı 101.4 kHz, sürücü devresinin ürettiği sinyal ile neredeyse tamamen örtüşmüştür (101.5 kHz). Bu

sonuç, sistemin doğru tasarlandığını ve LC devresinin hedeflenen çalışma frekansını sağlıklı şekilde oluşturduğunu göstermektedir.

Açısal frekans ve endüktif reaktans hesaplamaları sonucunda bobinin rezonans noktasındaki empedansının yaklaşık 28 Ω olduğu bulunmuştur. Bu değer, güç elektroniği sürücüsünün bobini kararlı şekilde sürebilmesi için uygun bir empedans seviyesidir. Q faktörü hesaplamaları, sistemin rezonans davranışını etkileyen en kritik parametrelerden biridir. Q = 20 ve Q = 50 hedeflerine göre hesaplanan seri direnç değerleri sırasıyla 1.4 Ω ve 0.56 Ω olup bobinin pratikte bu değerlere yakın davranması sistemin yüksek verimle çalışmasını desteklemiştir. Ferrit çekirdek kullanımı ve sarım geometrisi bu düşük kayıpların elde edilmesinde etkili olmuştur.

Güç aktarımı açısından bakıldığında, verici bobine uygulanan 540 W gücün, sistem verimliliği %86.2 kabul edildiğinde alıcı tarafta yaklaşık 465 W olarak elde edildiği görülmüştür. Deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla uyumlu olup, ölçülen gerilim–akım değerleri ve osiloskop sinyalleri sistemin rezonans frekansında kararlı çalıştığını göstermiştir. Yaklaşık 74.5 W'lık toplam güç kaybı, bakır kayıpları, dielektrik kayıplar, parazitik etkiler, sızıntı akıları ve sürücü devresinin anahtarlama kayıpları kaynaklıdır. Bu kayıpların düşürülmesi için ferrit malzeme kalitesinin artırılması, daha kalın tel kullanımı ve daha yüksek Q faktörlü bileşenlerin tercih edilmesi önerilmektedir.

Bobinler arası mesafe ve hizalama, aktarım verimini doğrudan etkileyen en önemli iki parametre olarak gözlemlenmiştir. Özellikle bobinler arasındaki kuplaj katsayısı (k) azaldığında verim hızlı şekilde düşmektedir. Deneylerde bobinlerin doğru hizalandığı ve optimum mesafede konumlandırıldığı durumda sistemin kararlı çalıştığı görülmüştür. Ayrıca PCB tasarımındaki parazit azaltıcı düzenlemeler, ölçüm sonuçlarına olumlu etki etmiş ve frekans kaymasını minimum seviyede tutmuştur.

Sonuç olarak, teorik ve deneysel verilerin uyumlu olması, tasarlanan kablosuz güç aktarım sisteminin hem hesaplamalar hem de fiziksel testler açısından başarılı olduğunu göstermektedir. Sistem, 100 kHz civarında kararlı çalışmış, hedeflenen %86.2 verim seviyesine ulaşmış ve tasarlanan bobin–kapasitör yapısı beklendiği gibi performans göstermiştir. Bu çalışma, orta güç seviyesinde çalışan kablosuz enerji aktarım sistemleri için uygulanabilir ve güvenilir bir referans noktası oluşturmakta; gelecekte daha yüksek verim, daha uzun mesafe ve daha düşük kayıplı sistemler için temel altyapı sağlamaktadır.

REFERENCES

1. Advancements and challenges in wireless power transfer — kapsamlı inceleme üzerine makale.
2. A comprehensive review of wireless power transfer methods — WPT yöntemleri karşılaştırması.
3. Wireless Power Transfer—A Review (MDPI) — WPT teknolojilerinin durumu.
4. Review of Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission — MRC-WPT üzerine değerlendirme.
5. Modern Advances in Magnetic Materials of Wireless Power Transfer — manyetik malzeme inovasyonları.
6. Advanced Magnetic Coupling Resonance Model Optimization — bobin parametre optimizasyonu.
7. A Long-Range, High-Efficiency Resonant Wireless Power Transfer — sistem geliştirmeleri.
8. Resonant current-mode wireless power transfer for implantable devices — biyomedikal uygulama özelinde.
9. Room-scale magnetoquasistatic wireless power transfer using a cavity-based multimode resonator — oda ölçekli sistem tasarımı.
10. Machine Learning Assisted Long-Range Wireless Power Transfer — makine öğrenmesi ile optimizasyon.
11. Demonstration of topological wireless power transfer — topolojik yaklaşımlar ile enerji aktarımı.
12. Parameters Optimization for Magnetic Resonance Coupling — parametre analizleri ve optimizasyon.
13. Aydın, E., Pashaei, A., Yıldırız, E., Aydemir, M. T. (2018). Elektrikli Araçlar için 2.2 kW Gücünde Bir Kablosuz Güç Aktarım Sisteminin Tasarımı. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(3), 1-6.
14. Özüpak, Y. (2022). Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemi için Dairesel Bobinli Bir Transformatörün Tasarımı ve Veriminin Analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 209-219.
15. Ahmad, A., Alam, M. S., & Chabaan, R. (2017). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 4(1), 38–63.
16. Aslan E, Özüpak Y. Kablosuz güç transferi sistemi için Q faktörü etkisinin analizi. NOHU J. Eng. Sci. 2024;13(2):632-8.

17. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007
18. T. Fujita, T. Yasuda, and H. Akagi, "A moving wireless power transfer system applicable to a stationary system," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 4943- 4950.
19. S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency," Phys. Today, vol. 50, no. 7, pp. 36–42, Jul. 1997.
20. S. Wang, D. G. Dorrell, Y. Guo, and M.-F. Hsieh, "Inductive Charging Coupler With Assistive Coils," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, 2

ESP32 TABANLI DC MOTOR HIZ KONTROL VE İZLEME SİSTEMİ

Mustafa Seyyid SUNGUR[1*], Sevgül Ebrar AKÇALI[2]

[1]Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya*

[2]Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya

[*](233302020@ogr.selcuk.edu.tr)

Özet– Projemizin temel amacı; bir DC motorun hızını hassas bir şekilde kontrol etmek ve aynı zamanda motorun hız çalışma verilerini (hız, akım) kablosuz olarak uzaktan izlemek için bir sistem tasarlamaktır. Endüstri 4.0 ve siber-fiziksel sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, DC motor sürücülerinin uzaktan izlenebilirliği ve gerçek zamanlı performansı, kestirimci bakım stratejilerinin temelini oluşturmaktadır [1]. Projemizde gömülü sistemler, güç elektroniği ve kablosuz iletişim konuları bir araya getirilmiştir . Projenin ana eksenini, projede kullanacağımız 140W gücündeki 24V DC motorun dinamik hız kontrolü ve gerçek zamanlı izlemesi oluşturmaktadır . DC motorun dönüş hızını (RPM) hem kullanıcıdan gelen bir komuta göre hassas ve dinamik olarak kontrol etmek hem de motorun anlık çalışma durumunu (örneğin hız parametresi) kablosuz iletişim yoluyla uzak bir noktaya (bilgisayar ekranı veya telefon ekranı) aktararak gerçek zamanlı izleme (telemetri) olanağı sunmaktadır [5].

Anahtar Kelimeler *– ESP32, DC Motor Hız Kontrolü, PWM, PID Kontrol, Telemetri, IoT, BTS7960B, Hall Effect Sensör*

GİRİS

Endüstri 4.0 ve siber-fiziksel sistemlerin hızla yaygınlaşması, endüstriyel otomasyon süreçlerinde kullanılan DC motorlar gibi aktüatörlerin performansını ve güvenilirliğini en üst düzeye çıkarma ihtiyacını doğurmuştur . Geleneksel kontrol sistemlerinin yerini, artık gerçek zamanlı veri toplayabilen, uzaktan izlenebilen ve akıllı kararlar alabilen sistemler almaktadır. Özellikle DC motor sürücülerinin uzaktan izlenebilirliği, olası arızaların önceden tespit edilmesine ve üretim kesintilerinin en aza indirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, DC motorların hız kontrolü, endüstriyel uygulamalarda en temel gereksinimlerden biridir. Motor hızını ayarlamak için klasik lineer veya direnç tabanlı yöntemlerin aksine, Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) tekniği, enerji verimliliği açısından altın standart haline gelmiştir . PWM, anahtarlamalı güç elektroniği elemanlarını tam iletim veya tam kesim modlarında çalıştırarak, motora iletilen ortalama gücü veya etkin gerilimi hassas bir şekilde kontrol eder.[2] Bu yöntem, özellikle bu projede ele alınan 140W gibi görece yüksek güçlü bir motorun sürülmesinde kritik öneme sahip olan ısı kayıplarını minimize eder .

Ancak, motoru sadece sürmek, yük değişimleri karşısında hızı sabit tutmak için yeterli değildir. Hassas ve dinamik hız kontrolü, "kapalı çevrim" bir kontrol mimarisi gerektirmektedir. Bu çalışmada, sistemin kararlılığını ve doğruluğunu sağlamak amacıyla, endüstride en yaygın kullanılan kontrol algoritması olan PID (Oransal-İntegral-Türevsel) tercih edilmiştir.[3] PID algoritması, uzak kontrolden gelen "hedef RPM" değeri ile motor milinden okunan "gerçek RPM" değeri arasındaki hatayı sürekli olarak hesaplar . Bu hatayı sıfırlamak için gereken yeni kontrol sinyalini, motor sürücüye gönderilecek olan PWM sinyalinin görev döngüsü olarak belirler. Kapalı çevrim kontrolün başarısı, "gerçek RPM" bilgisinin doğruluğuna ve hızına bağlıdır . Bu geri besleme verisini elde etmek için, motor miline bağlı bir mıknatısın hareketini algılayan temassız bir Hall Effect Sensör (A3144) kullanılmıştır . Sensörün ürettiği her bir darbe (pulse), motorun belirli bir açısal hareketi tamamladığını gösterir ve bu darbelerin birim zamanda sayılmasıyla anlık RPM değeri hesaplanır.

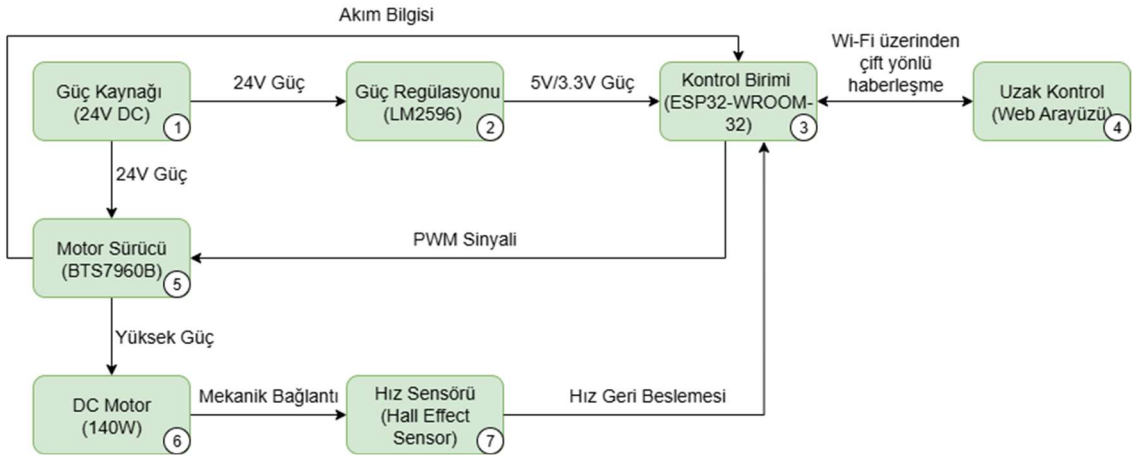
Bu çalışmanın ana eksenini oluşturan yenilikçi yaklaşım, tüm bu kontrol görevlerini yerine getirirken, aynı zamanda bir Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazı olarak çalışabilen bir sistem tasarlamaktır. Bu çift görevi üstlenmesi için, entegre Wi-Fi ve çift çekirdekli işlemci mimarisine sahip olan ESP32 mikrodenetleyicisi sistemin beyni olarak seçilmiştir . ESP32'nin çift çekirdekli yapısı, bir çekirdeğin kesintisiz ve gerçek zamanlı olarak PID kontrol

döngüsünü yürütmesini sağlarken, diğer çekirdeğin eş zamanlı olarak ağır Wi-Fi iletişim protokollerini yönetmesine olanak tanır . Bu sayede motor kontrolü, ağ gecikmelerinden etkilenmez. Son olarak, 140W'lık motorun gerektirdiği yüksek akımı yönetmek , ESP32'nin düşük güçlü mantık sinyalleri ile mümkün değildir . Bu arayüzü sağlamak için, 43A'e kadar akım kapasitesi sunan, dahili aşırı akım ve aşırı sıcaklık korumalarına sahip BTS7960B motor sürücüsü kullanılmıştır.

Bu makale; gömülü sistemler, güç elektroniği ve kablosuz iletişim disiplinlerini bir araya getirerek , yüksek güçlü bir DC motor için ESP32 tabanlı, kapalı çevrim PID hız kontrolü ve eş zamanlı Wi-Fi telemetri (hız ve akım izleme) sisteminin tasarımını, donanımsal uygulamasını ve Simulink modellemesini sunmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

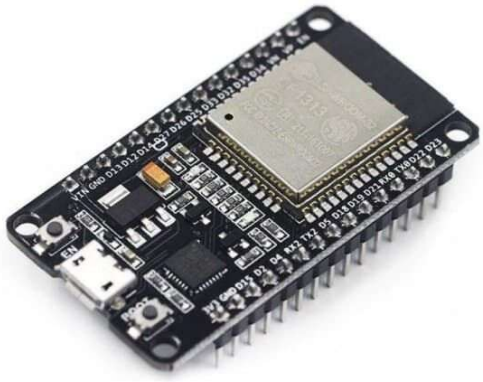
Bu çalışmada, 140W gücünde bir 24V DC motorun , kapalı çevrim esasına göre hız kontrolünü ve çalışma parametrelerinin uzaktan izlenmesini sağlayan siber-fiziksel bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır. Projenin mimarisi, dört temel çalışma bloğu üzerine kurulmuştur: (1) Kontrol ve Haberleşme Birimi, (2) Güç Sürücü Birimi, (3) Geri Besleme / Sensör Birimi ve (4) Güç Kaynağı ve Regülasyon Birimi . Sistemin genel çalışma prensibini ve bileşenler arası ilişkiyi gösteren proje blok diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Proje Blok Diyagramı

Sistem, 24V DC ana güç kaynağından beslenmektedir. Bu kaynak, hem motor sürücü birimine (BTS7960B) doğrudan 24V güç sağlamakta hem de bir güç regülasyon birimine (LM2596) giriş yapmaktadır . LM2596 DC-DC düşürücü regülatör , 24V'luk yüksek gerilimi, sistemin beyni olan ESP32 mikrodenetleyicisi ve Hall Effect hız sensörü gibi hassas dijital bileşenlerin ihtiyaç duyduğu 5V ve 3.3V'luk stabil gerilim seviyelerine indirmektedir .

Sistemin kontrol merkezi olarak, entegre Wi-Fi ve Bluetooth yeteneklerine sahip, çift çekirdekli ESP-32S mikrodenetleyicisi (Şekil 2.2) kullanılmıştır . ESP32'nin tercih edilme nedeni, hem gerçek zamanlı PID kontrol algoritmasını yürütebilme hem de eş zamanlı olarak telemetri verilerini kablosuz ağ üzerinden bir web arayüzüne gönderebilme kabiliyetidir . Espressif Systems tarafından belirtildiği üzere, ESP32'nin çift çekirdekli yapısı, bir çekirdeğin kesintisiz PID kontrol döngüsünü yürütmesini sağlarken diğer çekirdeğin ağır Wi-Fi iletişim protokollerini yönetmesine olanak tanır [4].



Şekil 2. ESP-32S Mikrodenetleyicisi

Projenin güç elektroniği katmanında, 140W'lık motorun gerektirdiği yüksek akımı (nominal ~5.8A, kalkış anında 30A üzeri) yönetebilmek için BTS7960B yüksek akım motor sürücü modülü tercih edilmiştir . Bu sürücü, ESP32'den gelen 3.3V'luk düşük güçlü PWM mantıksal sinyallerini , motoru sürebilecek 24V'luk yüksek güce dönüştürür. BTS7960B'nin entegre akıllı güç anahtarı yapısı, Infineon Technologies veri sayfalarında da belirtildiği gibi, dahili aşırı akım ve aşırı sıcaklık korumaları sunarak sistem güvenliğini artırır [6, 7]. Bu modülün kritik bir avantajı, dahili akım algılama (IS) pini sayesinde, motordan geçen akımla orantılı analog bir gerilim sinyali üretebilmesidir [8]. Bu özellik, harici bir akım sensörüne gerek kalmadan motorun yüklenme durumu ve enerji verimliliği hakkında telemetri verisi toplamamıza olanak tanımış ve ESP32'nin 12-bit ADC hassasiyeti ile bu veri yüksek çözünürlükle işlenmiştir [9].

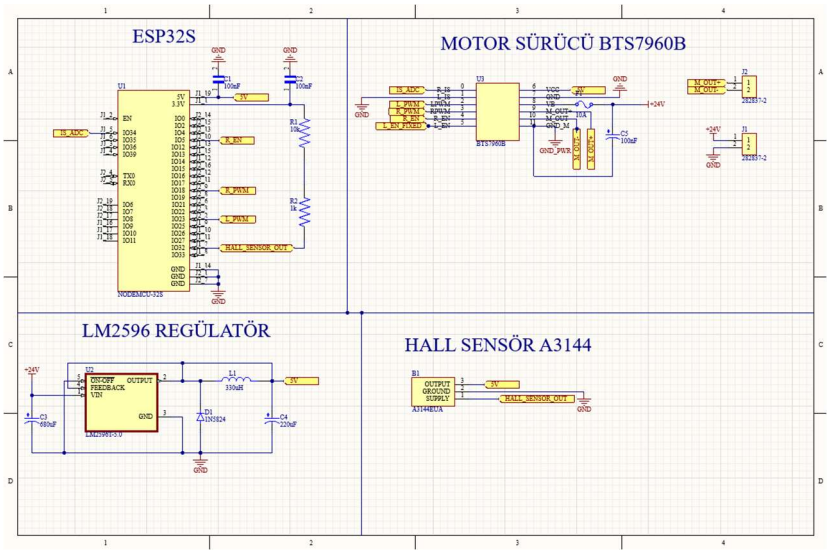
Kapalı çevrim hız kontrolünün temelini oluşturan PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrol algoritması , sistemin en kritik yazılımsal bileşenidir. PID, kontrol mühendisliğinde sistem hatasını (P), birikmiş hatayı (I) ve hatanın değişim hızını (D) değerlendirerek kararlı bir çıkış sağlayan en yaygın algoritmadır. Projedeki görevi, web arayüzünden (Şekil 2.3) gelen "Hedef RPM" değeri ile sensörden okunan "Gerçek RPM" değeri arasındaki hatayı sürekli olarak hesaplamak ve bu hatayı minimize edecek yeni PWM sinyalini üretmektir.

Şekil 3. Uzaktan Kontrol Web Arayüzü

Geri besleme döngüsü için motorun gerçek hızı, A3144 Hall Effect Sensörü ile ölçülmektedir . Motor miline sabitlenen güçlü bir Neodimyum (N52) mıknatısın her geçişi, Hall sensörü tarafından algılanarak dijital bir darbe sinyaline dönüştürülür . Bu darbeler, ESP32'nin harici kesme (Interrupt) pinleri aracılığıyla sayılarak anlık RPM değeri yüksek hassasiyetle hesaplanır. Kapalı çevrim DC motor kontrolünün doğruluğu, motor miline yerleştirilen bu sensörden elde edilen yüksek çözünürlüklü RPM geri beslemesine doğrudan bağlıdır [10].

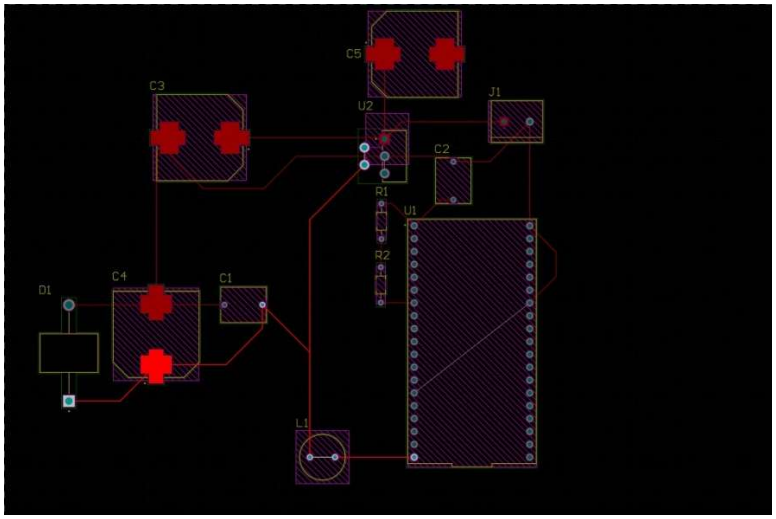
Projenin gerçekleştirilmesi, altı temel metodolojik adımda tamamlanmıştır: Hazırlık ve Tasarım Öncesi Analiz, Güç ve Geri Besleme Bağlantılarının Kurulumu, Temel Gömülü Fonksiyon Testleri, IoT Entegrasyonu ve Uzak Kontrol Sistemi, Devre Şematiği ve PCB Tasarımı, ve Sonuç ve Değerlendirme .

Tüm bu bileşenlerin entegrasyonu için Altium Designer programı kullanılarak detaylı bir şematik tasarım yapılmıştır .



Şekil 4. Proje Şematik Tasarımı

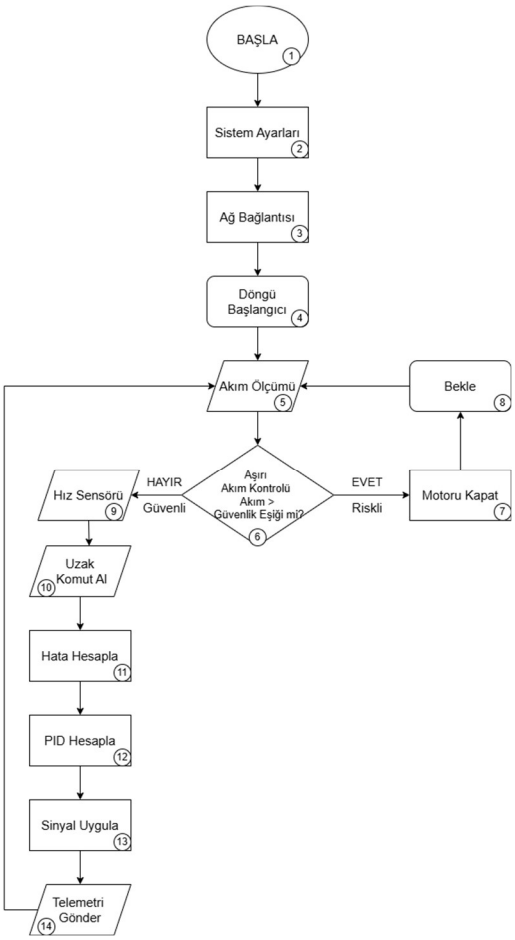
Bu şematik, ESP32S (Şekil 5.2), LM2596 Regülatör (Şekil 5.3), BTS7960B Motor Sürücü (Şekil 5.4) ve Hall Sensör A3144 (Şekil 5.5) gibi ana modüllerin bağlantılarını detaylıca göstermektedir [11, 12]. Şematik tasarım doğrulandıktan sonra, yüksek akım hatları (24V ve motor çıkışları) ile düşük güçlü sinyal hatlarının (ESP32, sensörler) birbirini etkilememesi için dikkatli bir yol (trace) planlaması yapılarak sistemin PCB (Baskı Devre Kartı) tasarımı tamamlanmıştır.



Şekil 5. Proje PCB Tasarımı

Sistemin yazılımsal mantığı, güvenlik, kontrol ve telemetri amaçlarını birleştiren profesyonel bir kontrol algoritması üzerine kurulmuştur . Bu algoritma, ana kontrol döngüsüne (loop) başlamadan önce sistem ve ağ ayarlarını yapar . Ana döngü, her seferinde öncelikli olarak BTS7960B'den gelen anlık akım bilgisini okuyarak başlar [14]. Okunan akım, belirlenen güvenlik eşiğini (örn. 10A-20A) aşıyorsa , sistem bir arıza durumu olduğunu anlar ve koruma amacıyla motoru derhal durdurur (PWM=0) [13]. Eğer akım güvenli seviyede ise, algoritma normal akışına

devam eder: Hız sensöründen gerçek RPM'i okur , Wi-Fi üzerinden hedef RPM komutunu alır , hatayı hesaplar , PID algoritmasıyla yeni PWM sinyalini belirler , bu sinyali motor sürücüye uygular ve son olarak anlık RPM/Akım verilerini telemetri olarak sunucuya gönderir.

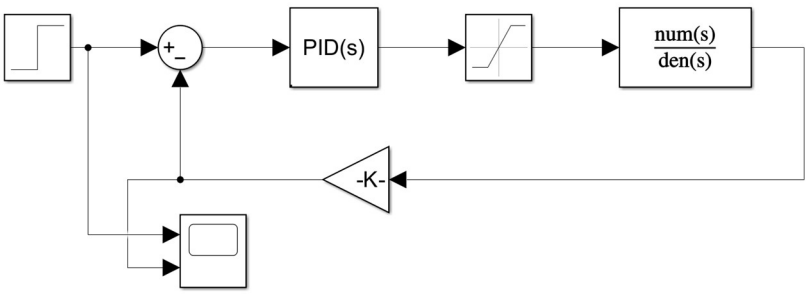


Şekil 6. Proje Akış Şeması

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, ESP32 mikrodenetleyicisi ile gerçekleştirilmesi hedeflenen DC motor hız kontrol sisteminin dinamik davranışını analiz etmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında bir simülasyon modeli kurulmuştur . Mühendislik sistemlerinin dinamik davranışlarının incelenmesinde MATLAB/Simulink tabanlı modelleme, sağladığı esneklik ve doğruluk oranı yüksek sonuçlar nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir [15]. Fiziksel sistemin dijital bir ikizinin oluşturulması, donanımsal uygulamaya geçmeden önce sistemin kararlılığını test etme, olası tepkilerini gözlemleme ve kontrolcü parametrelerini optimize etme imkanı sunmaktadır [16]. Bu simülasyonun temel amacı, tasarlanan PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol algoritmasının, ani referans hız değişiklikleri (setpoint değişimleri) karşısında sistemi ne kadar hızlı, kararlı ve doğru bir şekilde hedeflenen hız değerine ulaştırabildiğini gözlemlemektir.

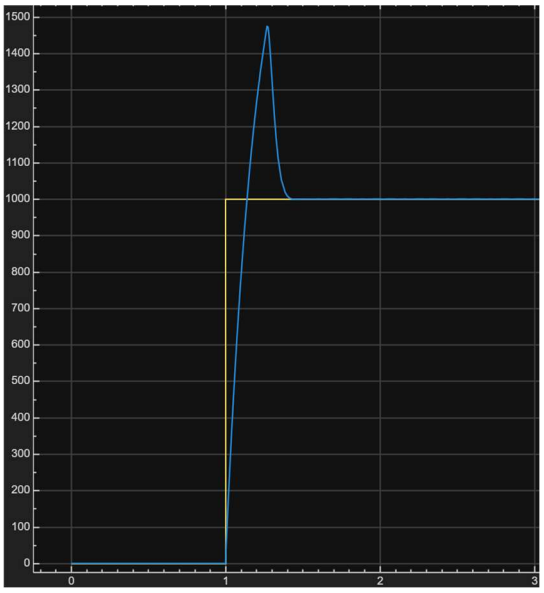
Oluşturulan kapalı çevrim (closed-loop) kontrol sistemi modeli, sistemin ana bileşenlerini temsil eden fonksiyonel bloklardan oluşmaktadır . Bu modelin yapısı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Simülasyon Blok Diyagramı

Modelin yapısında, sisteme verilmek istenen hedef hızı (RPM) tanımlamak için bir "Step" (Basamak Fonksiyon) bloğu kullanılmıştır . Referans hız ile motorun anlık hızı arasındaki fark, "Sum" bloğu ile "hata" sinyali olarak hesaplanmakta ve bu sinyal, sistemin kontrol merkezi olan PID "Controller" bloğuna iletilmektedir . PID kontrolcü, Akkaya & Kulaksız (2007) çalışmasında olduğu gibi, hata sinyalini oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) kazanç parametrelerine göre işleyerek bir "kontrol sinyali" üretmektedir [17]. Bu ideal sinyal, "Saturation" bloğu ile fiziksel sistemin limitleri olan 0V ve 24V arasında sınırlandırılmıştır . Sistemin kendisi, yani 140W 24V DC motor, Altın & Sefa (2010) çalışmasındaki yaklaşıma benzer şekilde, elektriksel ve mekanik parametrelerinden elde edilen transfer fonksiyonu ("Transfer Fcn" bloğu) ile modellenmiştir [18]. Son olarak, motorun açısal hız çıkışı, fiziksel sistemdeki Hall Etkisi sensörünün RPM ölçümünü simüle etmek amacıyla bir "Gain" (Kazanç) bloğu ile dönüştürülmekte ve hata hesaplaması için sistemin girişine geri beslenmektedir .

Sistemin, t=1 saniye anında 0 RPM'den 1000 RPM'e ayarlanmış ani bir basamak girişine (step input) verdiği tepki test edilmiştir . Simülasyon sonucunda elde edilen çıkış grafiği Şekil 8'de sunulmaktadır.



Şekil 8. Simülasyon Sonuç Grafiği

Grafik incelendiğinde, sarı çizgi referans hızı ve mavi çizgi gerçek motor hızını göstermektedir . Referans hızın t=1s anında ani olarak 1000 RPM'e yükselmesiyle, sistemin tepkisinin (mavi çizgi) aşırı agresif bir davranış sergilediği görülmektedir . Bu durumun teknik açıklaması, "Türev Vurması" (Derivative Kick) olarak bilinmektedir . PID kontrolcünün "D" (Türevsel) bileşeni, hatadaki ani ve yüksek değişim hızını (matematiksel olarak sonsuz) algılamaktadır. Bu durumu düzeltmek için anlık olarak çok yüksek bir kontrol sinyali (voltaj) üretmeye çalışmaktadır . Bu aşırı kontrol sinyali, motorun hedef değer olan 1000 RPM'in çok üzerine, grafikte yaklaşık 1500 RPM seviyesine fırlamasına ve yüksek bir "aşma" yaşamasına neden olmaktadır .

Bu simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi, önemli çıkarımları beraberinde getirmektedir. Grafiğin devamı incelendiğinde, yaşanan bu ilk "Türev Vurması" şokuna rağmen, kontrolcünün "P" (Oransal) ve "I" (İntegral) bileşenlerinin sistemi başarıyla kontrol altına aldığı ve stabilize ettiği gözlemlenmektedir . Sistem, yaşadığı bu büyük aşmayı hızla sönümleyerek kısa bir süre içerisinde referans değer olan 1000 RPM'e kalıcı hatasız bir şekilde oturmaktadır . Bu durum, tasarlanan PID kontrolcünün, sistemi stabilize etme ve referans hızı takip etme görevini temel olarak başarıyla yerine getirdiğini doğrulamaktadır .

Ancak simülasyon, teorik basamak girişlerinin pratikte "Türev Vurması" olarak bilinen aşırı tepkilere yol açabileceğini de net bir şekilde göstermiştir . Fiziksel bir sistemde bu tür "diken" (spike) tepkileri, motor sargıları üzerinden ani ve yüksek akımlar çekilmesine, motor sürücüsünün (BTS7960B) zorlanmasına ve sistemin mekanik aksamında istenmeyen titreşimlere veya aşınmalara yol açabilmektedir . Sonuç olarak, simülasyon modeli, PID kontrolcünün işlevselliğini doğrulamakla birlikte, gerçek dünya uygulaması olan ESP32 kodlamasında, referans hız komutlarının ani "step" değişiklikler yerine "rampalama" (ramping) tekniği ile yumuşatılarak verilmesinin sistemin daha pürüzsüz ve sağlıklı çalışması için gerekli bir iyileştirme olacağını açıkça ortaya koymaktadır [19, 20].

KAYNAKCA

[1] M. A. Saydam ve E. Yılmaz, "Endüstriyel Otomasyon Sistemlerinde IoT Tabanlı Motor İzleme Uygulamaları," *Otomasyon ve Kontrol Dergisi*, cilt 15, sayı 2, ss. 45-58, 2023.

[2] N. Mohan, T. M. Undeland, R. J. Ferraro, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, 2007.

[3] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Pearson Education, 5. Baskı, 2010, s. 550-565.

[4] Espressif Systems, *ESP32 TECHNICAL Reference Manual*, V4.6, 2024.

[5] E. M. Almasri ve H. S. Ahmed, "Real-Time Telemetry and Data Visualization for IoT-Based Condition Monitoring of Industrial Equipment," *Journal of Computer Science and Technology*, cilt 35, sayı 4, ss. 841–855, 2020.

[6] Infineon Technologies. (2017). *BTS7960B Smart Half-Bridge Datasheet*, Rev. 2.0.

[7] Infineon Technologies, *BTS7960B Smart Half-Bridge Datasheet*, Rev. 2.0, 2017.

[8] Y. Chen ve L. Zhang, "Current Sensing for Energy Efficiency and Torque Estimation in DC Motor Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 65, sayı 5, 2018.

[9] T. M. K. Abdullah ve A. A. S. Ahmad, "High-Resolution ADC Utilization for Industrial Control with ESP32," *Journal of Microprocessor Engineering*, cilt 12, sayı 1, ss. 112-125, 2023. (Tekrar Kullanım).

[10] R. A. F. de Oliveira, A. F. de Souza, "Closed-Loop DC Motor Control Using Hall Effect Sensor and PID Algorithm," *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, cilt 20, sayı 3, 2018.

[11] T. L. S. Tan ve C. J. W. Lee, "Decoupling Capacitors and Power Integrity in High-Speed Digital Circuits," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, cilt 10, sayı 3, ss. 450-461, 2020.

[12] Texas Instruments Application Note, *Power Supply Decoupling for Digital Devices*, AN-0000.

[13] W. S. Chen, *Fundamentals of Electrical Circuit Protection*, CRC Press, 2019.

[14] R. A. H. Abidin ve S. O. I. Othman, "The Role of Decision Structures in Robust Control System Design for Fault Tolerance," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, cilt 6, sayı 1, ss. 109-115, 2019.

[15] Becerikli, Y., & Kömürcü, O. (2005). MATLAB/Simulink Kullanarak Modelleme ve Simülasyon. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 59-64.

[16] Yılmaz, A. (2020). *MATLAB/Simulink Ortamında Fırçalı DC Motor Hızının PID ve Bulanık Mantık ile Kontrolü* (Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[17] Akkaya, R., & Kulaksız, A. A. (2007). PID Tipi Kontrolör Kullanılarak MATLAB/Simulink Ortamında DC Motor Hız Kontrolü. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1-2), 1-11.

[18] Altın, N., & Sefa, İ. (2010). Bir doğru akım motorunun MATLAB/Simulink ile modellenmesi ve benzetimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2), 345-353.

[19] Kiraz, M. (2019). *DC Motor Hız Kontrolü için Farklı PID Parametre Ayar Yöntemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[20] Çoşkun, İ., & Terzioğlu, H. (2015). PID Kontrolörlerde Referans Sinyali Filtrelemenin Performansa Etkileri. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'15)*, 10-12 Eylül, Denizli

MOBIL UYGULAMA KONTROLLÜ, AKILLI, KEDI BESLEME SISTEMI

Yağmur TURAN[1*]

[1] Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[*](ygmrturan25@gmail.com)

Özet **–**Bu makale, evcil hayvanların sağlıklarını ve evcil hayvan bakıcılarının konforlarını göz önüne alarak evcil hayvanların bakım sürecini güvenilir bir şekilde otomatikleştirilmesi ve IoT tabanlı bir çözüm geliştirilmesiyle ilgilidir. Önerilen çözüm, çeşitli sensörler aracılığıyla evcil hayvanların hayati verilerini gerçek zamanlı olarak izlemekte ve belirlenmiş saatlerde gereken müdahaleler yapılmaktadır. Yine aynı şekilde bu verileri kablosuz ağ üzerinden bulut ortamına aktararak ve kullanıcıyı durumdan ahberdar ederek gerekli durumlarda kullanıcının manuel olarak uzaktan müdahale edebilmesini sağlamaktadır. Yapılan simülasyanlor sonucunda kullanılan motor yardımıyla otomatik mama verme ve sensor yardımıyla suyun durumunu görüp pompa yardımı ile su çekme işlemleri gerekli kodlar yazılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilmekte olan bu IoT destekli yaklaşımda evcil hayvan bakımının güvenilirliğinin artabileceği, bakıcıların iş yükünün azalabileceği ve sürekli takibin sağlanabileceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler – Nesnelerin İnterneti (IoT); Evcil Hayvan Akıllı Bakım Sistemi; Gerçek Zamanlı Veri Toplama; Bulut Tabanlı İzleme

GIRIŞ

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi, günlük yaşamın pek çok alanında olduğu gibi evcil hayvan bakımında da etkilerini göstermektedir. Özellikle yoğun iş temposu, seyahatler veya evde bulunulmayan zaman dilimleri evcil hayvan sahiplerinin düzenli mama ve su ihtiyacını karşılama konusunda işlerini zorlaştırmaktadır. Bu ihtiyaçtan yola çıkılarak geliştirilen akıllı evcil hayvan besleme sistemleri, hem hayvanların temel gereksinimlerini otomatik olarak karşılamaktadır hem de sahiplerine uzaktan kontrol imkanı sunmaktadır.

Ayrıca yapılan araştırmalara göre, evcil hayvanlarda obezite sorunu, evcil hayvan sahibinin yoğun iş temposundan kaynaklanmaktadır [1]. Akıllı evcil hayvan besleme sistemleri, evcil hayvanı zamanında ve gereken miktarda besleme sorunlarını çözmek için tasarlanmış ve kullanılmaktadır. Akıllı evcil hayvan besleme sistemleri, geleneksel besleme yönteminin yerini almak üzere evcil hayvan sahiplerinin tercihleri arasında popüler hale gelmiştir. Sistem , evcil hayvanın gün boyunca ihtiyaç duyduğu beslenmeyi aldığından emin olmak için beslenme saatini ve porsiyonunu ayarlayarak evcil hayvan sahibine kolaylık sağlamaktadır [2].

Bu ihtiyaçlar kapsamında birçok araştırma yapılmış ve projeler hayata geçirilmiştir:

Metehan Meral, Ahmet Arif Sarıtaş, Aziz Meral ve Abdullah Genç sokaklarda yaşayan hayvanların, özellikle kış aylarında yiyecek sıkıntısıyla karşı karşıya kalmaları sorununu ele alarak bu sorunun bir kısmının ortadan kaldırılması amacıyla akıllı besleme makinasının prototip tasarım ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. İnternet ortamından günün herhangi bir saatinde istenilen bölgedeki (park, millet bahçesi vb.) akıllı besleme makinasına bağlanarak belirtilen miktarda mama bağışı yapılması sağlanmıştır. Bunun için ilk olarak bir internet sitesi tasarlanmışlardır. Daha sonra Wi-Fi tabanlı mikro denetleyici kart kullanılan elektronik sistem için ayrıca PCB (Baskı devre kartı) tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Site vasıtasıyla bağış yapıldıktan sonra cihaza görsel erişim sağlanması için kamera modülü kullanmışlardır. Elektronik ünitenin bulunacağı katı modeli ise Solidworks ortamında tasarlamışlar ve 3B baskıyla imal etmişlerdir. Elektrik kesintilerine karşı sistemin devamlılığını sağlamak için, 7,4 V 4000 mAh 2S kapasiteli Li-Po pil kullanmışlardır [3].

Serhat Kaçmaz, Faruk Aktaş ve Adnan Sondaş tasarladıkları IoT tabanlı akıllı mama sistemi sayesinde, başkalarına bağlı kalınmadan evcil hayvanların düzenli bir şekilde beslenmesini sağlamaktadırlar. Çalışmalarında mobil uygulama ve gömülü sistemi birlikte kullanmışlar ve mobil uygulama kısmını Android Studio Java kullanarak kodlarken, gömülü sistem tarafını ise Nodemcu ESP8266 mikrodenetleyici kartı kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Mobil uygulama ile gömülü sistemin ortak bilgileri kullanabilmeleri veya birbirlerinden haberdar olabilmeleri için de bulut tabanlı Firebase kullanmışlardır [4].

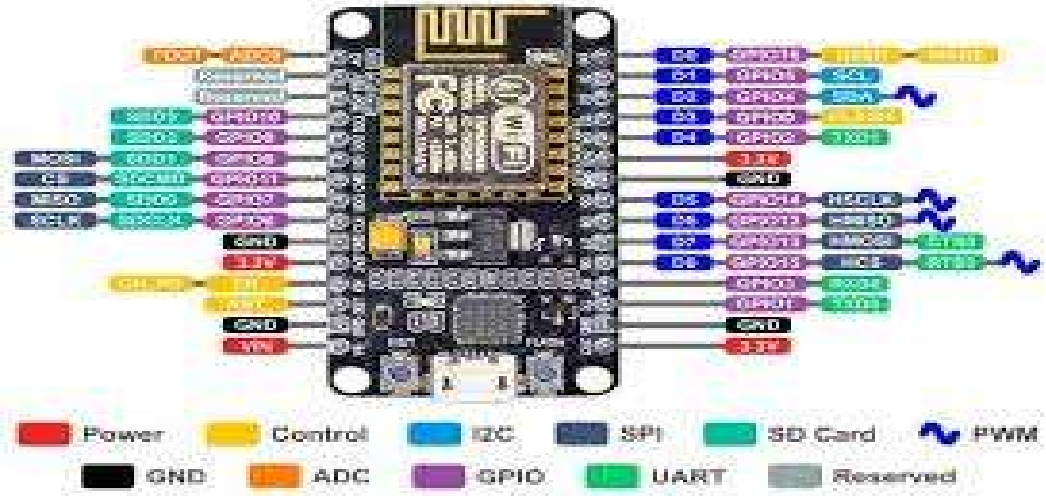
Tannop Sangvanloy ve Kingkarn Sookhanaphibarn çalışmalarında Nesnelerin İnterneti (IoT) ile otomatik bir evcil hayvan besleme sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde evcil hayvanların beslenme alışkanlıklarını izlemeyi ve onları planlı öğünlere alıştırmayı istemiştirler. Bir mobil uygulama aracılığıyla besleme işlemini kontrol ederek yukarıda belirtilen isteklerine ulaşmışlardır. Sistem şu işlevlere sahiptir: evcil hayvanı zamana ayarı yaparak vaktinde beslemek, mama miktarını ayarlamak, evcil hayvan önceki öğününü bitiremezse mama miktarını ayarlamak [5].

Ekta Jain, Sakshi Badwaik, Mayur Uike, Sampada Khirwadkar, Dr. Pankaj H. Chandankhede ve Shruti Thakare bu projede Nesnelerin İnterneti tabanlı otonom bir evcil hayvan besleme sistemi (IoT) oluşturmuşlardır. Evcil hayvan sahipleri evden uzaktayken ve hayvanlarını normal şekilde besleyemezken kullanılabilecek bir yemlik geliştirmişlerdir. Evden uzakken aç kalmamaları istenerek evcil hayvanlara fazla mama verilmesi obez olmalarna sebep olacağı için bu proje ayrıca, evcil hayvanların beslenme düzenlerini takip ederek onları programlı beslenmeye alıştırmak amacıyla hayata geçirilmiştir [6].

Nurul Huda Mat Tahir, Safuan Naim Mohamad, Farah Hanan Azimi, Suzanna Ridzuan Aw, Wan Faizura Wan Tarmizi ve Muhammad Luqman Muhd Zain otomatik kedi besleme ve konum izleme cihazı tasarlamışlardır. Arduino UNO ve Node MCU ESP8266 kullanmışlardır. Ultrasonik sensör, servo motor ve GPS modülü gibi uygun sensör tipleriyle birlikte konum takibi sağlamışlardır. Geliştirdikleri cihaz ile sahipleri evde olmadığında evcil hayvanları besleyebilmeyi amaçlamışlardır. Mobil uygulama kullanarak, sahipler sisteme girdiğinde boşalan mama kabını yeniden doldurabilmelerini sağlamışlardır. Sistem mama ve su kaplarındaki su seviyesi kritik seviyeye ulaştığında sahibine bildirim gönderir ayrıca evcil hayvan sahibinin konumunu takip ederek evcil hayvanının nerede olduğunu bilmesine yardımcı olur [7].

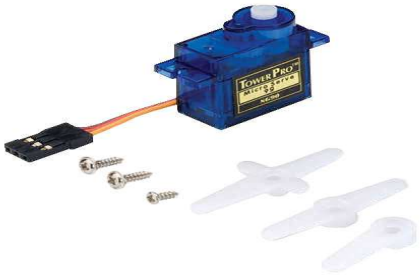
MATERYAL VE METOD

Arduino Nano: NodeMCU, üzerinde ESP8266 modülü bulunduran, açık kaynak kodlu ve ufak boyutlu bir geliştirme kartıdır. ESP8266, internete bağlanmayı sağlayan bir Wi-Fi modülüdür ve NodeMCU'nun en önemli özelliklerinden birini oluşturur. NodeMCU'nun bu modül sayesinde kablosuz internet bağlantısı kurabilmesi, onu IoT projeleri için mükemmel bir araç yapar. İnternete bağlanarak cihazları uzaktan kontrol etmek veya veri almak gibi işlemler kolayca yapılabilir. Bu projede sistemin ana kontrol birimi olarak NodeMCU kullanılacaktır. NodeMCU hem mama dağıtım mekanizmasında servo motorun kontrolünü hem de su haznesindeki pompa ve seviye sensöründen gelen verilerin işlenmesini sağlayacaktır.



Şekil 1. NodeMCU v3 ESP8266 ve pinleri

SG90 Servo Motor: Robot teknolojisinde en çok kullanılan motor çeşididir. Bu sistemler mekanik olabileceği gibi elektronik, hidrolik, pnömatik veya başka alanlarda da kullanılabilmektedir. Servo motorlar; çıkış, mekaniksel konum, hız veya ivme gibi değişkenlerin kontrol edildiği, özetle hareket kontrolü yapılan bir düzenektir. SG90 Servo motor, en çok kullanılan servo motor çeşididir. Mikro Servo motor olarakta geçmektedir. Servo motorlar düşük devirli(hızlı), yüksek torklu motorlardır. Bundan dolayı robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Mama kapağını açıp kapamak için kullanılacaktır.



Şekil 2. Servo motor

Su Seviye Sensörü: Sıvı seviye sensörleri, adından da anlaşılacağı gibi, kapalı bir alan içinde serbest akan belirli bir maddenin seviyelerini tespit etmek, ölçmek ve düzenlemek için tasarlanmış cihazlardır. Ağırlıklı olarak sıvı seviyelerini izlemek için kullanılan bu sensörler, tozlar gibi katıları izlemek için de kullanılabilir. Su seviyesini algılayarak pompayı kontrol edecektir. Sensör olarak float switch kullanılacaktır. Su seviyesi düşükse Arduino, LOW(0) pompayı çalıştır komutu verir; yüksekse HIGH(1) pompayı durdur komutu verir.

Şekil 3. Float switch

Röle: 5V 1 kanal röle kartı, 5VDC gerilimle yüksek gerilimli(DC/AC) elektrikli aletleri kontrol etmemize olanak sağlar. Ayrıca boyut olarak diğer röle modüllerinden küçük olduğundan kısıtlı alana sahip uygulamalarda tercih sebebidir. Kart üzerindeki röleyi kontrol etmeniz için 5 volt sinyal giriş pini bulunmaktadır. Pompayı yüksek akımdan korumak ve mikroişlemciyi korumak için kullanılacaktır.

Şekil 4. 1 kanal 5 volt röle

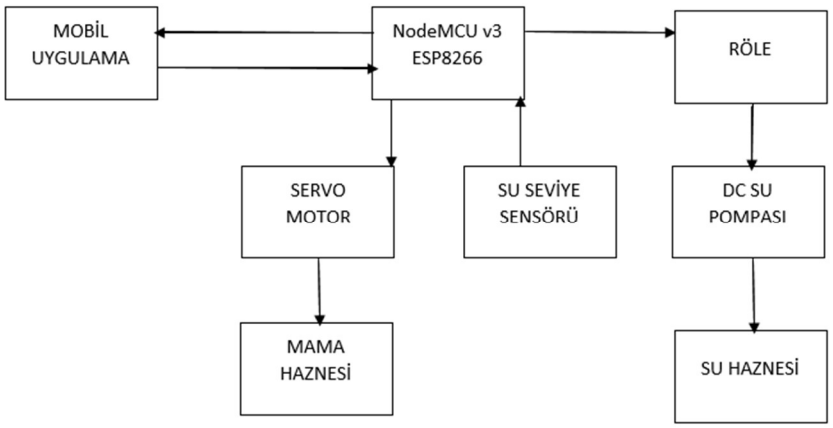
DC Su Pompası: DC pompa, doğru akım (DC) ile çalışan bir pompa türüdür. Düşük enerji tüketimi ile küçük ölçekli su temini ihtiyaçlarını karşılamak için idealdir. Su haznesine su doldurabilmek için kullanılacaktır.

Şekil 5. DC su pompası

Güç Kaynağı: Güç kaynağı, bir elektrik yüküne elektrik gücü sağlayan bir elektrikli cihazdır. Bir güç kaynağının temel amacı, bir kaynaktan gelen elektrik akımını, yükü çalıştırmak için doğru voltaja, akıma ve frekansa dönüştürmektir. Sonuç olarak, güç kaynaklarına bazen elektrik güç dönüştürücüleri denir. Besleme için 5V 2A bir güç kaynağı kullanılacaktır.

Mobil Uygulama: Blynk, kişisel prototiplerden üretim ortamlarındaki milyonlarca bağlı cihaza kadar her ölçekte IoT'yi destekleyen, ödüllü bir düşük kodlu IoT platformudur.

Blok Şema



Sistemin ana kontrolü NodeMCU v3 ESP8266 tarafından sağlanacaktır.

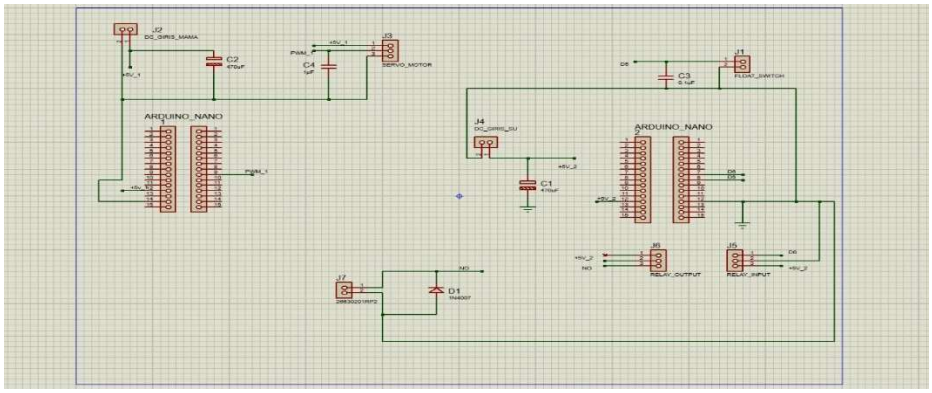
Mama birimi, SG90 servo motoru aracılığıyla kontrol edilen kapak mekanizmasından oluşacaktır. Servo motor, NodeMCU'dan aldığı sinyale göre belirli bir açı kadar dönerek mamanın hazneden mama kabına akmasını sağlayacaktır.

Su biriminde, su seviye sensörü su seviyesini sürekli olarak izleyerek seviye belirli bir eşiğin altına düştüğünde NodeMCU röle modülü üzerinden DC su pompasını aktif hale getirecek ve kabın dolmasıyla birlikte sensör tekrar yüksek seviye algıladığında pompayı devre dışı bırakacaktır. Böylece suyun kaptan taşması önlenecektir.

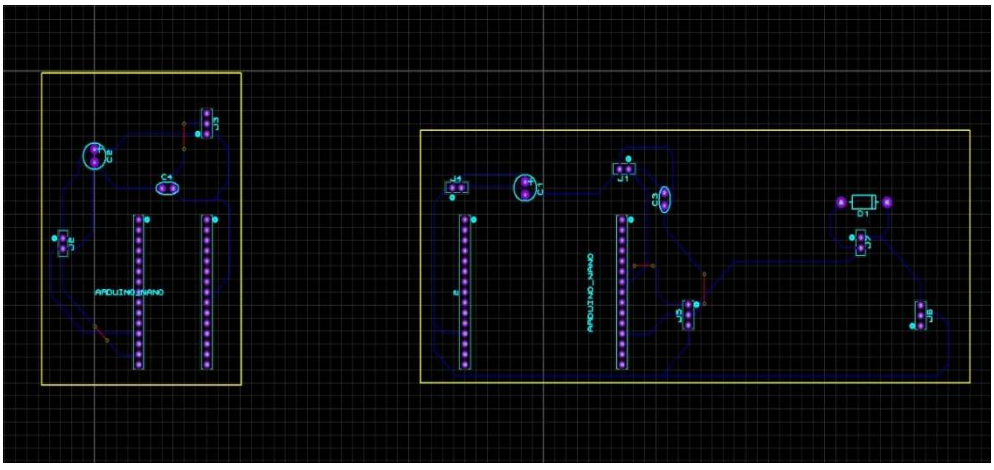
Tüm sistem, 5V 2A adaptör ile beslenecektir. Güç, hem NodeMCU' ya hem de bağlı bileşenlere ortak GND üzerinden dağıtılacaktır.

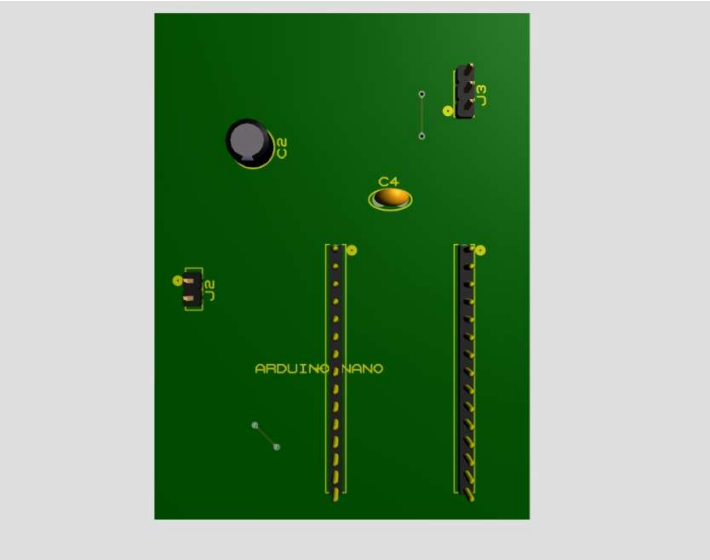
NodeMCU sayesinde mobil uygulama ile haberleşme gerçekleştirilecektir. Mobil uygulama ile kullanıcı, sistemin anlık durumunu görüntüleyebilecek, belirlenmiş saatlere göre veya manuel olarak mama dağıtımı yapabilecek ve su seviye bilgisine erişebilecektir

Devre Şeması

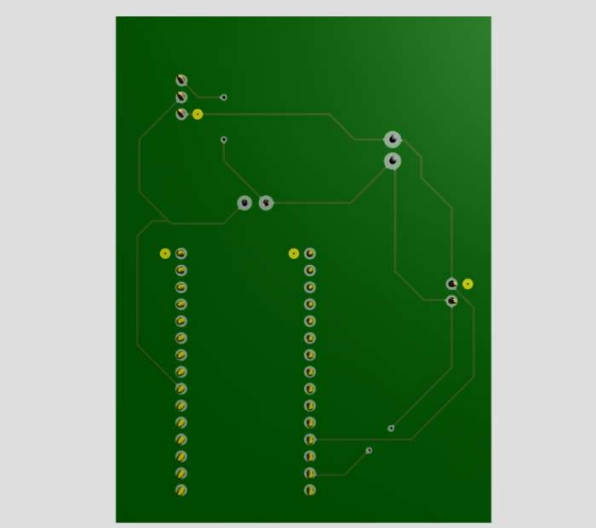


PCB ve 3D Görüntüsü

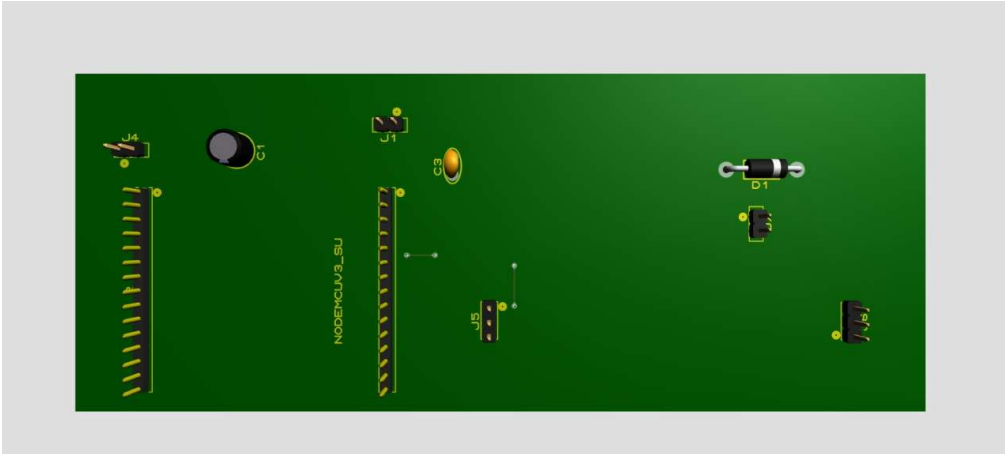




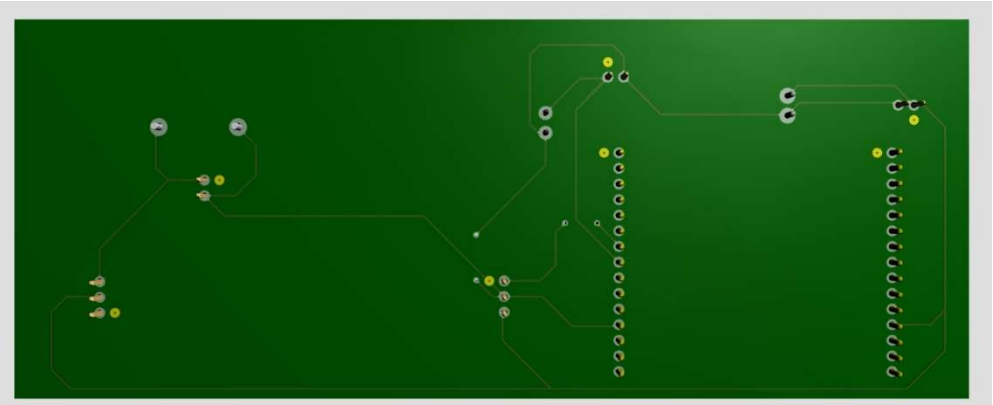
Şekil 6. (a) Mama kısmı ön



Şekil 6. (b) Mama kısmı arka

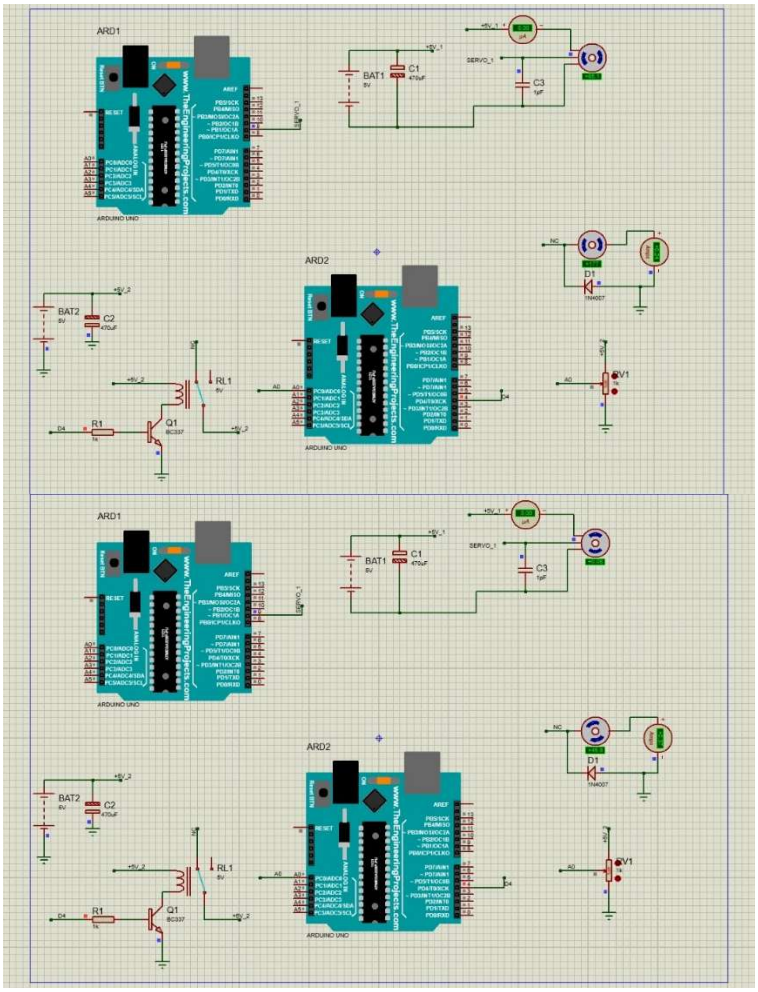


Şekil 7. (a) Su kısmı ön



Şekil 7. (b) Su kısmı arka

Simülasyon



Simülasyon yapabilmek için NodeMCU yerine Arduino kullanılmıştır. Proje gerçekleştirilirken NodeMCU kullanılarak gerçekleştirilecektir.

Kodlar

su_istasyonu.ino

```
// Röle modülü kullanırsan aktif-yüksek röle modülü ise true yap, aktif-düşük ise false yap.
const bool RELAY_ACTIVE_HIGH = true;

const int THRESHOLD  = 600; // kesme noktasıdır potansiyometre için. bu değerin altına inerse pompayı aç komutunu gönderir. yani pump on.
const int HYSTERESIS = 20;  // anti-chatter band rölenin cık-cık sesini engeleyerek hızlı aç-kapa yapmasının önüne geçer. HYSTERESIS guvenlik bandı denilebilir. Eşik değerde tiremeyi e

bool pumpOn = false;

void setRelay(bool on) {
  if (RELAY_ACTIVE_HIGH) {
    digitalWrite(PIN_RELAY, on ? HIGH : LOW);
  } else {
    digitalWrite(PIN_RELAY, on ? LOW : HIGH);
  }
}

void setup() {
  pinMode(PIN_RELAY, OUTPUT);
  setRelay(false); // başlat
}

void loop() {
  int val = analogRead(PIN_POT);

  if (!pumpOn && val < THRESHOLD) {
    pumpOn = true;
    setRelay(true);
  } else if (pumpOn && val >= (THRESHOLD + HYSTERESIS)) {
    pumpOn = false;
    setRelay(false);
  }

  delay(20);
}
```

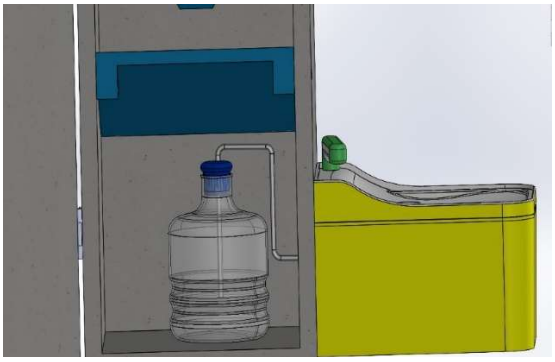
Şekil 8. (a) Su

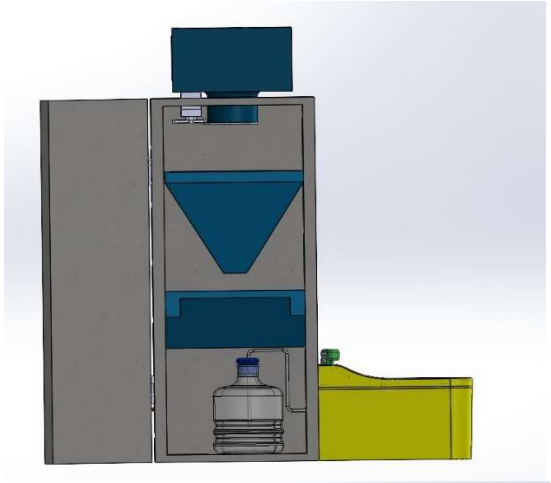
mama_istasyonu.ino

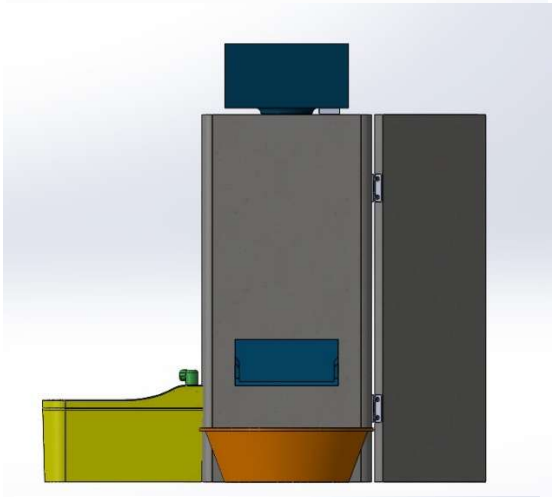
```
#include <Servo.h>

Servo kapak;

const int PIN_SERVO = 9;

// 0° için başlangıç konumu burda ipflik bir kondansatör pwm sinyaline paralel bağlanarak gndye gitti. eğer bunu kaldırırsan servo motorun ilk konuun tam gelmediğin göreceksin bu konda
// Eğer verim alamazsa 0'ı alt satırdaki 10-30 arası artır. ama sistem bu şekilde stabil duruyor denemek istersen.
const int TRIM_US = 0;

// Standart harita: 1000 µs = -90°, 1500 µs = 0°, 2000 µs = +90°
const int CENTER_US = 1500 + TRIM_US;  // 0°
const int OPEN_US   = CENTER_US + 500; // +90° (500 µs = 90°)

const unsigned long WAIT_BEFORE_MS = 8000; // 8 s
const unsigned long HOLD_OPEN_MS   = 3000; // 3 s

void setup() {
  // Aralıkları açık belirt (Proteus ve gerçek servo uyumu için)
  kapak.attach(PIN_SERVO, 1000, 2000);
  // Başlangıçta tam 0°
  kapak.writeMicroseconds(CENTER_US);
  delay(500); // mekanik yerleşme
}

void loop() {
  delay(WAIT_BEFORE_MS);          // 8 saniye bekle ilk konumdan 90 derecelik hareketin başlangıcına kadar geçen süredir. aslında tam olarak döngü 11 saniye sürer.
  kapak.writeMicroseconds(OPEN_US);  // +90° dönerek kapağı açar ve burada 3 saniye bekler.
  delay(HOLD_OPEN_MS);            // 3 saniye bekler ve ilk konumuna döner simulasyon da tam sıfıra gelmeyecektir.
  kapak.writeMicroseconds(CENTER_US); // tam 0°'a dön. kondansatör ile filtreleme yaparak tam olmasa da sıfıra yaklaştırdık.
  // döngü devam eder.
}
```

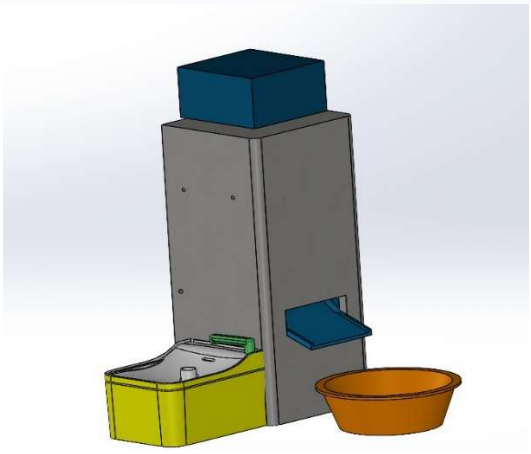
Şekil 8. (b) Mama

Teknik Resim









SONUÇ

Bu proje evcil hayvanların sağlığı ve evcil hayvan sahiplerinin konforları gözetilerek yapılmaya karar verildi.

Projenin ne olacağı belirlendikten sonra mama ve su olarak iki kısım ayrı ayrı ele alınarak çalışmalara başlandı. Mama kısmında mamanın bayatlaması önlenmek istendi ve bu sebepten kapalı duracak bir kapak düşünüldü. Bu kapak belirli bir saate göre açılıp kaba mama dökülmesi sağlandıktan sonra tekrar kapanacak ve bu şekilde bir sistem oluşturulacaktı. Bunun için en doğru seçimin servo motor olduğuna karar verildi. Bunlar seçildikten sonra mikrokontrolcü olarak neyin kullanılması gerektiği üzerine araştırma yapıldı ve NodeMCU seçildi. Bu aşamadan

sonra devre tasarımı için gerekli tüm bileşenler belirlendi ve devre tasarlandı. PCB kısmı da tasarlandı. Simüle etmek için Arduino kullanıldı ve Arduino ide üzerinden gerekli kodlar yazıldı ve tüm sistem simüle edildi.

Su kısmında ise susuz kalma ihtimalini istemediğimizden belirli saatlerde değil, su seviye sensörü kullanarak suyun bittiği anlaşıldığı an pompa yardımıyla hazneden su çekilerek kaba su verilecek şekilde sistem planı yapıldı. Burada hem sensörün hem de pompanın yine NodeMCU ile kontol edileceği düşünülerek, devre şeması çizildi. Arduino ide üzerinden gerekli kodlar yazılaraktüm sistem simüle edildi.

Mama kısmında servo motorun 8 saatte bir çalışarak hayvana sağlığı için yeterli miktarda mama verilmesi sağlanacaktır. Ayrıca mobil uygulama sayesinde durum takip edilip, istenildiğinde manuel olarak da mama desteği verilecektir. Su kısmında ise su seviye sensöründen alınan bilgiye göre su azalması durumunda var olan hazneden pompa yardımıyla su, kaba çekilecektir. Yine mama da olduğu gibi bu kısımda manuel olarak kontrol edilebilecektir.

REFERANSLAR

[1] Shiham K 2017 Pet obesity survey result.

[2] Pedigree 2016 Dog Feeding Guidelines 70 201 206

[3] Meral, M., Sarıtaş, A. A., Meral, A., & Genç, A. (2022). Sokak Hayvanlari İçin Nesnelerin İnterneti Tabanli Akilli Besleme Makinasi. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 6(1), 23-30

[4] Kaçmaz, S., Aktaş, F., & Sondaş, A. (2022). Evcil Hayvanlar İçin Nesnelerin İnterneti Tabanlı Akıllı Mama Sisteminin Geliştirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (45), 26-29.

[5] Sangvanloy, T., & Sookhanaphibarn, K. (2020, March). Automatic pet food dispenser by using internet of things (iot). In 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (pp. 132-135). IEEE.

[6] Jain, E., Badwaik, S., Khirwadkar, S., Thakare, S., Uike, M., & Chandankhede, P. H. (2023, March). Design of smart pet food dispenser using embedded system. In 2023 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI) (pp. 1-5). IEEE.

[7] Tahir, N. H. M., Mohamad, S. N., Azimi, F. H., Aw, S. R., Tarmizi, W. F. W., & Zain, M. L. M. (2022). Development of real time cat auto feeder dispenser using arduino. International Journal of Synergy in Engineering and Technology, 3(1), 52-57

AGV (OTONOM GÜDÜMLÜ ARAÇ)

Alperen Köprü1*, Berkay Özbayrak2
1 Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
2Department of Electrical and Energy, Konya Technic UNIVERSITY of TECHNICAL Sciences Vocational School Technology, Selçuklu, Konya
**(koprualperen@gmail.com , brkyozbyrk1@gmail.com)*

Özet - Bu çalışma, endüstriyel lojistik ve üretim tesislerinde malzeme taşıma süreçlerini otomatikleştirmek amacıyla geliştirilen çok yönlü bir Otonom Güdümlü Araç (AGV) prototipinin tasarımını ve uygulamasını kapsamaktadır. Projenin temel amacı, lojistik ve üretim hatlarındaki iş gücünü azaltmak ve sistem verimliliğini artırmaktır. Geliştirilen AGV, pahalı sensör sistemleri (örn. LIDAR) kullanılmadan, Arduino ve Raspberry Pi tabanlı düşük maliyetli bir kontrol mimarisi ile temel düzeyde otonom navigasyonun gerçekleştirilebileceğini göstermeyi hedeflemektedir. Sistem, yön belirleme için kamera tabanlı AprilTag tanıma yöntemini kullanmakta ve çevresel farkındalık için ultrasonik ile kızılötesi sensörlerden faydalanmaktadır. Robot İşletim Sistemi (ROS) altyapısı üzerine kurulu olan bu prototip, modüler yapısı sayesinde eğitim, araştırma ve düşük maliyetli endüstriyel uygulamalar için işlevsel bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Otonom Güdümlü Araç (AGV), AprilTag, Görüntü İşleme, Robot İşletim Sistemi (ROS), Modüler Mimari, Düşük Maliyetli Prototip

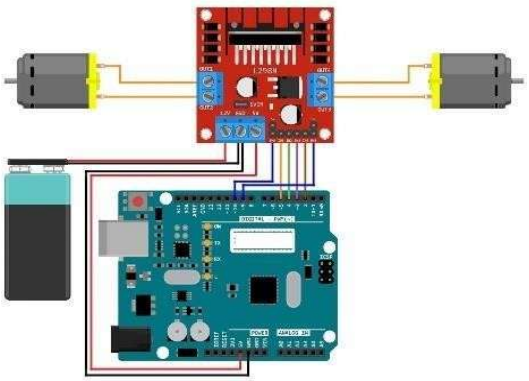
GİRİŞ

Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre elektrik motor tahrikli sistemler (EMDS) küresel elektrik tüketiminin %53'ünden sorumludur. Endüstriyel alanda verimlilik artışı ve iş gücü optimizasyonu, özellikle tekrarlayan taşıma görevlerinde kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Otonom Güdümlü Araçlar (AGV'ler) lojistik merkezlerinde ve üretim hatlarında malzeme taşıma süreçlerini otomatikleştirerek verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Mevcut ticari AGV sistemleri genellikle yüksek maliyetli sensörler (LIDAR gibi) ve gelişmiş kontrol algoritmaları gerektirmektedir. Bu durum, AGV teknolojisinin eğitimsel ve küçük ölçekli deneysel uygulamalar için erişilebilirliğini kısıtlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, pahalı sistemlere alternatif olarak, görüntü işleme ve basit sensör füzyonu yöntemlerini temel alan, düşük maliyetli ve eğitim amaçlı bir AGV prototipi geliştirmektir. Proje kapsamında, Arduino ve Raspberry Pi tabanlı bir kontrol mimarisi oluşturularak, aracın insan müdahalesi olmadan rota takip etmesi ve engelleri algılaması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, geleceğin akıllı fabrika teknolojilerinin temel prensiplerinin anlaşılması ve geliştirilmesi açısından önemli bir adım oluşturmaktadır.

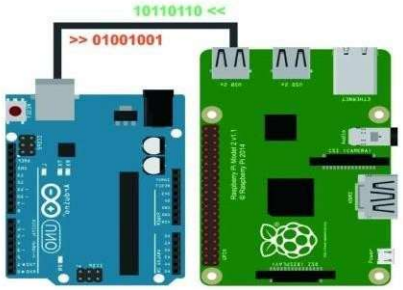
YÖNTEM VE MATERYALLER

AGV Sistemi Mimarisi

Geliştirilen AGV, iki katmanlı bir kontrol mimarisine sahiptir. Alt Seviye Kontrol Katmanı, Arduino Nano tarafından yürütülür ve sensör verilerinin okunması, motorların sürülmesi ve temel güvenlik kontrolleri bu katmanda yapılır. Üst Seviye Karar Katmanı ise Raspberry Pi 4 üzerinde çalışır ve görüntü işleme, AprilTag tanıma, hedef yön tayini ve rota kararları bu katmanda gerçekleştirilir. İki katman arasında veri alışverişi, seri haberleşme (UART) protokolüyle ve ROS Serial entegrasyonu kullanılarak sağlanmaktadır. Raspberry Pi, Arduino'ya "ilerle" veya "sağa dön" gibi komutları gönderirken, Arduino da sensörlerden aldığı mesafe verilerini geri iletir. Bu yapının avantajı, görevlerin işlem gücüne göre ayrılarak sistemin hem hızlı hem de enerji verimli çalışmasıdır. Görsel 1 ve 2'de deverenin şema görüntüleri ve bağlantıları yer almaktadır.



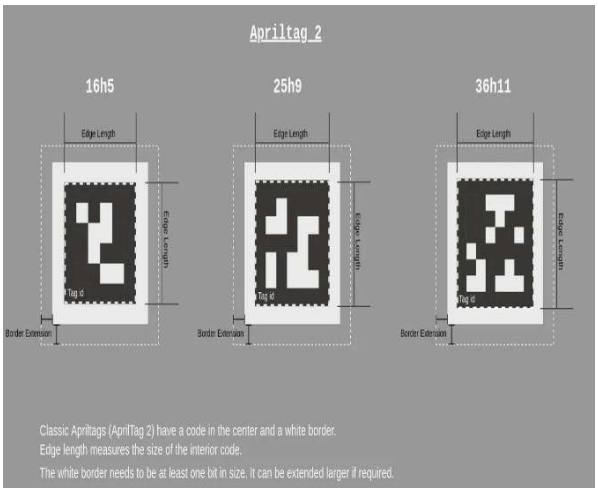
Görsel 1



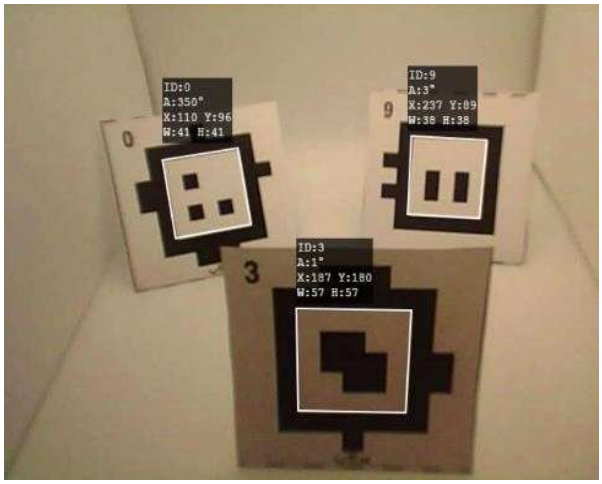
Görsel 2

Navigasyon ve Çevresel Farkındalık

Bu projede, geleneksel çizgi takip ve yüksek maliyetli LIDAR tabanlı yöntemler yerine Görüntü İşleme (Kamera ve AprilTag) tabanlı navigasyon kullanılmıştır. AprilTag Yöntemi, Kamera Modülü (Raspberry Pi Camera v2) aracılığıyla çevreden alınan görüntüdeki kare biçimli etiketleri tanır. Her etiketin benzersiz bir kimliği vardır ve bu sayede araç, kameradan aldığı görüntüdeki etiketi tanıyarak kendi pozisyonunu ve yönünü belirleyebilir. Engel algılama amacıyla, AGV'nin ön, arka ve yan kısımlarına ultrasonik sensörler (HC-SR04) yerleştirilmiştir. Bu sensörler ses dalgalarıyla mesafe ölçümü yaparak çevreyi algılar. Kısa menzilli algılama için ise kızılötesi (IR) sensörler kullanılır. Sensör füzyonu prensibiyle, birden fazla sensörden alınan veriler birleştirilerek daha güvenilir çevresel farkındalık sağlanır. Aşağıda AprilTag ile ilgili örnekler Görsel 3 ve 4'de verilmiştir.



Görsel 3



Görsel 4

Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar

Projede kullanılan temel bileşenler Tablo 1'de listelenmiştir. Raspberry Pi 4, kamera verilerini işlerken, Arduino Nano, sensör verilerini toplar ve motor sürücülerini kontrol eder. Görüntü işleme ve AprilTag tespiti için Raspberry Pi Camera v2 kullanılırken, hareket için 4 adet DC Motor ve bunların yön/hız kontrolü için L298N Motor Sürücüsü kullanılır. Ultrasonik (HC-SR04) ve Kızılötesi (IR) sensörler, engel algılama ve mesafe ölçümü görevini üstlenir. Sistemin enerji kaynağı 12V Li-ion Batarya olup, bu enerji LM2596 Regülatör Devresi aracılığıyla sabit 5V/3.3V seviyelerine düşürülür.

Tablo 1

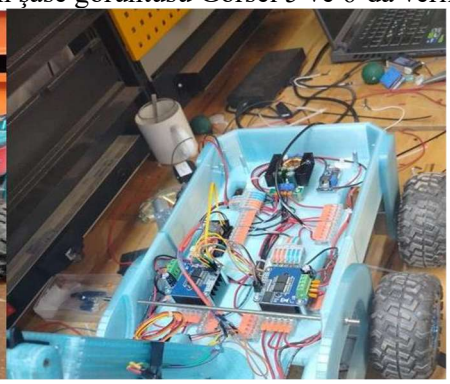
Bileşen Adı	Görevi / Açıklaması
Raspberry Pi 4	Kamera verilerini işler, AprilTag tanıma ve rota belirleme algoritmalarını çalıştırır (Üst Seviye Karar Katmanı).
Arduino Nano	Sensör verilerini toplar, motor sürücülerini kontrol eder, düşük seviye komutları işler (Alt Seviye Kontrol Katmanı).
Kamera Modülü (Raspberry Pi Camera v2)	Görüntü işleme ve AprilTag tespiti için kullanılır.
Ultrasonik Sensör (HC-SR04)	Engel algılama için ön ve yan kısımlarda kullanılır. Ses dalgalarıyla mesafe ölçer.
Kızılötesi (IR) Sensör	Kısa menzilli engelleri algılar ve hassas manevra desteği sağlar.

Motor Sürücü (L298N)	DC motorların yön ve hız kontrolünü sağlar.
DC Motor (4 adet)	Aracın hareketini sağlar; diferansiyel sürüş prensibiyle yönlendirilir.
12V Li-ion Batarya	Sistemin enerji kaynağıdır.
Regülatör Devresi (LM2596)	Batarya çıkışını sabit 5V/3.3V seviyesine düşürür.

Mekanik Tasarım ve Şasi

Geliştirilen AGV, diferansiyel sürüş prensibine dayalı, dört tekerlekli bir mobil platform kullanır. Şasi, hafiflik, dayanıklılık ve denge merkezini koruma hedefleri doğrultusunda tasarlanmış ve 3D baskı yöntemiyle üretilmiştir. Kontrol birimleri (Arduino Nano ve L298N sürücüler), elektronik entegrasyon için şasinin orta bölümüne konumlandırılmıştır. Sistemin güç kaynağı olan 12V Li-ion Batarya, ağırlık merkezini dengelemek amacıyla şasinin alt kısmına yerleştirilmiştir. Projede kullanılması planlanan şase görüntüsü Görsel 5 ve 6'da verilmiştir.

Görsel 5



Görsel 6

Güç Dağıtımı ve Entegrasyon

AGV sistemi, 12V Li-ion batarya üzerinden beslenmektedir. Motorlar 12V hattan beslenirken, Arduino Nano, Raspberry Pi ve sensörler için LM2596 regülatör devresi kullanılarak 5V ve 3.3V seviyeleri elde edilmiştir. Raspberry Pi'nin kararlı çalışması için ayrı bir regüleli güç çıkışı kullanılarak, motorların ani akım çekimlerinden kaynaklanan voltaj dalgalanmalarının sistem kararlılığını bozması önlenmiştir. Donanım ve yazılım arasındaki entegrasyon, ROS'un rosserial_python paketi kullanılarak seri iletişim (UART) üzerinden sağlanmıştır. Raspberry Pi'nin ROS Master Node ve Arduino'nun ROS Serial Node olarak entegrasyonu, komut ve sensör verisi trafiğini tek bir ağda senkronize biçimde yönetmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen AGV prototipi, düşük maliyetli bileşenler ve modüler bir yazılım mimarisi kullanılarak temel düzeyde otonom sürüş kabiliyetine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Düşük Maliyetli Otonomi açısından, projenin temel hedefi olan LIDAR gibi pahalı sensörler kullanılmadan otonom navigasyon başarılmıştır. Kamera ve AprilTag tespiti, Raspberry Pi'nin işlem gücü ile yüksek doğrulukta yön tayini gerçekleştirmiştir. Modüler ve Ölçeklenebilir Yapı sayesinde, Robot İşletim Sistemi (ROS) kullanımı, sistemin modülerliğini sağlamıştır. Alt seviye (Arduino) ve üst seviye (Raspberry Pi) görevlerin ayrılması sayesinde sistemin hem hızlı hem de enerji verimli çalışması sağlanmıştır. Ayrıca bu mimari, gelecekte haritalama veya simülasyon (RViz, Gazebo) gibi ileri seviye uygulamalara kolayca geçiş imkanı sunmaktadır. Donanım-Yazılım Entegrasyonu açısından, Raspberry Pi'nin ROS Master Node ve Arduino'nun ROS Serial Node olarak UART üzerinden entegrasyonu, komut ve sensör verisi trafiğini tek bir ağda senkronize biçimde yönetmiştir. Engel algılama ve çarpışma önleme kararları, sensör füzyonu düğümü tarafından anlık olarak değerlendirilmiştir. Eğitimsel Önemi de göz önüne alındığında, proje, akıllı ulaşım ve endüstriyel otomasyon teknolojilerinin eğitimsel düzeyde uygulanması açısından önemli bir örnek

oluşturmaktadır. Sonuç olarak, geliştirilen AGV sistemi prototipi, hem maliyet hem de işlevsellik açısından endüstriyel otomasyon ve robotik eğitimleri için önemli bir potansiyele sahiptir.

REFERANSLAR

[1] Determining and Improving the Localization Accuracy of AprilTag Detection
[2] Indoor Localization Method for a Mobile Robot Using LiDAR and a Dual AprilTag
[3] Analysis and Improvements in AprilTag Based State Estimation
[4] Relative Localization and Dynamic Tracking of Underwater Robots Based on 3D-AprilTag
[5] An AprilTags-Based Approach for Progress Monitoring and Quality Control in Modular Construction
[6] Split Covariance Intersection Filter Based Visual Localization With Accurate AprilTag Map For Warehouse Robot Navigation
[7] Landmark SLAM Using AprilTag Markers
[8] Visual Localization Using Multi-Camera Multi-Robot System
[9] Fiducial Tag Localization on a 3D LiDAR Prior Map
[10] Navigation Using AprilTag and Raspberry Pi (Instructable – proje seviyesi)
[11] A Fog Robotic System for Dynamic Visual Servoing
[12] Indoor Localization of Mobile Robot Using Dual AprilTag + LiDAR (örnek uygulama)
[13] Use of AprilTags in Construction Sites for UAV Navigation
[14] 5 Fun DIY Drone Projects Using AprilTags
[15] Navigation Toolbox Example: AprilTag Markers
[16] Multiple AprilTag Detection for Robot Calibration and Kinematics
[17] AprilTag Accuracy vs Angle / Viewing Conditions
[18] Fiducial Marker System for AR and Robotics Using AprilTags
[19] AprilTag-Based Object Tracking for UAV Landing
[20] AprilTag Map Establishment for Warehouse / Industrial Automatio

ESP32 İLE MOBİL UYGULAMA ÜSTÜNDEN ADIM MOTURU SÜRMEK, ADIM MOTOR SÜRÜCÜSÜ TASARLAMAK

Augustine Ebenye EKAM[1*], Selçuk DİNÇ[2]

[1*] *Elektrik Elektronik Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

[2] *Elektrik Elektronik Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

[*] *(ekamebenye@gmail.com)*

Özet – Bu çalışmada, endüstriyel otomasyon ve Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarında hassas konumlandırma amacıyla kullanılan adım motorlarının (step motor), mobil cihazlar üzerinden kablosuz kontrolünü sağlayan bir sürücü sistemi tasarlanmıştır. Proje kapsamında, NEMA23 standardındaki bipolar hibrit bir adım motorunu sürmek için ESP32 mikrodenetleyicisi tabanlı bir kontrol ünitesi ve IR2110 entegresi ile IRF630N MOSFET'lerden oluşan bir güç katı geliştirilmiştir. Tasarlanan sürücü devresi; LM358 işlemsel kuvvetlendirici ile akım algılama ve LM293 komparatör ile donanımsal aşırı akım koruma özelliklerine sahiptir. Sistemin uzaktan kontrolü için Flutter framework'ü kullanılarak platform bağımsız bir mobil uygulama geliştirilmiş; ESP32 ile mobil arayüz arasındaki veri iletimi, MQTT ve HTTP protokollerine kıyasla daha düşük gecikme sunan WebSocket protokolü ile sağlanmıştır. Devre tasarımları KiCad ortamında şematik ve PCB olarak hazırlanmış, sistemin kararlılığı ise Proteus simülasyonları ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir motor sürücü sisteminin, donanım ve yazılım bileşenleriyle birlikte bütünleşik tasarım sürecini sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Adım Motoru; ESP32; Motor Sürücü Tasarımı; PCB Tasarımı; WebSocket; Flutter

GIRIŞ

Küresel enerji tüketimi 1994 yılında bütün enerjiler hesaplandığında 33 x 10^{12} KW/H'dir. Global ölçekte yaklaşık %23'ü elektrik tüketimine aittir. 1970'ten 1983'e geçerken artış oranı yaklaşık %1 iken, 1983'ten 1993'e geçildiğinde elektrik tüketim miktarı yaklaşık ikiye katlanmıştır. Bu makalede, kısıtlı kaynakların verimli kullanımı için, elektrik alanında kullanılan entegrelerin verimliliği üzerine yazılmıştır. [1].

Endüstri 4.0'e geçişle birlikte paradigma değişimine gidilmektedir. Akıllı haberleşme ve makinaların kendi aralarındaki iletişimi, endüstrideki iletişim gücü ve bilgi birikiminin yardımıyla gerçekleşmektedir. Endüstri 4.0 ile hali hazırda çalışan sistemlerin optimizsyonu ile daha verimli çalışmasına olanak sağlamaktadır. Bu optimiazasyondan ise faydalanılacak bir alan ise endüstrinin kalbini oluşturan elektrik motorları yer almaktadır. [2]

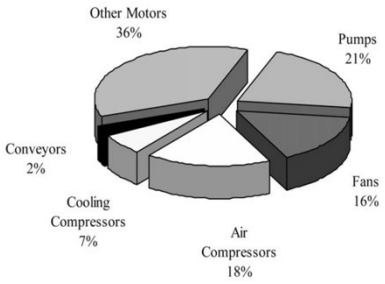
Endüstri 4.0 dijital ikiz (Digital Twin) kavramını literatüre katmıştır. Dijital ikiz, gerçek dünyada var olan bir cihazın birebir dijital bir kopyasının oluşturulmasıdır. Oluşturulan kopya üstünde birçok simülasyon yapılır. Bu gelişme zamandan ve maliyetten tasaruf anlamına gelmektedir. Gerçek hayatta varolan cihaza en verimli bulunan çözüm uygulanır. Bu sayede verimlilik, maliyet ve zamandan kazanılır. [3]

Burada Endüstri 4.0'ın getirdikleri avantajlarına değinilmesinin sebebi, aptal aktüatörlerin [1], sensör yardımı ile hareketlerinin gözlemlenmesi, doğru parametrelerin yazılımsal hesaplamalar ile zamandan kazanılarak bulunmasıdır. Yazılım tabanlı hesaplamalar hızlıca yapılabileceği için, en çok enerji tüketen aktüatörlerin yani elektrik motorlarının çok daha verimli çalışılması amaçlanmıştır.

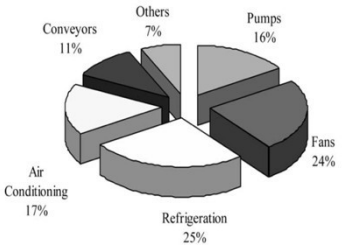
Elektrik motorlarının kullanım alanları çok geniştir. İklimlendirme sistemlerinde, pompalarda, fanlarda, konveylerde kısacası hayatımızın her yerinde elektrikli motorlar yer alır. avrupa birliği araştırıldığında elektrik motorlarının tüketimi ikiye aylrılır, sanayi ve hizmet sektöründe sırasıyla elektrik tüketim oranı yıllık 575 ve 186 TWh olarak ölçülmüştür. Figür 1 incelendiğinde sanayi sektöründe elektrik motorların kullanım oranları

gösterilmiştir. (Bu grafikte materyal işlemede kullanılan ağır yük motorları dahil edilmemiştir.) Figür 2'de ise hizmet sektöründe kullanılan elektrik motorlarının dağılımları verilmiştir. [4]

1



Figür 1: Sanayi sektöründe elektrik motor kullanım oranları



Figür 2: Hizmet Sektöründe Elektrik Motor Kullanım Oranları

Elektrik motorları günümüzde enerjimizin, sanayide %69, hizmet sektöründe %38'ini tüketmektedir. [4] Bu tüketim oranları dikkate alındığında yapılan çalışmalarda elektrik motorlarının mekaniksel olarak verimli hale getirilecek çalışmalar yapılmıştır.
farklı motor güçlerinin kayıp özetleri tablo 1'de gösterilmektedir. [5]

Tablo 1 Farklı Motor Güçlerinin Kayıplarının Özeti

Types of loss	Motor horsepower 25	Motor horsepower 50	Motor horsepower 100
Stator	42	38	28
Rotor	21	22	18
Core losses	15	20	13
Windage and friction	7	8	14
Stray load	15	12	27

Elektrik motorlarının mekaniksel olarak kayıpları bulunurken, verimli kullanılmalarının bir diğer yoluda sürücü devresinin verimli olmasıdır. Verimli sürücü tasarımı ise sürülecek motorun yapısının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Yapılan bir çalışmada, Amerikada çiftçilerin kullandığı elektrikli su pompalarında değişken yüklü yapılarda, değişken frekanslar uygulanarak daha verimli sürülmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın özetinde, hali hazırda kullanılan sürücü kartların yerine, yükü anlık olarak takip eden ve pompayı bu yüke göre ayarlayan bir sistem kullanılmıştır. Bu değişiklik özetinde, elektrik verimi olarak yalnızca %8'lik kazançtan söz edilirken, çalışmada basınç kalitesine ve verimine değinilmemiştir. [6]

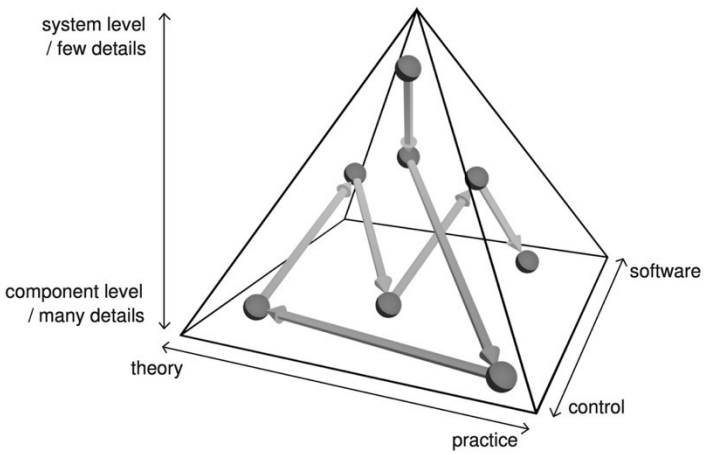
Elektrik motorlarının sürmek bir süre sonra kaos oluşabilmektedir. Kaos matematik domenine ait bir kavramdır ve lineer olmayan dinamik sistemler için tanımlanmıştır. İlk kez, Edward Lorenz tarafından atmosferin matematiksel modeli üstünde çalışırken tanımladığı kavramdır. [7]

Kaos, tahmin edilemeyen (lineer olmayan) sistemleri tahmin etmek için kullanılan, birden fazla metodun kullanıldığı alandır. 3D lorenz sistemi, 4D hiperbolik sistemi ve 3D genelleştirilmiş hiperkaotik Henon haritası bu yöntemler arasında yer almaktadır. [8]

Elektrik motorlarında ise kaos, senkron kayıplarının oluşması ile elektrik motor sürücü sistemlerinin kaos'a girişini oluşturur.
Kaos'a giren motor sürücü devrelerinde istenmeyen akım, hız, tork dalgalanmaları oluşmaya başlar. [9]

Kaosun getirdiği bilinmezliklerinin yanında elektrik motoru sürmek birçok disiplini bir araya getirir. Makine, Elektrik, Yazılım ve Kontrol mühendisliklerinin ortak birleşimi ile ortaya çıkar. Sistem seviyesinden komponent seviyesine kadar, piramit içinde konumlandırılmış disiplinler figür 1'de gösterilmiştir. [10] Figürdende görülebileceği gibi, sistem seviyesinde projenin detayları daha az iken, komponent seviyesi daha detaylıdır.

1. Sistemin, diğer seviyelere görece az detaylı seviyesi ile işleme başlanır,
2. Tasarım ilerledikçe komponentler belirlenir
3. Pratik ve kontrol bu seviyede en yüksek konumdadır.
4. Teori üzerinden geçilir
5. Sistem tasarımı optimize edilir
6. Tekrar pratik ve kontrol yapılır
7. Sistem tasarımı son birkez gözden geçirilir
8. Yazılım olabilecek en verimli şekilde yazılır



Figür 3: 3 Boyutlu Piramitte Disiplinlerin Sıralanması

Elektrik motorlarının birçok çeşiti bulunmaktadır. Bu çeşitler şöyle sıralanabilir.

- Çok fazlı senkron motorlar
- İndüksiyonlı çok fazlı senkron motorlar
- DC Motorlar
- AC Motorlar

- adım motorları
- 400 Hz motorlar
- senkron relüktans motorlar
- sabit rotor endüktanslı motorlar
- süper iletkenli senkron motorlar
- evrensel motorlar
- relüktanslı ve kalıcı manyetikli motorlar

Birçok motor çeşiti bulunmaktadır. Bu kadar fazla elektrik motor çeşidi bulunmasının sebebi uygulama alanlarının çok geniş olmasıdır. [11]

DC gerilim tipinde, adım motoru seçilmiştir. DC tipinde seçilmesinin sebebi, DC'de motorlar her alanda kullanılabilir, uygun fiyatlı olmasıyla avantajlıdır. Adım motorunun seçilmesinin amacı ise; Adım motorları, geri besleme olmaksızın çalışabilen motorlardır. Çok hassas çalışabilirler. Adım motorlarını çalıştıkları bir yol / döngü var ise, bu döngüyü adım kaçırmadan tekrarlama kabiliyetine sahiptir. [12]

Adım motorları ile ilgili avantajlar ve dezavantajlar tablo 2'de verilmiştir. [12]

Tablo 2 : Adım motorlarının avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Dönüş açısı motora gelen sinyal darbelerine göre belirlenir.	Eğer düzgün kontrol edilemezlerse rezonanslar ortaya çıkabilir
Adım Motoru elektriklenmiş ise maksimum torkunda sabit kalmaya devam edebilir.	Çok yüksek hızlarda adım motorlarını sürmek kolay değildir.
Kesin pozisyonlama ve tekrar edebilirlik iyi bir adım motorunda %3 ile %5 arasında değişmektedir. Bu hatalar yalnızca bir adımda geçerli ve motorun genelini etkilemez	
Başlama, durma ve geriye dönme işlemlerine iyi tepki verir.	
Fırçalara sahip olmadığı için, ömrü rulmanların / yatağın ömrüyle birdir.	
Elektronik sinyal darbeleri ile çalıştığı için, açık döngüde çalışır. Pozisyonlama için ekstra sensör kullanılmadığı için uygun maliyetlidir	
Adım motorunun miline direkt yük bağlı iken yavaş hızlarda senkron çalışması mümkündür	
Dönüş hızı, elektronik sinyallerin frekansına bağlıdır.	

Rezonans, hareketsiz bir cismin dışardan, kendi frekansına maaruz kalmasıya hareket etmeye başlamasıyla tanımlanır. Adım motorlarında rezonansların incelenmesi önemlidir. Özellikle rezonans frekansında çalıştırılan adım motorlarının hesaplanan tutma torklarından daha düşük tutma torkuna geri alınamayacak şekilde düşmeleridir. [13] Adım motorunun bu rezonans durumları literatürde "orta rezonans frekansı" veya "yüksek rezonans frekansı" olarak geçmektedir.

Yapılan bir araştırmada 20 ve 40 RPM'de adım motorunun rezonansa uğradığı görülmektedir. Sonrasında 60 ve 120 RPM'de de rezonans gözlemlenmesine rağmen, motorun çalışmasına engel bir durumla karşılaşılmamıştır. [14]

MATERYAL VE METOT

Projede teorik olarak adım motoru bilgileri öğrenildikten sonra yapılan ilk iş devre tasarlamanın temeli olan yük belirleme aşamasına geçilmiştir. Tasarlanan devrede yük / sürülmesi gereken adım motorudur.

Step motor, elektrik enerjisini dairesel (mekanik) harekete çeviren, ancak bu hareketi belirli açısal adımlar (step'ler) şeklinde gerçekleştiren senkron bir motor türüdür. Her adımda rotor, stator sargılarında oluşturulan manyetik alanın etkisiyle belirli bir açıda döner. Bu sayede konum kontrolü, ek sensör kullanılmadan açısal hassasiyetle sağlanabilir. Tablo 3'te adım motoruna ait özellik tablosu verilmiştir. [15]

Tablo 3 : Adım motorlarına ait özellikler

Özellik	Açıklama
Adımlı dönüş (step motion)	Rotor belirli açılarda hareket eder (örneğin 1.8° veya 0.9°/adım).
Açık çevrim kontrol (open-loop)	Geri besleme sensörüne ihtiyaç olmadan pozisyon kontrolü yapılabilir.
Yüksek konum hassasiyeti	Her step kesin ve tekrarlanabilir bir açıya karşılık gelir.
Anında durma ve yön değiştirme	Motor, kontrol sinyali değiştiğinde anında yön değiştirir veya durur.
Tutma momenti (holding torque)	Enerjili halde sabit pozisyonda kalabilir; bu, konum sabitleme için idealdir.
Düşük hızlarda yüksek tork	Özellikle düşük hızlarda servo motorlara kıyasla daha fazla tork sağlar.

Adım motorlar, full-step, half-step, wave-step ve microstepping şeklinde sürülür. Full-step sürme tipi seçtik .Full step'in bir dezavantajı ise titremeye yol açmaktadır. Çünkü Full-step sürmede, motor sargılarından biri (veya ikisi) tam akım alır. Rotor, manyetik alanın iki kutbu arasındaki denge noktasında durur. Her adımda bu denge noktası ani olarak değiştiği için rotor bir anda yeni konuma çekilir. Bu ani manyetik geçiş, özellikle düşük hızlarda, moment dalgalanmasına ve mekanik titreşime neden olur. [16]
Kullanılacak uygulamaya göre sürüş modunun seçilmesi gerekmektedir. Tablo 4'te neden Full-step sürme tipi sçtik açıklayacağız: [17]

Tablo 4 : Full step, half step ve microstep sürüşlerinin farkları

Özellik / Mod	Full-Step	Half-Step	Microstep

Avantaj	En yüksek tork	Daha düzgün hareket	En pürüzsüz hareket ve hassas konumlama
Avantaj	Basit sürücü devresi	Tork dalgalanması azalır	Gürültü ve titreşim minimumdur
Avantaj	Yüksek hızda kararlı çalışır	Hassasiyet artar	Hassasiyet en yüksek seviyededir
Dezavantaj	Titreşim (vibrasyon) fazladır	Tork, adımlar arasında değişir	Tork azalabilir
Dezavantaj	Düşük çözünürlük	Orta çözünürlük	Karmaşık ve pahalı sürücü gerekir
Dezavantaj	Gürültü yüksek	Orta seviye gürültü	Düşük hızda kontrol zor olabilir

Adım Motor Çeşitleri

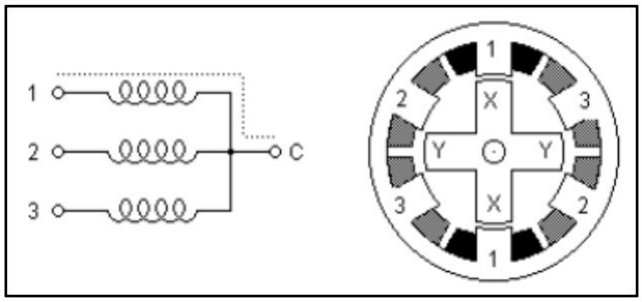
Adım motorları sarım yöntemine göre üçe ve sarım şekillerine göre ikiye ayrılırlar. Günümüzde kullanım alanlarına göre adım motor tipleri de değişmektedir.

Sarım Yöntemine Göre Adım Motorları

- Değişken Relüktanslı (Variable Reluctance, VR)
- Kalıcı Mıknatıslı (Permanent Magnet, PM) - Hibrit

Değişken Relüktanslı Adım Motorları

Ortak terminale bağlı 3 veya 5 sargıdan oluşur. Figür 4'te değişken relüktans tipinde adım motor görseli verilmiştir. Bu yapının avantajı sargı sayısı arttırılarak kutup sayısı arttırılabilir. Kutup sayısı arttıkça adım başına full step çözünürlüğü yapısal olarak artar. [18]



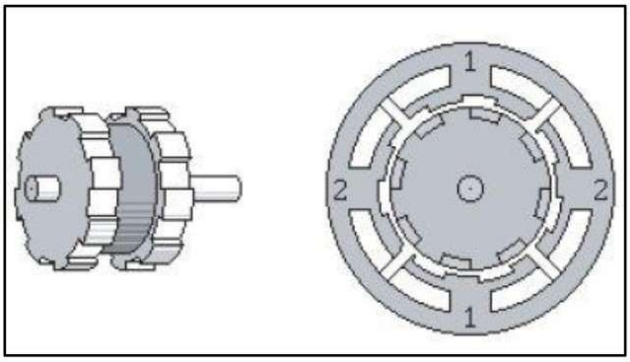
Figür 4: Değişken Relüktans Yapısına Sahip Adım Motor

Kalıcı Mıknatıslı Adım Motorları

Kalıcı mıknatıslı adım motorlar küçük adım uzunluğu ve yüksek tork/hacim oranına sahip oldukları için kullanım alanları yaygınldır. [18]

Hibrit Adım Motorları

Hibrit tipindeki adım motorları hem değişken relüktanslı hemde kalıcı mıknatıslı yapıyı içinde barındırır. Figür 5'te hibrit tipinde adım motorunun görseline yer verilmiştir. Değişken relüktans ve kalıcı mıknatıs tipindeki adım motorları ile karşılaştırıldıklarında, hibrit adım motorları dinamik tork değerlerine sahiptirler. [18]



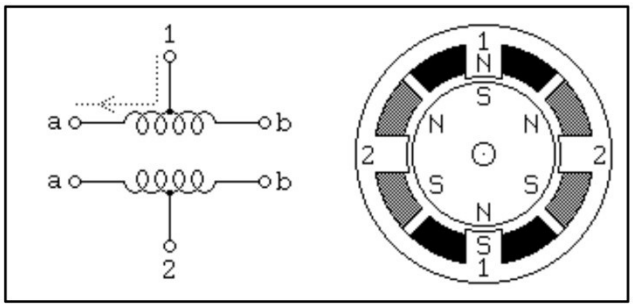
Figür 5 : Hibrit Tipindeki Adım Motorunun Yapısı

Günümüzde hibrit motorlarının düşük maliyeti ve endüstriyle olan uyumu düşünüldüğünde, hibrit adım motoru seçilmesi kararlaştırılmıştır. [19]

Adım motorları sargı uyartımlarına göre ikiye ayrılır
- Unipolar
- Bipolar

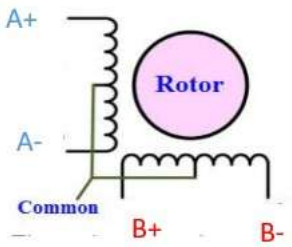
Unipolar Adım Motorları

Bu tipteki adım motorları sabit 2 sargıya ve sargılarının merkezlerine bağlı girişlere sahiptirler. Figür 6''da Unipolar Adım Motorunun sarım şekli verilmiştir. Figür 6'ya göre 1 ve 2 güç kaynağının pozitif tarafına bağlanır, geriye kalan sargı uçları ise güç kaynağının negatif tarafına bağlanır. [18]



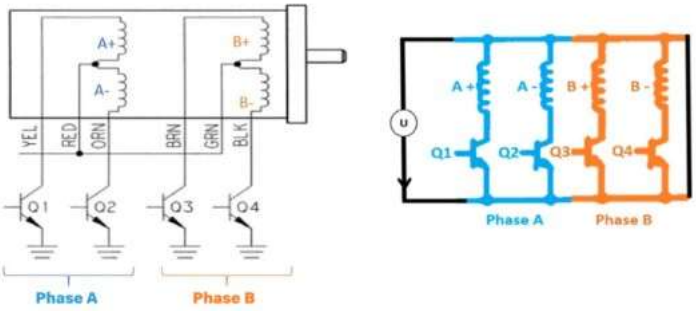
Figür 6 : Unipolar Tipinde Adım Motorunun Sarım Şekli

Unipolar konfigürasyonda, her bir ana fazında, manyetik alanın yönünü değiştirmek için anahtarlanan, ortadan bağlantılı bir sargı (iki bobin) bulunur. Bu sargı düzenlemesi, ikisi ortak tel olarak kabul edilen altı tele neden olur ve her motor fazı iki bobin sargısından oluşturduğunu kabul edebiliriz. Bu iki ortak tel, motorun yalnızca beş tele (A+, A-, B+, B-, ortak=common) sahip olması için genellikle dahili olarak birbirine bağlanır, (Figür 7). [20] [21]



Figür 7

A ve B fazlarından oluşan iki fazlı bir motorla, motor dört bobin sargısına sahiptir (Figür 8).

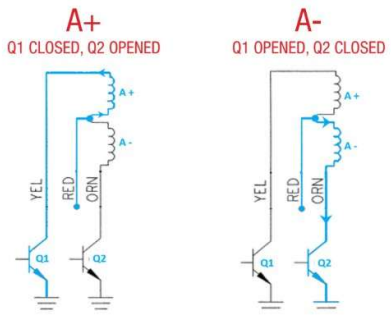


Figür 8

Unipolar step motorun :

- Faz A, A+ ve A-'dan oluşur.
- Faz B, B+ ve B-'den oluşur.

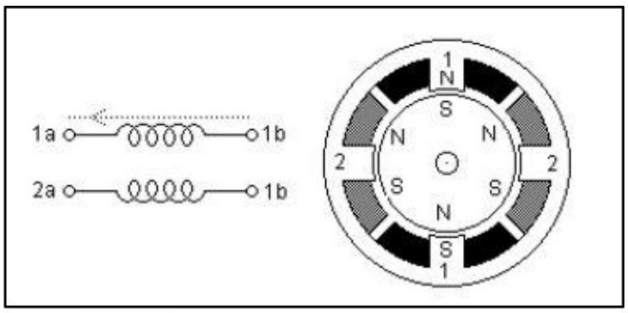
Her bir bobin için akım yalnızca tek bir yönde akabilir. Bu yüzden buna unipolar diyoruz. Voltaj tahriki durumunda, kontrol sistemi çok kolaydır. Eğer transistor kullanırsak, bobin başına bir transistör (anahtar) bulunur. Transistör kapatıldığında, bobin enerjilenir. Komütasyon yapmak için transistörler dönüşümlü olarak kapatılır ve açılır. Q1 ve Q2 transistörleri aynı anda kapatılamaz. A fazını enerjilendirmek için, çalışmak istediğimiz akım yönüne bağlı olarak Q1 veya Q2 transistörünü kapatırız (Figür 9). Aynı şekilde B fazı için geçerlidir. [20]



Figür 9

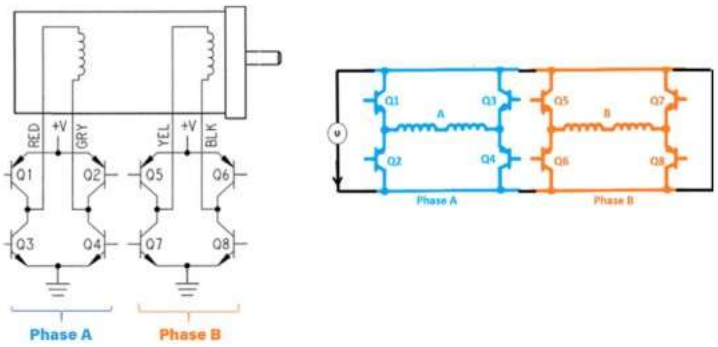
Bipolar Adım Motorları

Bipolar tipindeki adım motorları, unipolar adım motorlarına karşın sargıların merkezlerine bağlı girişin bulunmamasıdır. Figür 10'da bipolar adım motorunun sarım şekline yer verilmiştir.



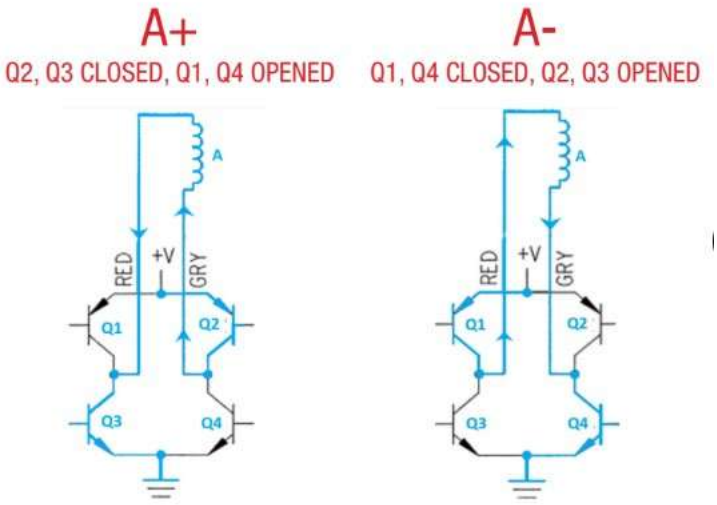
Figür 10 : Bipolar Tipinde Adım Motorunun Sarım Şekli

Unipolar motorlarda kullanılan mekanizmayla tamamen aynı şekilde inşa edilmiştir, ancak iki sargı, orta uçlar olmadan daha basit bir şekilde bağlanır. Bipolar motorlar faz başına sadece tek bir bobin sargısına ihtiyaç duyar. Akım her bir bobinde iki yönde de akabildiği için buna bipolar diyoruz. Bu nedenle, motorun kendisi daha basittir, ancak her bir motor kutup çiftinin polaritesini tersine çevirerek kullanılması gereken sürücü devresi sahip olduğu için daha karmaşık bir sürme şekliye yol açar. Kontrol için eğer transiator kullanırsak, iki H-köprülü sekiz transistör gereklidir. (Figür 11) [22] [20]



Figür 11

Komütasyonu gerçekleştirmek için, transistörler aşağıda gösterildiği gibi dönüşümlü olarak kapatılır ve açılır (Figür 12). Bipolar sürücünün avantajı, faz başına tüm bakırın kullanılmasıdır. Bu tür bipolar sürücüler voltaj sürmesinde veya akım kaynağında kullanılır. Akım kaynağı durumunda, genellikle her fazdaki akım darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile kontrol edilir.



Figür 12

Unipolar ile Bipolar adım motorlarının aralarındaki farklar

Adım motorlarının sargılarının farkları tablo-5'te verilmiştir.

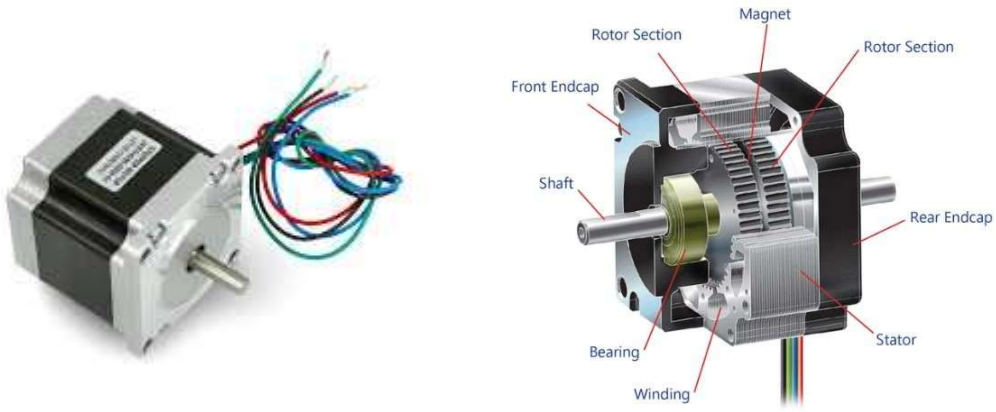
Tablo 5

Karşılaşma kriterleri	Unipolar adım motor	Bipolar adım motor
Voltaj sürücüsü	Voltaj Kontrolü kolay ,basit sürücü devre konfigurasiyon ve maliyet uygundur	Voltaj Kontrolü ve sürücü devre konfigurasyon daha karmaşık ve maliyet daha yüksek
Sargı konfigurasiyonu	Bir orta uç (center tap) eklendiğinde, sargının her bir yarısında tek yönlü (unidirectional) akım akışı sağlanır.	Her bobinin uçları iki farklı şekilde dışarıya alınabilir: • Her bir uç ayrı ayrı çıkarılır. • Tüm sargı üzerinden çift yönlü akım akışı sağlanır.
Tutma torku : Tutma torku, motorun durma anında tutabileceği maksimum torktur. Tutma torku, tork sabiti ve fazdaki akım ile orantılıdır.	Unipolar motor az tork üretir .	Bipolar motor yüksek tork üretir

Güç kayıp	Unipolar motor sargılarının, bipolar motor sargılarına göre daha ince olmasından dolayı daha fazla tel kullanılması gerekir. Bu durum, sargının direncini artırır. Artan direnç, sargı üzerinden daha fazla güç kaybına yol açarak sıcaklığın önemli ölçüde yükselmesine neden olabilir.	Bipolar motor sargıları uygun boyutta olduğu için güç kaybı çok üretmiyor

Adım motoru elektrik enerjisini dönme hareketine çeviren elektromekanik bir cihazdır. Elektrik enerjisi alındığında rotor ve buna bağlı şaft, sabit açısal birimlerde (step-adım) dönmeye başlar. Adım hareketleri, motorunda faz olarak adlandırılan organize edilen çoklu bobinler sayesinde gerçekleşmektedir. Her faza enerji vererek, motor bir seferde bir adım dönecektir. Adım motorlar, çok yüksek hızlı anahtarlama özelliğine sahip bir sürücüye bağlıdırlar (adım motor sürücüsü). Projede, bahsettiği motor sürücüye ilgilenmektedir.

Adım motorunun görselleri Figür 13'te yer verilmiştir.



Figür 13 : Adım motorlarına ait görseller

Araştırma aşamasından sonra proje bütçesine uygun hibrit adım motor arayışına girilmiştir. Arayışlar sonucunda NEMA23 57HS56-2804 kodlu adım motorunu seçilmiştir. Piyasada fiyat / performans olması için tercih edilmiştir.

NEMA Nedir?

Nema; National Electrical Manufacturer's Association (Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği) kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. NEMA motor standartlarını belirler. Her motorun kendi isim etiketinde, üreticinin tipi, çalışma gerilimi, maksimum dayanabileceği akım vb. bilgiler yer alması zorunludur.

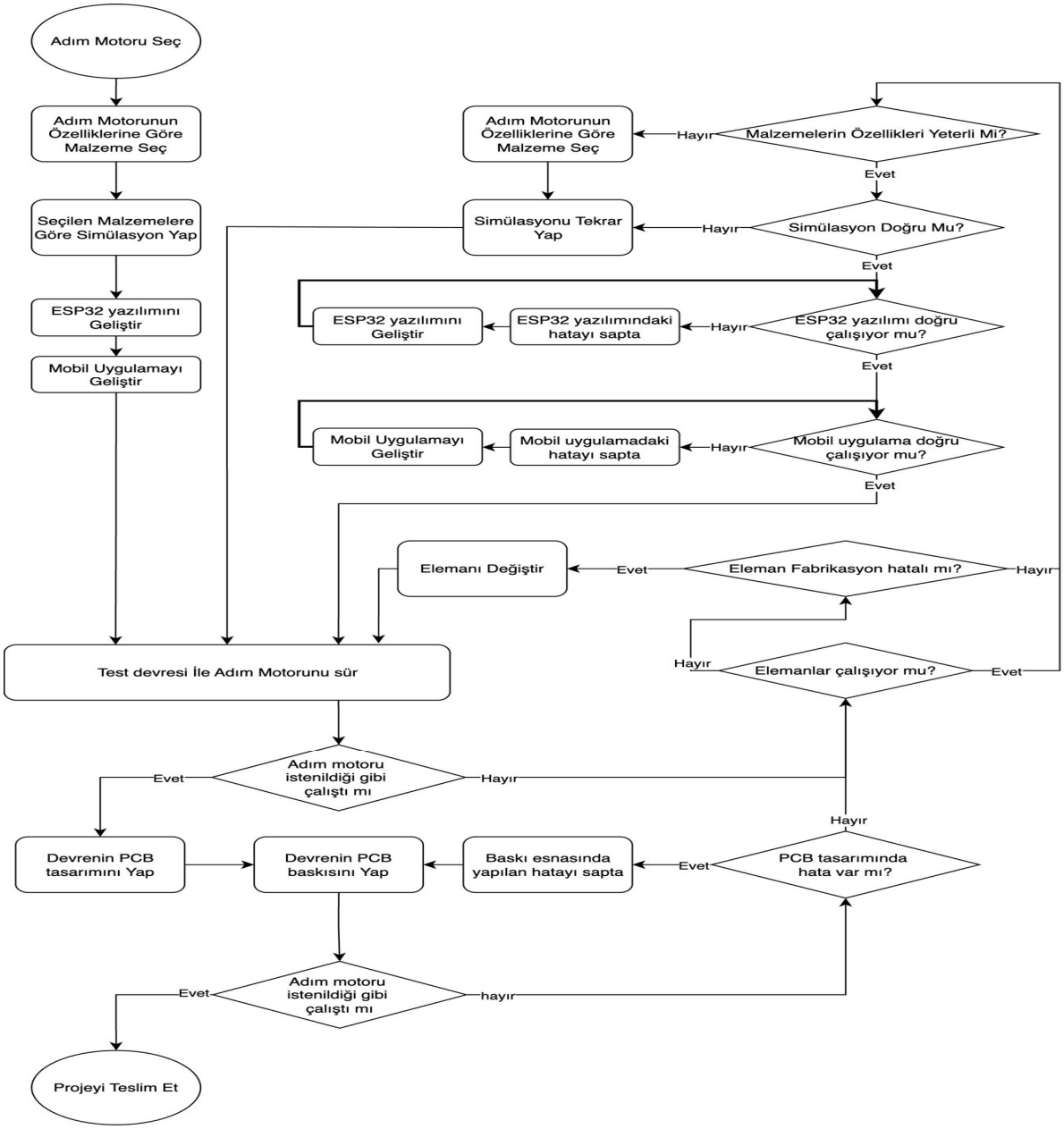
NEMA23 57HS56-2804 Kodun Açılımı Nedir?

Bu kodun açılımını bulmak için adım motorunun datasheet'I incelenmesi yeterlidir. İnceleme sonunda çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- NEMA: motorun üretim standartı

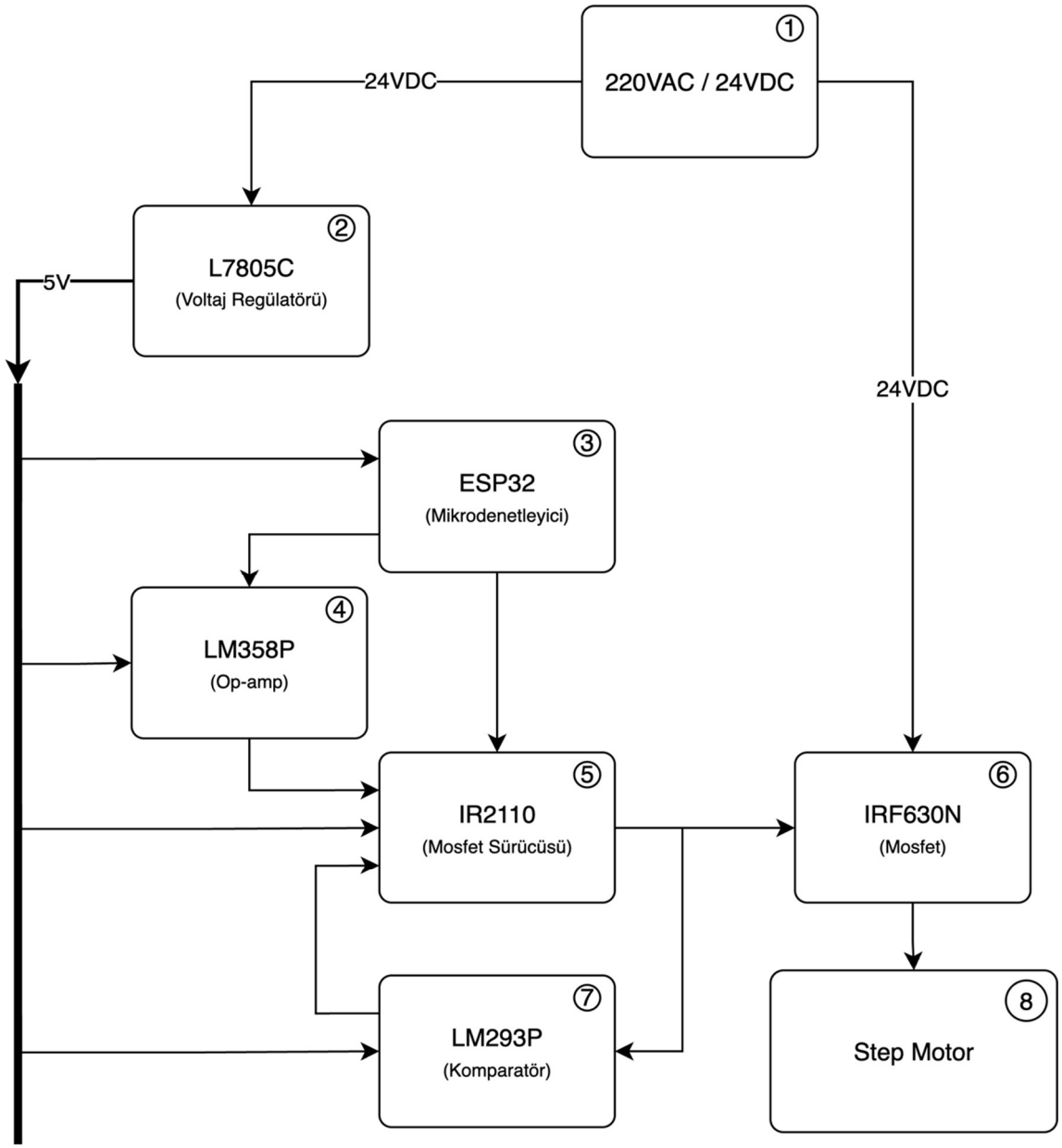
- 23: Ön yüzde bulunan alanın kenar uzunluğunun inç tipinde temsil eder (2.3 x 2.3 inç)
- 57: Adım motorun maksimum en ve boy uzunluğunun mm halini temsil eder
- HS: Hybrid Stepper'in kısaltmasını temsil eder
- 56: Motorun uzunluğunu temsil eder
- 28: Maksimum dayanabileceği akım olan 2.8 A'i temsil eder
- 04: 4 adet çıkış (kablo) olduğunu temsil eder

Projemiz nasıl ilerleyeceğine dair bu akış diyagramı sunuuyoruz, figür-14'te projenin temel akış diyagramı verilmiştir.



Figür 14 : Projenin Akış Diyagramı

Projeye ait blok diyagram figür-15'te verilmiştir.



Figür 15 : Projeye Ait Blok Diyagramı

Ham malzemelerin işlevleri

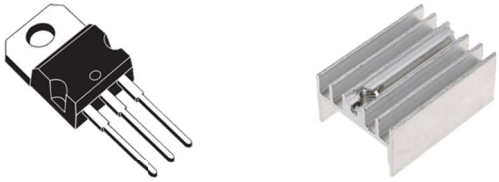
1- DC gerilim Kaynağı

Amacımız step motor sürcü kartı olduğu için güç kaynağını hazır kullanmayı düşünmekteyiz. Güç kaynağını 220VAC / 24VDC, 8.5 A çıkış verebilen, sabit gerilime sahip metal kasa adaptör kullanılması planlanmaktadır. Figür 16'da kullanılması planlanan trafonun görseli yer almaktadır

Figür 16

2- Voltaj Regülatörü

Devredeki entegreleri çalıştırmak için 5VDC gerilim kaynağına ihtiyacımız vardır. Bu amaç ile L7805C doğrusal gerilim dönüştürücü kullanılması düşünülmektedir. Doğrusal dönüştürünün sağladığı çıkışlar 5VDC ve 1.5 A'dir. Mosfet sürücülerimiz, op-amp, komparatör ve mikrodenetleyici için bu değer oldukça yeterlidir. Komponentin To220 kılıfındadır. L7805C referansı figür 17-a'da verilmiştir. Sistemin kararlılığını korumak için to-220 kılıfı ile uyumlu alüminyum soğutucu kullanılacaktır. Kullanılacak soğutucu figür 17-b'de verilmiştir.



(b) (b)

Figür 17 : (a) TO-220 kılıfında L7805C, (b) Alüminyum soğutucu

3- Mikrodenetleyici

Projede ESP-32 Wroom 32U modeli kullanılması düşünülmektedir. Figür 18-a'da ESP32 wroom 32U'nun görseline yer verilmiştir. Wroom 32 modelleri ikiye ayrılır. D ve U modelleri. Wroom 32D modellerinin içinde kendi antenleri yer alır. Wroom 32U'da ise dahili anten bulunmamaktadır. D modellerindeki anten prototipleme aşamasında gayet yeterlidir fakat kapalı alana konulduklarında antenleri uzatılamadığı için problemler ortaya çıkmaya başlar. 32U modelinde anten harici olarak takıldığı için, esp32'nin kutu dışından sinyal iletişimi sağlanabilir, kararlı çalışması amaçlanmıştır. Projede gelecekte kutulama işlemleri olabilme ihtimaline karşı en baştan harici anten kullanılması düşünüşmüştür. ESP32'de IPEX standartında bir çıkış yer alır, antenler ise genellikle SMA tipinde üretilirler. Arada IPEX-SMA dönüşümü yapılmalıdır. Dönüştürücüye Figür 18-b'de yer verilmiştir. Kullanılacak anten ise 5 cm uzunluğunda 3 db kazanç sağlamaktadır. Figür 18-c'de SMA erkek tipinde antene yer verilmiştir.

(c) (c) (c)

Figür 18

ESP32'nin Çalışma prensibi bu proje için şöyledir.

- ESP32 bir sunucu görevi görür.
- wifi ağını kullanıcıların bağlanabileceği gibi aktif hale getirir.
- Mobil cihaz ESP32'nin wifi ağına katılır.

- Aralarında websocket ile kesintisiz ve sürekli bir bağlantı olması düşünülmektedir. Mobil cihaz ve ESP32 arasında çift yönlü iletişim kurarlar. ESP32 Okunan gerilim değerleirini mobil cihaza gönderirken, mobil cihazdan da Motora dönme yönü, devir hızını, motor dönüş yönünü ayarlayabileceği verileri gönderebilmesi hedeflenmektedir.

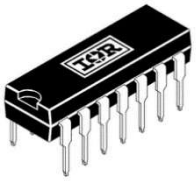
4- Op-Amp

Step motorun çektiği voltajı gözlemlemek için, mosfet sürücüsüne eklenen sense dirençlerinin üstüne düşen gerilimi yükseltmek için kullanılması planlanmaktadır. Bu iş için ise LM358 op-amp'ı kullanılması düşünülmektedir. Figür 19'da dip8 kılıfında op-amp görseline yer verilmiştir.

Figür 19 : dip-8 kılıfında LM358

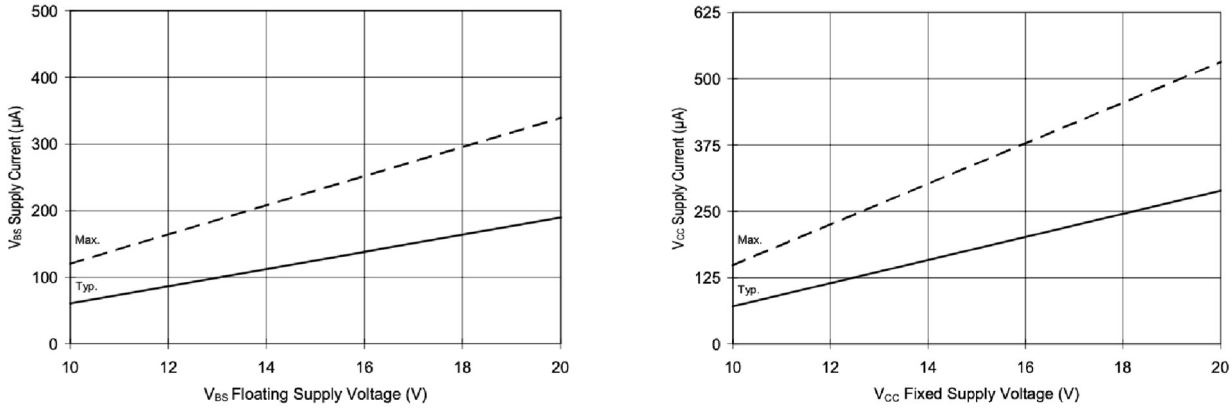
5- Mosfet Sürücüsü

Seçtiğimiz mosfetler esp32 tarafından sürülememektedir. Mosfetleri sürmek için bir sürücü entegresine ihtiyacımız vardır. Sürücü sorununu IR2110 entegresi sürüş problemini ortadan kaldırır. Figür 20'de dip14 entegresi referans olarak verilmiştir. Kısaca bu entegre H köprüsünün yarısını oluşturmaktadır. Devremizde 4 tane mosfet sürücü entegresi kullanmayı hedeflemekteyiz.



Figür 20 : Dip-14 kılıfında IR2110 entegresi

IR2110'un besleme geriliminden çekeceği akım datasheet'inden alınmış olup (Figür 21), hesaplamalarda buradaki değerler kullanılmıştır.

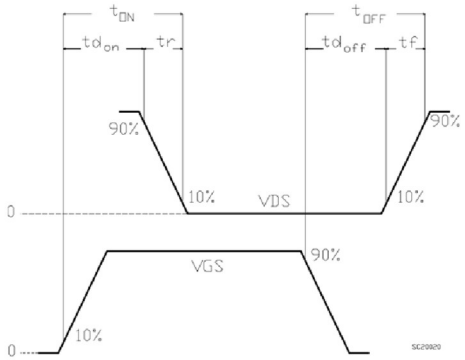


Figür 21

6- Mosfet

Kullanmayı düşündüğümüz mosfet IRF630N mosfetidir. 200V, 9A dayanımına sahip mosfet, akım piklerinden ve ısınmalara karşı daha dayanıklı olacağını düşündüğümüz için seçilmektedir. Mosfet TO-220 kılıfında olduğu için figür 17-a'daki referans kullanmayı hedeflediğimiz mosfet içinde geçerlidir. Mosfetlein ısınıp kararsızlaşma / bozulma ihtimallerine karşı figür 17-b'deki alüminyum soğutucular kullanılması hedeflenmektedir.

IR2110 ile direkt kullanılacakları için mosfetlerin anahtarlama hızları önemlidir. IR2110'un anahtarlama hızına bakıldığında 94 ~120nS sürelerde açıp kapama işlemi yapabilmekte. En yavaş değer olan 120nS seçilmiştir. Mosfetin anahtarlama hızına bakıldığında ise datasheet'inde maksimum 34 nS olduğu görülmektedir. Figür 22'de anahtarlama görseline yer verilmiştir. Maksimum değerlerde, t_{on} = 20nS , t_r = 14nS olarak belirtilmiştir. Bu durumda mosfetimiz IR2110 ile tamamen uyumlu çalışır. Zamanlamayı IR2110'a göre yapmayı planlamaktayız.



Figür 22

7- Komparatör

Devrede aşırı akım çekildiği zaman akımın sınırlandırılması gerekmetedir. LM293 komparatör kullanılması hedeflenmektedir. Komparatör dip-8 kılıfında olduğu için Figür 19'daki LM358 entegresi referans alınabilir. Opamp gibi olmalarının yanı sıra op-amp'tan en büyük farklılıkları, gerilim karşılaştırma işlemini çok daha hızlı

yapmalarıdır. Mosfet sürücülerinde motoru durduracak ShutDown pini ile tetiklendiğinde sürücü mosfetleri anında durdurur.

8- Step Motor

Seçtiğimiz step motor NEMA23 Standartında sarglarının bipolar tipinde, 1/1 çözünürlükte 200 adıma sahip, her sargısının maksimum 2.8A akım desteklediği step motordur. Figür-23'te step motora ait görsele yer verilmiştir. Step motorun tam kodu NEMA23 57HS56-2804'dir. Motorun seçilme amacı Fiyat / Performans dengesini yakalamak ve gerçek hayatta kullanım senaryolarında tasarladığımız sürücü devresinin rahatlıkla kullanılabilmesini istememizdendir.

Figür 23

Step Motor Sürme:

Kullanacağımız step motor bipolar tipdedir. 2 adet sargısı bulunur. Bu motoru sürmek için her sargısı için H köprülü devre tasarlamamız gerekmektedir. Kullandığımız motor sargılarından maksimum 2.8A akım çekebilmektedir. Bu özellikleri sağlayan elemanlara baktığımızda seçtiğimiz mosfet IRF630N'dir. Özelliklerine baktığımızda maksimum 200V'a kadar çalışmayı destekler ve üstünden maksimum 9A akım geçirebilmektedir. Bizim devremizde ise rahatlıkla kullanılabilmektedir. Genel devreyi ESP32 ile kontrol edeceğimiz için, mosfetler de esp32 ile sürülemeyeceği için araya bir de mosfet sürücü entegresi kullanmamız gerekir. IR2110 entegresi High ve Low side çalışmaktadır. H köprüsünün yarısını temsil etmektedir ve mosfetlerimi sürebilecek özelliktedir.

Step motorlar destekledikleri akımların üstüne çıkacak olurlarsa sargıları yanar. Bu bizim istemediğimiz bir durumdur. O yüzden ESP32'ye bağımlı kalmadan, nano saniyeler içerisinde tepki verecek bir aşırı akım koruyucu özelliği eklememiz gerekmektedir.

Aşırı Akım Koruma: Bu başlık için komparatör (karşılaştırıcı) LM293 uygun görülmüştür. Op-amplar genel amaçlara kullanılırken komparatörler voltaj karşılaştırma özelinde çok daha hızlı ve kararlı çalışmaktadırlar. Aşırı akım korumayı kart üstünde yeşil ve kırmızı 5mm LED ile yapmak, görsel olarak uygun görülmüştür. Ledlerin yakılabilmesi için BC337 transistörü seçilmiştir.

Akım Algılama: ESP32'nin devreden ne kadar akım aktığını anlayabilmesi için iki fazın akımınıda okuyabilmesi gerekir. H köprüsünün Low side'larına takılacak 0.1R 5W direnç ile bu direnç üstüne düşen akım okunacak. Fakat buraya düşecek akım çok küçük olacağı için op-amp ile yükseltilmesi gerekmektedir. Op-amp olarak LM358 seçilmiştir. Direnç üstüne düşen düşük gerilimi op-amp ile ESP32'nin daha hassas okuyabileceği seviyeye yükseltmektedir.

Lojik Gerilimi Yönetme: ESP32, op-amp ve komparatör gibi elemanlar hassas sinyaller ile çalışırlar ve motorun gürültülü yüksek akımlı yerlerinden olabildiğince izole olmalılardır. Bu elemanları izole etmek ve yeterli DC gerilimi için L7805C voltaj regülatörü uygun görülmüştür. Üzerine gelen 7-35VDC gerilimi 5V, 1.5A olacak şekilde regüle eder. Devremizde kullandığımız lojik komponenetler bu akımı geçmeyecek şekilde hesaplanmıştır.

Hesaplamalar

Motora giren akım Imax = 2.8 A, kart beslemesi için 12 V, Analog girişten gelen gerilime göre hangi şönt yada sense direnç değeri, LM358 opamp'a bağlı dirençlerin değerler seçimi ve Vref hesaplşaması

Şönt (sense) direnci seçimi

Büyük Rş → ölçüm voltajı büyük (ölçmesi kolay), ama daha fazla güç kaybı ve ısı.

Küçük Rş → az kayıp, ama düşük sinyal (amplifikasyon gerekir).

Rş örnek değerleriyle:

Rş1= 0.1 Ω (senin daha önce önerdiğin değer)

Maks gerilim: Vş = Imax* R = 2.8 * 0.1 = 0.28 V→ sinyal yeterli

Güç: P = I2 R = 2.82 * 0.1= 0.784 W

Yani yaklaşık 0.8 W kayıp olur; 1–2 W nominal direnç yeterli ama güvenli çalışma ve ısıl marj için en az 3 W, 5 W almak çok uygun olacak

Rş 2 = 0.05 Ω

Vş = 0.14 V

P=0.392W→ daha az kayıp ama sinyal düşük.

Rş 3 = 0.2 Ω

Vş = 0.56V

P=1.568W→ daha büyük sinyal, fakat daha fazla güç kaybı. Rş = 0.1 Ω , Şönt direnç için seçtik.

LM358 için kazanç hesabı (ADC / LM293 için kullanılacak sinyal) Analog girişten gelen voltaj 5 V.

5 V olursa→ hedef Vout_max ≈ 4.0 V

Rş = 0.1 Ω, Vşmax = 0.28 V ⇒ gereken Gerilim kazancı:

Av=Voutmax/Vşmax

5 V için;

Av = 4.0 / 0.28 ≈ 14.29 ≈ 14–15 V/V

Non-inverting konfigürasyon (Evirmeyen konfigürasiyon) Non-inv kazanç:

Av = 1 + Rf/Rin

5V için : Av ≈ 14

Av + 1 = Rf/Rin

→15 . Rin = Rf

Genellikle Rin 10k–100k olduğu için,

Rin= 10kΩ desek Rf = 150kΩ olur. Ama hem 14'a yakın bir değeri almamız lazım hemde piyasadaki kolayca bulabileceğimiz bir değer seçmemiz lazım. Bu nedenle, Rf'yi düşürdüm: Rf = 130 kΩ → 1 + 130/10 = 14

→Rin = 10 kΩ ve Rf = 130 kΩ

Komparatör (LM293) için Vref hesaplama

İki yol var: LM293'a ham Vş (0.28 V max) bağlamak veya LM358 çıkışını (yükseltilmiş Vout) karşılaştırmak. Genelde LM293 ile doğrudan yükseltilmiş çıkışı karşılaştırmak daha pratik ona göre:

İstenilen referans akımı Iref= 2.8 A

Vout = I ref. Rş. Av

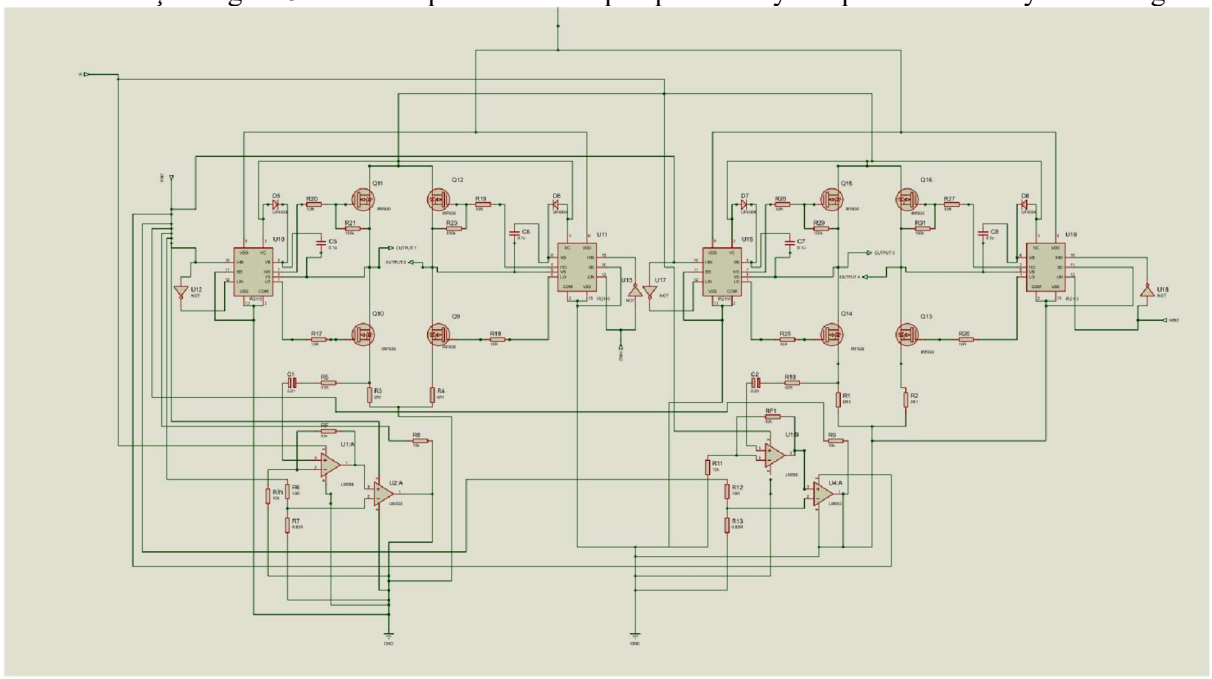
Rş=0.1Ω, Av=9, Iref=2.8A Vout =2.8*0.1*9 = 2.52 V.

Buna göre Vref (LM293 diğer ucu) = ~2.52 V (Gerilim bölücü ile alınacaktır). Dolayısıyla

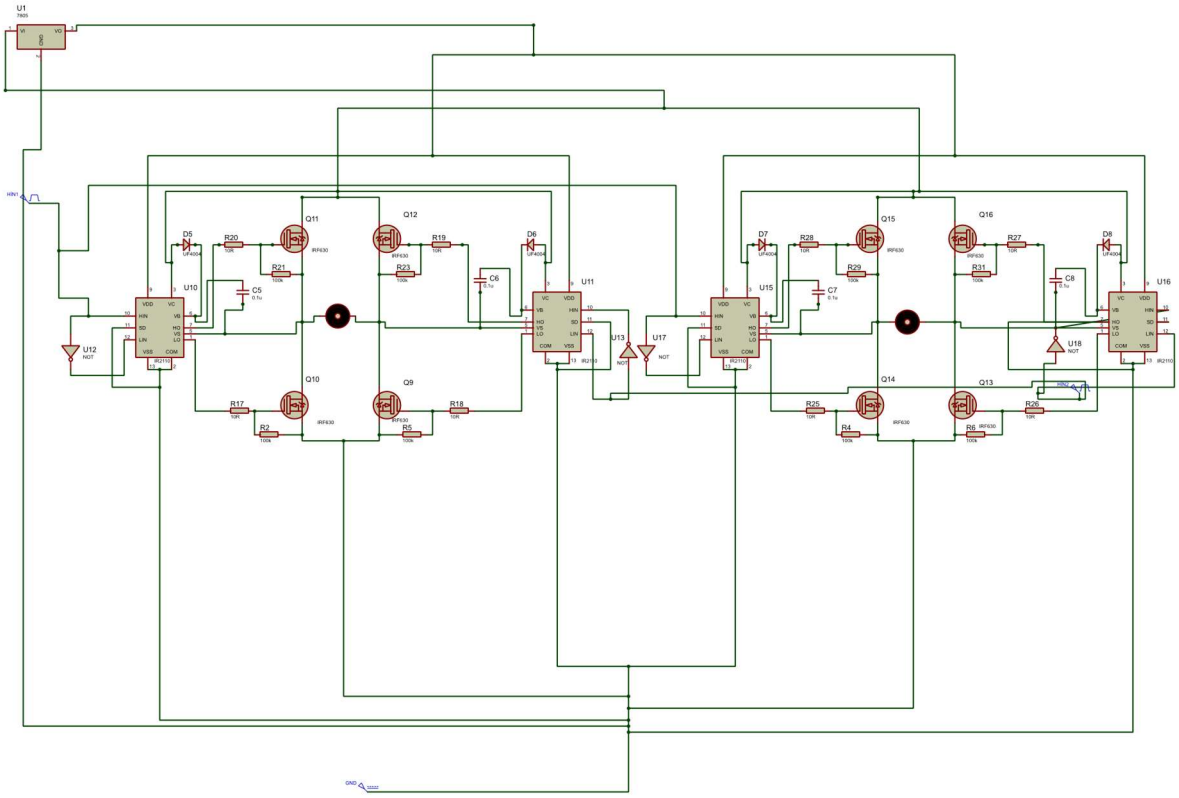
Gerilim bölücü için R6= R7=R12=R13= 2.4R

Simülasyon

Figür 15'te yer alan blok diyagramına göre proteusta simülasyon yapılmıştır. Yapılan simülasyona ait görüntüler Figür 24'te verilmiştir. Figür 25'te ise komparatörsüz ve opampsız devreye ait proteus simülasyonuna ait görsel eklenmiştir.



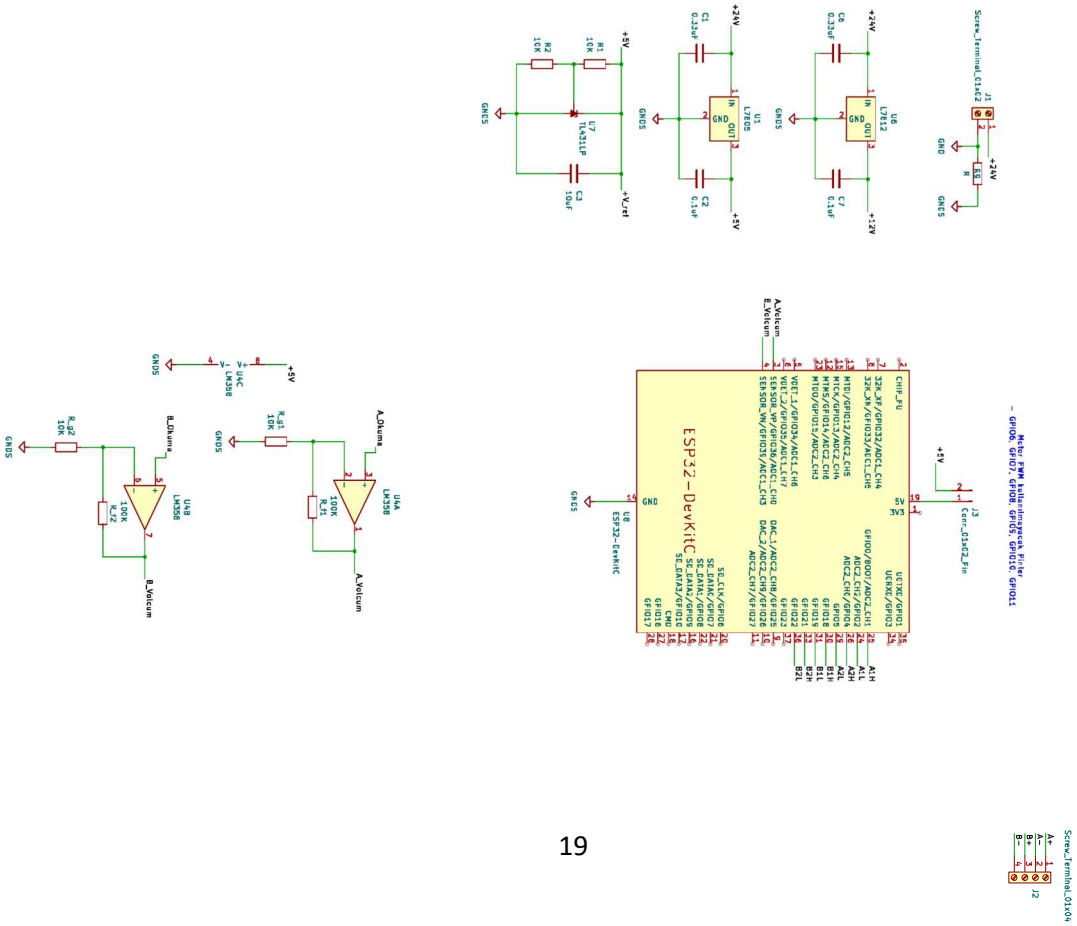
Figür 24 : Proteus sümülasyonunda kurulan devre



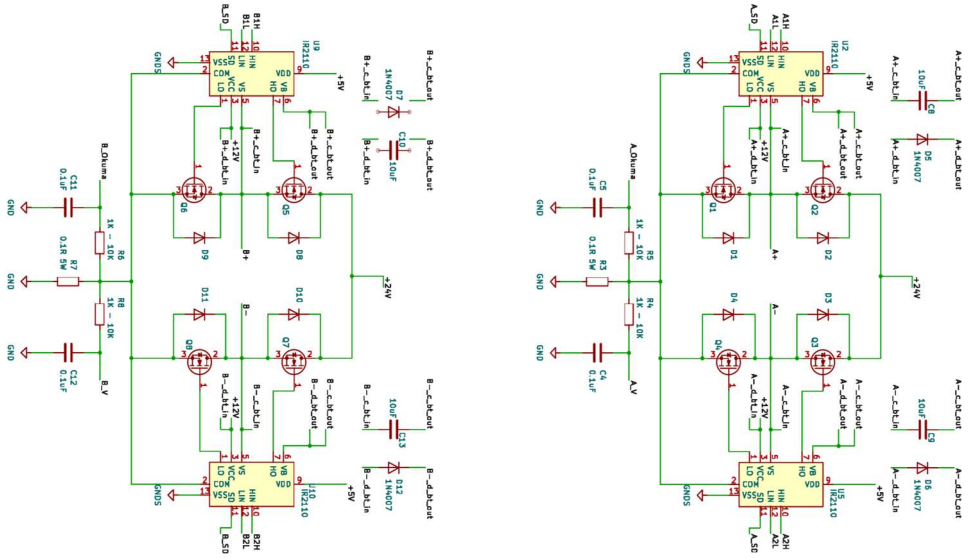
Figür 25: Proteus sümülasyonunda kurulan devre, komparatörsüz ve opampsız

PCB Tasarımı

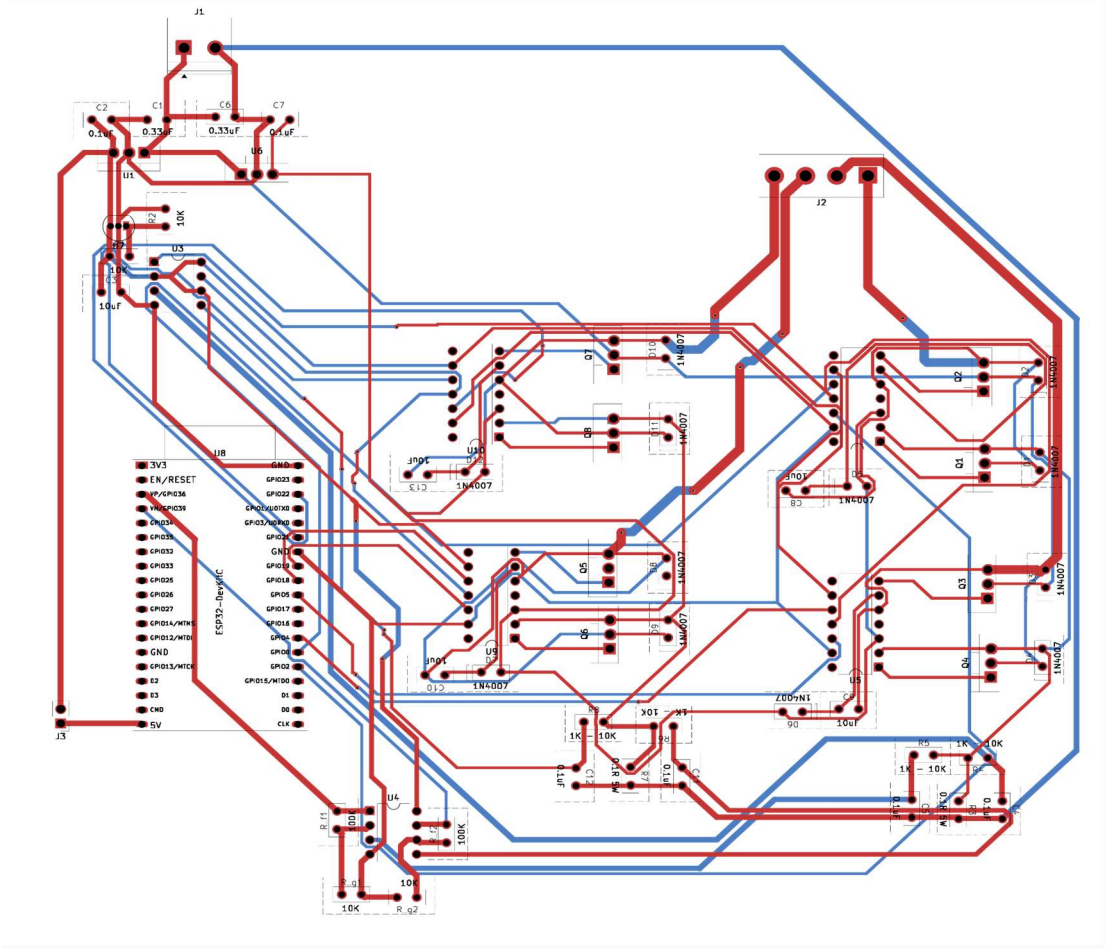
Şematik çizimi yapmamız gerekiyordu. Çizim programı olarak kiCad seçilmiştir. Şematik figür 26'da verilmiştir.



Figür 26 : Devrenin KiCad'de şematik hali



Bu şematiğe göre KiCad'de çizilen pcb tasarımı figür 27'de verilmiştir. Bu tasarım hayata geçirilecek nihai tasarımı temsil etmemektedir. Bu süre boyunca edineceğimiz bilgiler ışığında tasarımın revize edilmesi hedeflenmektedir.



Figür 27 : Pcb tasarımı

YAZILIM

Projenin elektronik güç elemaları bir noktaya kadar getirildi. Projenin hedefi, mobil uygulama ile adım motoru sürebilmek. Eğer kontrol yazılımı çalışmazsa, elektronik anlamda ne kadar güzel iş çıkardığımızın bir önemi yoktur.

Esp32 C dilinde kullanılan mikrodenetleyicidir. Aynı zamanda arduino framework'unu kullanarak C++'a benzer kodlar yazılabilmektedir. Barındırdığı tekonolojiler sayesinde, uygulamamızda kullanabileceğimiz iletişim protokolleri çoktur. [23]

İletişim Protokolleri

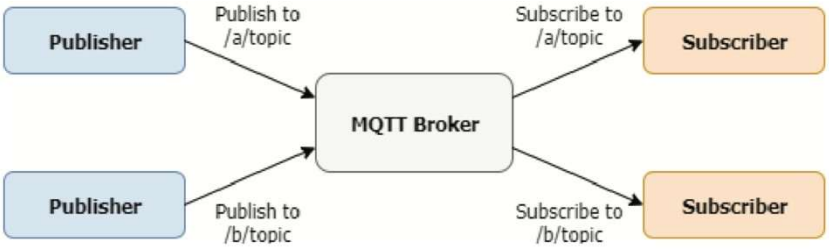
Proje mobil ile mikrodenetleyici arasındaki haberleşme araştırılırken, haberleşmenin birçok yolu olduğu görülmüştür. Endüstriyel alanda sıkça kullanılan protokoller şu şekildedir, MQTT, Websocket ve http.

MQTT

Message Queue Telemetry Transport (MQTT) düşük gecikmeler için geliştirilmiş yeni protokol sayılmaktadır. MQTT Yayıncı (Publisher) ve Abone (Subscriber) olma üzerinedir. TCP/IP üzerinden haberleşir. Düşük bant genişliği kullanması sebebiyle makineler arasında iletişimde kilit rol oynayabilmektedir. [24]

Yayıncı abonelerin alabileceği bir mesajı ortada bulunan broker'a gönderir. Sonrasında broker bu mesajı abonelere göstermek için işlem yapar. Örnek bir diyagram Figür 28'te eklenmiştir.

Bu haberleşme protokolünün güzel yanı yayıncının ve abonenin birbirini tanımasına gerek olmamasıdır. Aradaki bütün iletişimi broker izole bir şekilde yapmaktadır. MQTT uygulamaları genellikle uzaktaki bir sunucuya kurulan broker'lar ile yönetilmektedir. İnternet ne kadar iyi olsa da daima sunucu-cihaz arasında bir gecikme mevcuttur.



Figür 28 : MQTT Diyagram

HTTP

TCP protokolünü kullanan haberleşme yöntemidir. Bilgisayar sunucudan bir veri istediğinde sunucun her defasında tekrar bağlantısı kurması, el sıkışması gerekir. http'nin kötü yanı el sıkışmaların, bağlantıların yeniden kurulması gecikmeyi arttırmakta, ağ'a gereksiz bir yük bindirmektedir.

Web Socket

TCP http iletişimine çok benzer. Websocket protokolü kullanılacağında, cihaz, sunucuya websocket kullanmak istediğini http üzerinden istek atar. Eğer sunucu bu isteği kabul ederse, cihaz ve sunucu arasında kapanmayan bir iletişim başlar. Websocket'in avantajı http'deki her istekte atılan el sıkışmaları yoktur. Bir kere http üstünden el sıkışıldıktan sonra veri çift yönlü, asenkron olarak aktarılabilir. [25]
İletişim Protokolleri Özet esp32 websocket iletişimini 4 cihaza kadar sorunsuz bir şekilde kaldırmaktadır. Telefonun direkt esp32'ye Wi-Fi üzerinden bağlanması hedeflenmektedir. Websocket hem http gecikmelerine sahip değildir hemde MQTT gibi uzak bir sunucuya bir broker kurmak ile ilgilenmeyiz.

Websocket teknik anlamda getirdiği hızlar dışında, prototipleme aşamasınıda hızlandırır. http kütüphaneleri ile çok kolay entegre olabilen framework'ler sayesinde ek bir yazılım yükü ortaya çıkmamaktadır.

Mobil Geliştirme Ortamları

Mobil uygulama alanında, günümüzde popüler geliştirme ortamları mevcuttur. Flutter, React Native veya platforma özel Native geliştirmeler yapmayı seçmek mümkündür.

Flutter

Flutter günümüzde aktif geliştirici topluluğu olan, güçlü bir platformdur. Google tarafından desteklene flutter, Google'in oluşturulmasında katkı verdiği Dart dilini kullanmaktadır. Dart öğrenmesi kolay, ustalaşması zaman isteyen bir dildir. Flutter'ın hedefi tek bir kod tabanından çoklu platformlara minimum eforla çıkmaktır. Gücü yalnızca burada sınırlı kalmaz, kütüphaneleri zengin ve yeterlidir. Bunun yanı sıra flutter'da 'hot reload' özelliği bulunmaktadır. Bu sayede daha kod yazılırken uygulamayı derleyip, ön izlemek mümkündür.

React Native

React Native, Meta tarafından geliştirilen ve açık kaynak olarak desteklenen, mobil uygulama geliştirmede yaygın olarak kullanılan bir diğer güçlü platformdur. Temelinde, web geliştirmede oldukça popüler olan JavaScript dili ve React kütüphanesi bulunur. React Native'in temel felsefesi, flutter ile oldukça benzerdir. Tek bir kod tabanı kullanarak hem iOS hem de Android platformları için "native" (platforma özgü) uygulamalar oluşturmaktır. Flutter'ın kendi arayüz bileşenlerini çizme yaklaşımından farklı olarak React Native, platformun kendi standart arayüz bileşenlerine

(native UI components) bir köprü kurar. Bu, uygulamanın görünüm ve his olarak çalıştığı platforma (iOS veya Android) daha yakın olmasını sağlar. React Native de "Fast Refresh" (Hızlı Yenileme) adında, kod değişikliklerinin uygulamayı yeniden başlatmadan anında ekrana yansımasını sağlayan bir 'hot reload' özelliğine sahiptir. Bu da geliştirme sürecini önemli ölçüde hızlandırır.

Native Geliştirme

Platforma özgü yazılım yazmadır. Android için Kotlin, ios için ise Swift dillerinde yazılması gerekir. (Andoroid windows / macos ortamlarında derlenebilirken, ios uygulamaranı geliştirmek için ise güncel macos işletim sistemini destekleyen cihaza ihtiyaç vardır.) Platform bağımsız olmadığı için İşletim sistemine özgü yazılımlar, yalnızca orta ve büyük çaplı uygulamalar tarafından tercih edilen yöntemlerdir. Bu seviye tercih edildiğinde, flutter ve react native'in aksine kütüphaneler şirket çalışanları tarafından titizlikle hazırlandığı aşamadır.

Mobil Uygulama Özet

Prototip tarafında sağladığı kolaylıklar, daha önceden sahip olunan tecrübelerden dolayı proje için flutter uygun görülmüştür.

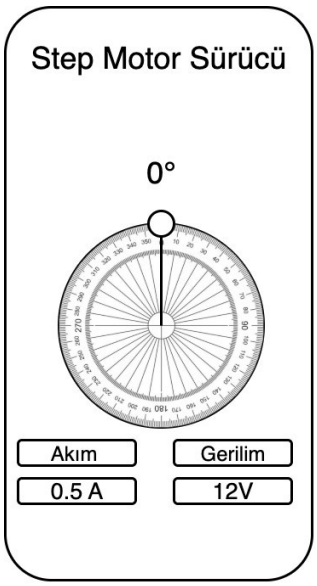
ÖZET

Sürücü devremiz 1/1 çözünürlükler dışında 1/2, 1/4, 1/8 ve 1/16 çözünürlüklerini desteklemektedir. Gelecek zamanlarda 1/1 sürüm dışında yazılımsal olarak microstepping yapmak hedeflerimiz arasındadır.

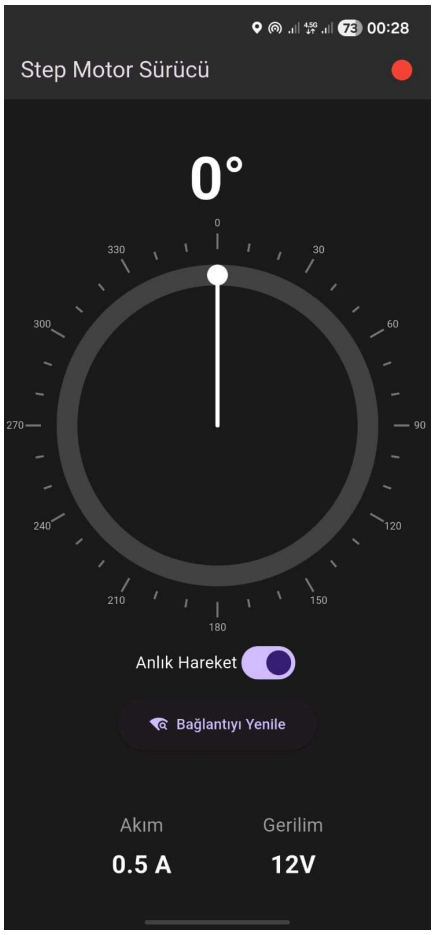
Mobil Uygulama

Flutter'da mobil uygulama projesi oluşturuldu. Arayüz oluşturuldu. Oluşturulan dosyalar ve arayüz en iyi pratikler göz önünde bulundurularak tamamiyle yapay zeka kullanılarak yapıldı. Projenin dosyalama sisteminden, arayüz tasarımına kadar yapay zeka kullanılmıştır. Daha önce mobil deneyimine sahip olunduğu için yapay zekayı hızlı prototipleme amaçlı kullanılması, projenin gidişatını hızlandırmıştır.

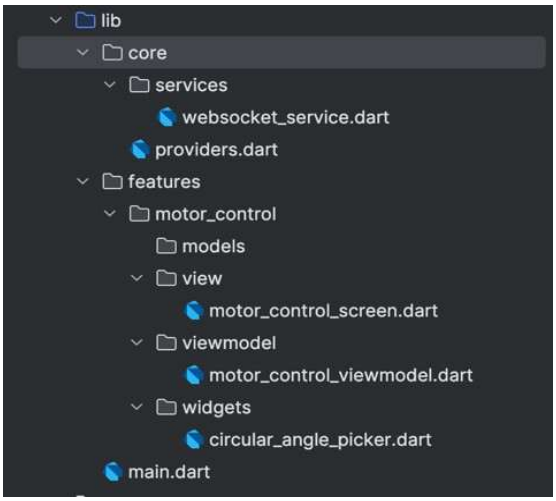
Uygulamanın en iyi pratiklere göre oluşturulması için kapsamlı prompt hazırlanmıştır. Hazırlanan prompt'a ek olarak, promptun anlatmak istediklerini wireframe olarak tasarlandı ve prompt'a ek olarak eklendi. Prompt'a eklenen wireframe Figür 29'da verilmiştir. Tek prompt'ta oluşturulan uygulamanın ekran görüntüsü Figür 30'da yer almaktadır. En iyi pratiklere uyan dosyalama sistemi ise Figür 31'de yer almaktadır. Bu dosyalama sisteminin adı 'Feature First' olarak geçmektedir. Özellik bazlı oldupu için, birden fazla kişi kendi alanında (domain'inde) aynı anda çalışabilmektedir



Figür 30 : Uygulamanın Wireframe'i



Figür 31 : Uygulamaya Ait Ekran Görüntüsü



Figür 29 : Flutter Dosyalama Sistemi

Gelecek zamanda test devrelerini oluşturmaya başlanması planlanmaktadır. Test pcb devreleri tamamlandıktan sonra ise hızlıca asıl adım motor sürücü devre tasarımı tamamlanacaktır.

Referanslar

[1] A. Lidow, «The Power Conversion Process as a Prosperity Machine Part II - Power Semiconductor Road Map,» %1 içinde *APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition.*, Dallas, TX, USA, 1999.

[2] A. Mayr, M. Weigelt, J. v. Lindenfels, J. Seefried, M. Ziegler, A. Mahr, N. Urban, A. Kühl, F. Hüttel ve J. Franke, «Electric Motor Production 4.0 – Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors,» *IEEE,* 2018.

[3] A. Rassõlkin, V. Rjabtšikov, T. Vaimann ve A. Kallaste, «Digital Twin of an Electrical Motor Based on Empirical Performance Model,» %1 içinde *I International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, SaintPetersburg, Russia, 2020.

[4] P. Fonseca, A. T. d. Almeida ve P. Bertoldi, «Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies,» *Science Direct,* pp. 673-690, 2003.

[5] R. Saidur, «A review on electrical motors energy use and energy savings,» *Elsevier,* pp. 877-898, 2009.

[6] C. Burt, X. Piao, F. Gaudi, B. Busch ve N. Taufik, «Electric Motor efficiency Under Variable Frequencies and Loads,» ITRC, California, 2006.

[7] E. N. Lorenz, «Deterministic nonperiodic flow,» *Journal of atmospheric sciences,* cilt 20, pp. 130-141, 1963.

[8] H. T. Moges, T. Manos, O. Racoveanu ve C. Skokos, «On the behavior of the Generalized Alignment Index (GALI) method for dissipative systems,» *International journal of bifurcation and chaos in applied sciences and engineering,* cilt 35, 2025.

[9] Y. a. Aman ve N. C. Sahoo, «Chaos in Electric Motor Drives: An Introduction,» %1 içinde *3rd Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)*, Bhubaneswar, India, 2024.

[10] J. H. Sandee, «Event-driven control in theory and practice : trade-offs in software and control performance,» Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006.

[11] M. O. Thurston, H. A. Toliyat ve G. B. Kliman, Handbook of Electric Motors, Ohio: CRC Press, 2004.

[12] X. Hu, «An Introduction to Stepper Motors,» UNIVERSITY of Arizona College of Optical Sciences, Arizona, 2018.

[13] M.-C. Arva, M. Stanica ve N. Anghel, «Analysis on vibration and resonance characteristics of an low speed 3phase stepper motor,» %1 içinde *Electronics, Computers and Artificial Intelligence*, Iasi, ROMÂNIA, 2018.

[14] M. Ademi, M. Anačkova ve D. Šiškovski, «REAL-TIME VIBRATION ANALYSIS AND RESONANCE DETECTION OF STEPPER MOTORS,» *Mechanical Engineering – Scientific Journal,* cilt 43, no. 1, pp. 49-57, 2025.

[15] A. &. D. B. Hughes, «Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications,» (5th ed.)Butterworth-Heinemann., 2019, pp. Chapter 11: Stepper motors – operating principle, basic features and control methods..

[16] P. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics (3rd ed.). Wiley., 2013, pp. 765-770.

[17] D. &. F. T. Jones, «Mechatronics: Principles and Applications.,» *Oxford UNIVERSITY Press.,* Cilt %1 / %2Bölüm

8.3: Step motorların sürme yöntemleri, full-step modun tork avantajları ve titreşim nedenleri., 2010.

[18] T. A. Khan, T. A. Taj ve I. Ijaz, «Hybrid Stepper Motor and its Controlling Techniques a Survey,» %1 içinde *Proceedings of the 2014 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*, St. Petersburg, Russia, 2014.

[19] F. Bernardi, E. Carfagna, G. Migliazza, G. Buticchi, F. Immovilli ve E. Lorenzani, «Performance Analysis of Current Control Strategies for Hybrid Stepper Motors,» *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society,* cilt 3, pp. 460-472, 2022.

[20] A. E. Clémence MURON, «DIFFERENCE BETWEENBIPOLAR DRIVES AND UNIPOLAR DRIVES FOR STEPPER MOTORS,» *Portescap,* p. page 6, 2021.

[21] M. E. E. D. F. o. E. a. S. ,. B. U. ,. Ayman Y.Yousef, «SIMULATION AND IMPLEMENTATIONOF MUTIPLE UNIPOLAR STEPPER MOTOR POSITON CONTROL IN THREE STEPPING MODES USING MICROCONTROLLER,»

Indonesian Journal of Electrical Engineering and computer Science , cilt ol.4, no. No.1, pp. 29-40, October 2016.

[22] H. K. A. C. Tanu Shree Roy, «SIMPLE DISCUSSION ON STEPPER MOTORS FOR THE DEVELOPMENT OF ELECTRONİC DEVICE,» *International journal of scientific & Engineering Research,* cilt Volume 5, no. Issue 1, january 2014.

[23] N. Cameron, ESP32 Formats and Communication, Edinburgh, UK : Apress Berkeley, CA, 2023.

[24] G. M. B. Oliveira, D. C. M. Costa, R. J. B. V. M. Cavalcanti, J. P. P. Oliveira, D. R. C. Silva, M. B. Nogueira ve M. C. Rodrigues, «Comparison Between MQTT and WebSocket Protocols for IoT Applications Using ESP8266,» *IEEE,* pp. 236-241, 2018.

[25] V. Wang, F. Salim ve P. Moskovits, «Chapter 3,» %1 içinde *The Definitive Guide to HTML5 WebSocket*, 2013, pp. 33-60.

IoT CLOUD TABANLI SMARTLED DRİVER

Emirhan İPEK[1*], Muhammed Emirhan ÇÖP[2]

[1*] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology*

[*] *(233302030@ogr.selcuk.edu.tr)*
[*] *(233302022@ogr.selcuk.edu.tr)*

Özet – IoT Cloud Tabanlı SmartLED Driver projesi, geleneksel LED aydınlatma sistemlerini internet üzerinden kontrol edilebilir hâle getirmeyi amaçlayan, ESP8266 tabanlı akıllı bir LED sürücü devresi geliştirilmesini konu almaktadır. Proje, düşük maliyetli donanım çözümleri ile bulut tabanlı IoT platformlarının bir araya getirilmesi sonucu, kullanıcıların LED sistemlerini parlaklık ve renk kontrolü gibi gelişmiş özelliklerle uzaktan yönetmesini mümkün kılar.Projenin amacı, küçük boyutlu, modüler, esnek ve herhangi bir LED şeridi akıllı hâle getirebilen bir sürücü geliştirmektir. Bu yönüyle proje, piyasadaki markaya bağımlı "kullan-at tip" akıllı ampullerden ayrılmakta ve özgün bir değer sunmaktadır Donanım tasarımında, ESP8266 modülü sistemin "beyni" olarak kullanılmış; Wi-Fi bağlantısı sayesinde IoT Cloud platformu üzerinden cihazın internete erişmesi sağlanmıştır. ESP8266'nın düşük voltajlı sinyaller üretmesi nedeniyle LED'lerin yüksek akım gereksinimini karşılamak için MOSFET anahtarlama katmanı tasarlanmıştır. MOSFET'ler, LED şeritlere gerekli akım iletimini güvenli biçimde gerçekleştirmektedir
Devre beslemesi için 12–24V girişten 3.3V çıkış elde eden bir Buck Converter güç devresi tasarlanmıştır. MC34063A entegresi kullanılarak kararlı 3.3V çıkış sağlanmış ve besleme devresi tüm sistem için güvenilir enerji altyapısı oluşturmuştur.Yazılım ve IoT entegrasyonunda ESP8266'nın internet üzerinden bulut platformuna bağlanarak, kullanıcı komutlarını LED sürücü devresine aktarması sağlanmıştır. Web veya mobil tabanlı kullanıcı arayüzü ile LED parlaklığı ve renk ayarları gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen arayüzün kullanıcı dostu olması ve anlık geri bildirim sağlaması hedeflenmiştir

Keywords – IoT, ESP8266,Wi-Fi, Akıllı Aydınlatma, Uzaktan kontrol

GIRIS

Günümüzde nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin yaygınlaşması, ev içi otomasyon ve akıllı aydınlatma alanlarında önemli dönüşümlere yol açmıştır. Kullanıcıların kendi yaşam alanlarını uzaktan yönetebilme isteği, enerji tasarrufu, güvenlik, kişiselleştirilebilirlik ve konfor gibi ihtiyaçlarla birleştiğinde, akıllı aydınlatma sistemleri modern yaşamın temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Bu bağlamda LED teknolojileri, düşük güç tüketimi ve uzun kullanım ömrü sayesinde akıllı IoT tabanlı sistemlerle uyumlu çalışan ideal aydınlatma çözümlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Geleneksel aydınlatma çözümleri yalnızca manuel açma–kapama işlevleri sunarken, IoT destekli modern sistemler bulut bağlantısı sayesinde parlaklık kontrolü, renk ayarı, zamanlama, otomatik senaryolar ve uzaktan erişim gibi birçok gelişmiş özelliği kullanıcıya sunmaktadır. Böylece kullanıcılar, bulundukları ortamdan bağımsız olarak evlerindeki ışık sistemlerini izleyebilmekte ve yönetebilmektedir. Bu durum hem enerji verimliliği hem de kullanıcı konforu açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

IoT Cloud Tabanlı SmartLED Driver projesi, akıllı aydınlatma teknolojilerinin bu gelişim sürecine katkı sağlayacak şekilde tasarlanmış, modüler ve düşük maliyetli bir LED sürücü çözümü sunmaktadır. Projenin odak noktası, herhangi bir standart LED şeridinin sadece yazılım ve donanım eklemesiyle akıllı bir sisteme dönüştürülmesidir. Böylece, piyasadaki marka bağımlı akıllı ampullerden farklı olarak kullanıcıların istediği LED grubunu IoT destekli hâle getirmesi mümkün olmaktadır.

Bu kapsamda proje; ESP8266 Wi-Fi modülünün kullanıldığı, MOSFET tabanlı bir güç anahtarlama katmanı ve MC34063A entegresiyle oluşturulmuş kararlı bir güç devresi içeren bütünleşik bir yapıya sahiptir. Sistem, bulut tabanlı bir kontrol arayüzü ile desteklenerek LED parlaklığı ve renk ayarlarının internet üzerinden gerçek zamanlı

yapılmasına olanak tanır. Geliştirilen devre ve arayüz sayesinde akıllı ev otomasyonu içerisinde kullanılabilecek, kompakt boyutlu, maliyeti düşük ve kullanıcı dostu bir aydınlatma çözümü ortaya konulmaktadır.

Bu proje; tasarım süreçleri, donanım entegrasyonları, yazılım geliştirme adımları ve yapılan testlerle birlikte hem eğitim hem de endüstriyel uygulamalar için referans niteliğinde bir IoT tabanlı LED sürücü geliştirme çalışması sağlamaktadır.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

IoT tabanlı akıllı LED aydınlatma sistemleri konusunda dünya genelinde akademik, ticari ve açık kaynak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar LED sürücü teknolojileri, enerji verimliliği, uzaktan kontrol sistemleri ve akıllı şehir uygulamaları gibi farklı alanlarda yoğunlaşmıştır. Araştırmacılar ve firmalar, ESP8266 ve ESP32 gibi mikrodenetleyiciler kullanarak WiFi, Bluetooth ve MQTT protokolleri ile LED kontrolü sağlayan sistemler geliştirmiştir. Bu çalışmalar, mevcut projemizin tasarımında önemli bir literatür temeli oluşturmaktadır.

Circuit Digest (2023): ESP32'yi kullanarak Amazon Alexa ve Google Assistant ile sesli komut üzerinden çalışan bir akıllı ev otomasyon sistemi geliştirmiştir. Projede ESP32'ye bağlı röle modülleri aracılığıyla evdeki ampul, fan ve priz gibi cihazlar kontrol edilmiştir. Sistem, Wi-Fi bağlantısı ve IoT bulut servisi sayesinde uzaktan erişim sağlamış; kullanıcı hem mobil uygulama hem de sesli asistan üzerinden cihazları açıp kapatabilmiştir. Bu çalışma, ESP32'nin çoklu platform entegrasyonuna uygun güçlü bir IoT mikrodenetleyici olduğunu göstermiştir.[1]

ESPHome Projesi: ESP32 ve ESP8266 tabanlı özelleştirilebilir akıllı ev cihazları oluşturmak için kod yazmaya gerek kalmadan yapılandırılabilir bir platform geliştirmiştir. Kullanıcılar, YAML tabanlı tanımlamalar ile sensör, röle ve LED gibi bileşenlerin çalışma mantığını kolayca belirleyebilmiştir. Sistem, Home Assistant ile tam uyumluluk sağlayarak tek bir merkezden tüm akıllı ev cihazlarının kontrolünü mümkün kılmıştır. Bu yapı hem esneklik hem de düşük maliyetli sistem geliştirme açısından önemli bir avantaj sunmuştur.[2]

IotCircuitHub (2022): NodeMCU ESP8266 ve Sinric Pro platformunu kullanarak Google Assistant ve Alexa ile kontrol edilebilen bir akıllı ev sistemi oluşturmuştur. Sistemde röle kartları ile aydınlatma ve elektrikli aygıtların açma-kapama kontrolü gerçekleştirilmiş, kullanıcı komutları IoT bulut bağlantısı üzerinden ESP8266'ya iletilmiştir. Mobil uygulama, sesli komut ve manuel buton seçenekleri bir arada sunularak sistemin kullanım esnekliği artırılmıştır. Bu proje, düşük maliyetli donanım ile pratik ve genişletilebilir akıllı otomasyon yapılabileceğini göstermiştir.[3]

Sinric Pro: ESP8266 ve ESP32 tabanlı cihazların Amazon Alexa ve Google Home ile doğrudan iletişim kurmasına olanak sağlayan bir bulut platformu geliştirmiştir. Platform, kullanıcı sesli komutlarını gerçek zamanlı olarak cihazlara iletmiş ve ek API yapılandırmasına ihtiyaç duymadan akıllı ev entegrasyonu sunmuştur. Ayrıca webhook ve durum senkronizasyon mekanizmaları ile cihazların güncel çalışma durumu bulut üzerinden izlenebilmiştir. Bu yapı, ses kontrollü IoT sistem geliştirmeyi önemli ölçüde kolaylaştırmıştır.[4]

Instructables (2021): ESP32 tabanlı bir akıllı ev sistemi tasarlayarak cihazların hem Amazon Alexa üzerinden hem de duvar anahtarları ile manuel olarak kontrol edilmesini sağlamıştır. Sistem, elektrik kesintisi veya internet erişimi olmayan durumlarda bile yerel butonlarla çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Sesli komutlar IoT platformu üzerinden ESP32'ye iletilmiş ve röle modülleri aracılığıyla cihaz kontrolü yapılmıştır. Bu çalışma, akıllı ev sistemlerinde güvenilirlik ve kullanıcı kontrol esnekliğini ön plana çıkarmıştır.[5]

Easy Electronics Project (2021): ESP32'yi kullanarak Alexa ve Google Home ile entegre çalışan bir ev otomasyon projesi geliştirmiştir. Sistemde Wi-Fi üzerinden uzaktan kontrol, mobil uygulama yönetimi ve sesli asistan üzerinden cihaz açma-kapama işlemleri sağlanmıştır. Röle ve LED kontrolü gibi temel otomasyon elemanları kullanılarak sistem modüler olarak genişletilebilir şekilde tasarlanmıştır. Bu proje, ESP32'nin yüksek bağlantı yetenekleri sayesinde çift asistan desteğini aynı anda sağlayabildiğini göstermiştir.[6]

IotCircuitHub (2022): ESP32 ve ESP RainMaker kullanarak Alexa ve Google Home uyumlu, ayrıca IR uzaktan kumanda desteği sunan akıllı bir ev sistemi geliştirmiştir. RainMaker, cihaz durumlarını bulut üzerinden senkronize

ederek mobil uygulama ve sesli asistan kontrolünü otomatik olarak sağlamıştır. IR modülü sayesinde televizyon ve klima gibi kızılötesi kontrollü cihazlar da sisteme dahil edilmiştir. Böylece hem modern hem de eski cihazlar tek sistem altında birleştirilmiştir.[7]

WLED Projesi: ESP32 için NeoPixel ve WS2812B LED şeritlerini kontrol edebilen gelişmiş bir açık kaynak yazılım geliştirmiştir. Sistem, 100'den fazla ışık animasyonu, müzik senkronizasyon modu ve uzaktan web/mobil kontrol desteği sunmaktadır. Kullanıcılar efektleri özelleştirip kaydedebilmekte ve otomatik zamanlama ayarları yapabilmektedir. WLED, dekoratif ve interaktif LED aydınlatma projelerinde ESP32'nin yüksek performanslı bir çözüm olduğunu göstermektedir.[8]

Instructables (2025): ESP8266 kullanılarak Wi-Fi bağlantılı bir akıllı IoT lamba sistemi geliştirmiştir. Projede LED parlaklık ve çalışma modu, web tabanlı arayüz veya mobil uygulama üzerinden kontrol edilebilmiştir. ESP8266'nın dahili Wi-Fi modülü sayesinde sistem internete doğrudan bağlanarak uzaktan kontrol desteği sunmuştur. Ayrıca kullanıcı, farklı ışık senaryoları oluşturarak lambayı kişisel kullanım alışkanlıklarına göre otomatikleştirebilmiştir. Bu çalışma, düşük maliyetli IoT aydınlatma çözümlerinin pratik uygulanabilirliğini göstermiştir.[9]

Euristiq (2024): Akıllı LED aydınlatma ve IoT otomasyon teknolojilerinin enerji tüketimini düşürmedeki etkisini incelemiştir. Araştırmada sensör tabanlı kontrol, zamanlama ayarları ve kullanım verisi analizi sayesinde gereksiz enerji kullanımının önlenebildiği belirlenmiştir. IoT sistemlerinin çevresel koşullara göre parlaklık ayarlayarak enerji tasarrufu sağladığı vurgulanmıştır. Çalışma, akıllı aydınlatmanın sürdürülebilir şehir ve bina tasarımlarında önemli bir rol oynayacağını göstermiştir.[10]

LTECH: Kablosuz ağ bağlantısı ve akıllı kontrol özellikleri içeren IoT tabanlı LED sürücüleri geliştirmiştir. Bu sürücüler, Wi-Fi ve Bluetooth üzerinden uzaktan kontrol edilebilmekte ve farklı ışık sahneleri programlanabilmektedir. Sistem enerji optimizasyonu için otomatik parlaklık ayarı ve zamanlama desteği sunmaktadır. LTECH'in geliştirdiği bu çözümler, ticari ve konut aydınlatma sistemlerinde kullanıcı kontrolünü ve enerji verimliliğini artırmıştır.[11]

DusunIoT (2024): Akıllı LED sistemlerinin geleneksel aydınlatmaya kıyasla çok daha verimli çalıştığını incelemiştir. Çalışma, IoT tabanlı kontrol sistemlerinin gerçek zamanlı ortam geri bildirimi sayesinde ışık kullanımını optimize edebildiğini göstermiştir. Akıllı LED'ler, ihtiyaca göre otomatik kısılma ve açılma yaparak enerji israfını azaltmıştır. Araştırma, bu sistemlerin uzun vadede ekonomik tasarruf sağladığını ortaya koymuştur.[12]

Infineon Technologies: Bluetooth ve sensör modülleri ile donatılmış akıllı LED aydınlatma sistemleri geliştirmiştir. Sistem, hareket ve ortam ışığını algılayarak aydınlatmayı otomatik olarak ayarlayabilmekte ve böylece enerji tüketimini optimize etmektedir. IoT kontrollü yapı sayesinde cihazlar mobil uygulamalar ve otomasyon panelleri üzerinden yönetilebilmektedir. Bu çalışma, LED aydınlatma sistemlerinde sensör destekli otomasyonun önemini vurgulamıştır.[13]

Adayo LED (2024): Kablosuz iletişim protokolleri ve IoT entegrasyonunun LED sistemlerini daha esnek, ölçeklenebilir ve kullanıcı odaklı hale getirdiğini araştırmıştır. Mobil uygulama desteği ile farklı aydınlatma senaryoları oluşturma imkânı sağlanmıştır. Çalışma, uzaktan kontrol ve enerji izleme özelliklerinin akıllı aydınlatma sistemlerinin geleceğini şekillendirdiğini belirtmiştir. Bu kapsamda LED sistemlerinde IoT kullanımının hızla yaygınlaşacağı öngörülmüştür.[14]

SecretLED: Akıllı LED aydınlatma sistemlerinde IoT tabanlı kontrolün gelecekteki gelişme yönlerini incelemiştir. Araştırma, kişiselleştirilebilir aydınlatma profilleri, renk sıcaklığı ayarı ve dinamik ışıklandırma gibi özelliklerin modern kullanıcı gereksinimlerini karşıladığını ortaya koymuştur. Ayrıca enerji verimliliği ve uzaktan yönetilebilirlik gibi avantajların akıllı aydınlatmayı geleneksel sistemlere göre üstün kıldığı vurgulanmıştır.[15]

ScienceDirect (2023): IoT destekli LED aydınlatma sistemlerinin tasarım süreçlerini inceleyen akademik araştırmalar yayınlamıştır. Çalışmalarda sensör entegrasyonu, otomatik kontrol algoritmaları ve bulut tabanlı veri

işleme yöntemlerinin enerji tasarrufuna katkı sağladığı belirlenmiştir. IoT tabanlı aydınlatmanın yaşam alanları ve endüstriyel tesislerde verimliliği artırdığı sonucuna varılmıştır.[16]

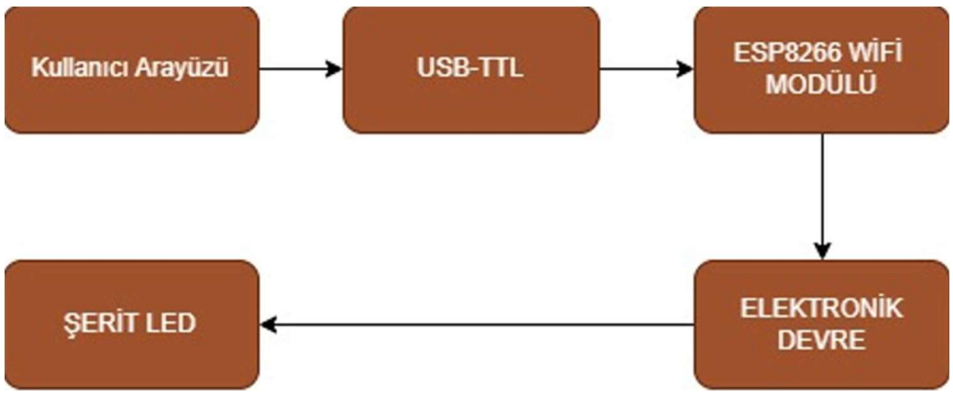
AGC Lighting (2023): Bağlantılı LED aydınlatma sistemlerinin elektrik tüketimini %50–90 oranında azaltabileceğini raporlamıştır. Verim artışı; sensör tabanlı ışık kontrolü, zamanlama, otomatik kısılma ve kullanım odaklı aydınlatma stratejileri ile sağlanmıştır. Sistem ayrıca işletme bakım maliyetlerini düşürmüştür. Bu çalışma, akıllı LED sistemlerinin enerji tasarrufunda güçlü bir çözüm olduğunu göstermektedir.[17]

Arduino Documentation: ESP32 ve ESP8266 kartlarının Arduino Cloud üzerinden internete bağlanarak LED ve diğer cihazların uzaktan kontrol edilebildiğini açıklamıştır. Kullanıcılar web paneli üzerinden cihaz durumlarını izleyip kontrol edebilmiş ve otomatik tetikleme kuralları oluşturabilmiştir. Bu yapı, IoT sistemlerinin geliştirilmesini ve dağıtımını kolaylaştırarak yaygın kullanım sağlamıştır.[18]

MakeUseOf (2022): ESP32 kullanarak Wi-Fi üzerinden kontrol edilebilen çoklu oda aydınlatma otomasyon sistemi geliştirmiştir. Projede ESP32, hem LED şeritleri hem de röle kartları ile birlikte kullanılarak ev içindeki farklı odalarda bağımsız ışık kontrolü sağlanmıştır. Sistem web arayüzü, mobil uygulama ve MQTT tabanlı IoT kontrolü ile çalıştırılabilmiştir. Kullanıcı, her odanın ışık parlaklığını ve çalışma zamanlamasını kişisel ihtiyaçlarına göre ayarlayabilmiştir. Bu çalışma, ESP32'nin aynı anda birden fazla cihazı düşük gecikme ile kontrol edebilme yeteneğini öne çıkarmıştır.[19]

Hackster.io (2023): ESP8266 ve Google Home entegrasyonu ile enerji tasarrufu odaklı bir akıllı ev ışık kontrol sistemi tasarlamıştır. Projede hareket sensörleri kullanılarak belirli alanlarda hareket algılandığında LED aydınlatma otomatik olarak açılmış, belirli bir süre hareketsizlik durumunda ise otomatik olarak kapatılmıştır. Sistem, IoT bulut servisi üzerinden Google Home uygulaması ile senkronize edilerek sesli komut desteği eklenmiştir. Böylece aydınlatma hem otonom sensör kontrolü hem de kullanıcı komutu ile yönetilebilir hale gelmiştir. Bu çalışma, akıllı aydınlatma sistemlerinin kullanıcı alışkanlıklarına uyum sağlayarak enerji verimliliğini artırabileceğini göstermektedir.[20]

BLOK ŞEMASI



Şekil 1. Blok Şeması

MATERYALLER

ESP8266 WiFi Modülü

ESP8266, Espressif Systems tarafından üretilen düşük maliyetli WiFi mikrodenetleyici modülüdür. 32-bit işlemciye sahip olan modül, 80-160 MHz hızında çalışmaktadır.. 802.11 b/g/n WiFi protokolünü desteklemekte ve 2.4 GHz bandında çalışmaktadır.

USB TTL Dönüştürücü

USB TTL dönüştürücü, bilgisayarın USB portunu seri iletişim portuna dönüştürtürmektedir.. ESP8266'nın programlanması ve veri alışverişi için kullanılmaktadır.. CP2102, CH340G veya FTDI FT232RL entegrelerine sahiptir.USB sinyallerini TX ve RX sinyallerine dönüştürmektedir.. 5V USB gerilimini 3.3V veya 5V çıkışa dönüştürerek mikrodenetleyiciyi beslemektedir. Hata ayıklama ve seri monitör işlemlerinde kullanılmaktadır.

Arduino IDE

Arduino IDE, ESP8266 programlama için kullanılan açık kaynak geliştirme ortamıdır. C/C++ programlama dilini kullanmaktadır. ESP8266 desteği için board paketi yüklenmelidir.

IoT Cloud Platformu

IoT Cloud platformu, ESP8266'nın internet üzerinden kontrolü için kullanılır.

PROJE ADIMLARI

Malzeme Seçimi

Bu aşamada proje için gerekli bileşenler Robotistan, Özdisan gibi güvenilir tedarikçi sitelerinden araştırılarak uygun komponentler seçilecektir. Belirlenen parçaların stok durumları dikkate alınacak, bulunamayan veya tükenen komponentler için eşdeğer alternatifler tercih edilecektir. Uygun seçim yapıldıktan sonra temin sürecine geçilecektir.

Sistem Tasarımı ve Şema Oluşturma

Bu adımda, projenin donanım ve yazılım bileşenleri için detaylı bir sistem tasarımı yapılacak ve blok şeması hazırlanacaktır. Arayüz, TTL dönüştürücü, LED sürücü devresi ve LED'ler arasındaki bağlantılar, sinyal akışı ve güç gereksinimleri dikkate alınarak şematik bir diyagram oluşturulacaktır. Tasarım, IoT entegrasyonu ve uzaktan kontrol gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize edilecektir. Gerekirse, devre simülasyon yazılımları (örneğin, Altium ,Proteus) kullanılarak tasarım test edilecektir.

Arayüz Geliştirme

Kullanıcıların LED parlaklığını ve RGB renklerini kontrol edebileceği bulut tabanlı bir arayüz geliştirilecektir. Arayüz, HomeR veya benzeri bir ev otomasyon sistemiyle uyumlu olacak şekilde tasarlanacaktır. Web veya mobil tabanlı bir uygulama olarak geliştirilecek arayüz, kullanıcı dostu bir deneyim sunacak ve IoT platformu Arayüz, gerçek zamanlı kontrol ve durum izleme özelliklerini destekleyecektir.

Yazılım Entegrasyonu ve IoT Bağlantısı

Donanım ve arayüz arasındaki iletişim için gerekli yazılım geliştirilecektir. ESP 8266 wifi modülü ile kod işlemleri yapılacak ,TTL dönüştürücü aracılığıyla arayüzden gelen komutları (parlaklık, renk ayarları) işleyecek ve LED sürücü devresine aktaracaktır. IoT bağlantısı sistemin uzaktan erişim ile kontrolü sağlanacaktır. Yazılım, güvenilirlik ve düşük gecikme için test edilecektir.

Test ve Optimizasyon

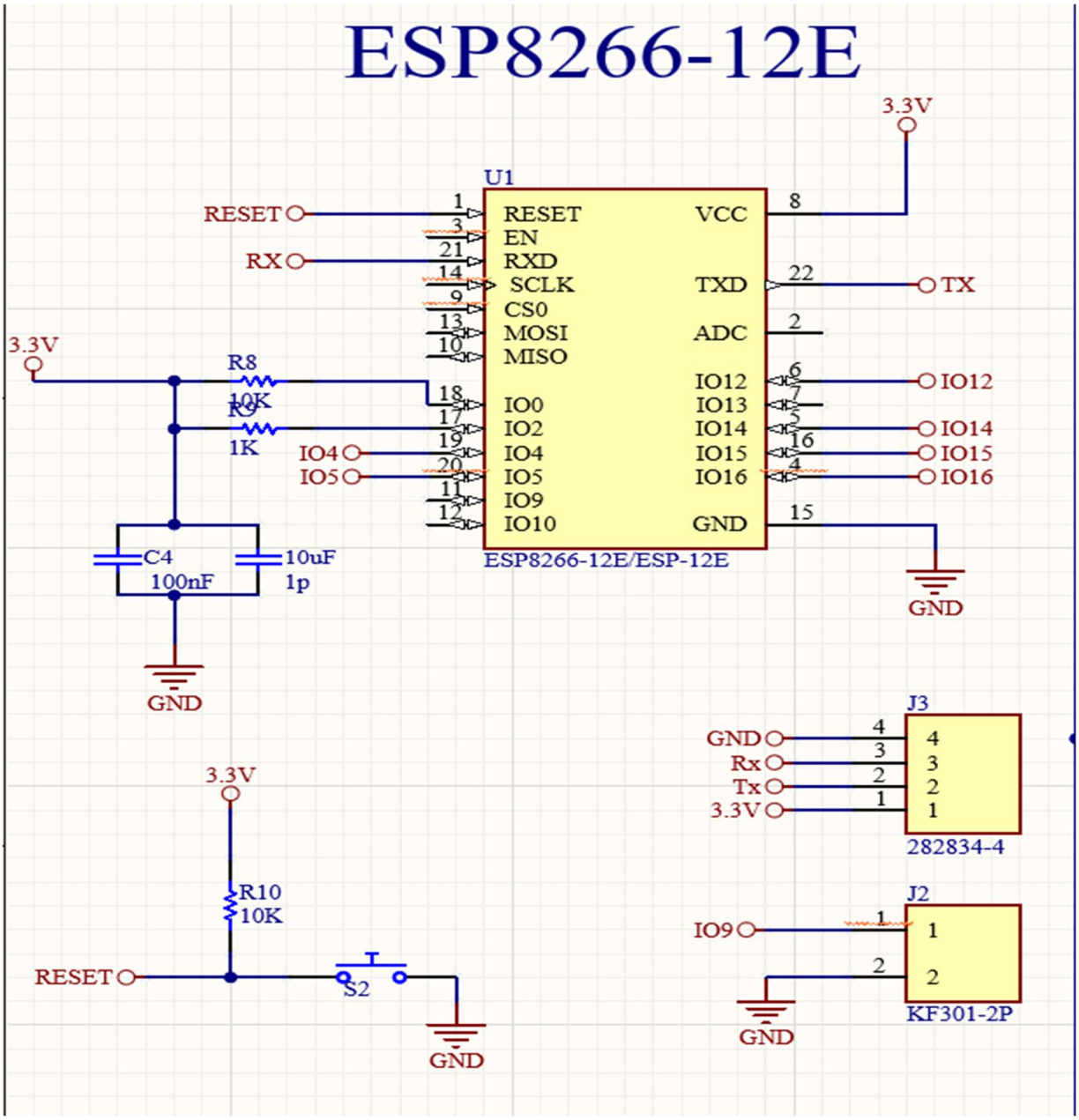
Prototip tamamlandıktan sonra, sistemin tüm bileşenleri (arayüz, TTL dönüştürücü, LED sürücü devresi, LED'ler) entegre edilerek test edilecektir. Testler, parlaklık ve renk kontrolünün doğruluğu, IoT bağlantısının kararlılığı ve sistemin enerji verimliliği gibi unsurları kapsayacaktır. Tespit edilen hatalar veya performans eksiklikleri giderilecek, gerekirse donanım veya yazılımda optimizasyonlar yapılacaktır.

Kart Basımı ve Üretim

Son adım olarak, proje kapsamında hazırlanan devre şeması ve PCB çizimleri esas alınarak kart basım aşamasına geçilecektir. Bu aşamada PCB tasarımının üretime uygunluğu tekrar kontrol edilecek, yüksek akım yolları, topraklama ve güç dağılımı, MOSFET veya diğer güç elemanlarının pad yerleşimleri ve ısı dağılımı gibi kritik noktalar gözden geçirilecektir.

ELEKTRONIK DEVRE ŞEMATIĞI

Bu bölümde, proje kapsamında tasarlanan devre şematiği sunulmakta ve bu şematiği oluşturan temel bileşenler detaylı bir şekilde incelenmektedir.



Şekil 2. ESP-8266-12E

Şekil 2'de, SmartLED Driver projesinin "beyni" olarak görev yapan ESP8266-12E Wi-Fi modülü ve bu modülün çalışması için gereken temel çevresel bileşenler gösterilmektedir. Bu modülün projemiz için tercih edilmesinin birçok stratejik nedeni bulunmaktadır:

Dahili Wi-Fi Özelliği: Projenin en temel amacı "IoT Cloud Tabanlı" bir sistem oluşturmaktır. ESP8266-12E, kendi başına bir Wi-Fi ağına bağlanabilen veya bir erişim noktası (Access Point) olarak çalışabilen entegre bir Wi-Fi yığınına sahiptir. Bu özellik, harici bir Wi-Fi modülüne gerek kalmadan cihazın doğrudan internete ve bulut servislerine bağlanmasını sağlamaktadır. Böylece uzaktan kontrol, otomasyon ve veri alışverişi mümkün hale gelmektedir.

Güçlü Mikrodenetleyici: ESP8266, sadece bir Wi-Fi çipi değil, aynı zamanda tüm proje mantığını çalıştırabilecek güçlü bir 32-bit mikrodenetleyicidir. LED'leri kontrol etmek (parlaklık ayarı için PWM sinyalleri üretmek), kullanıcı komutlarını işlemek ve bulut ile iletişimi aynı anda yönetmek için fazlasıyla yeterli işlem gücüne sahiptir.

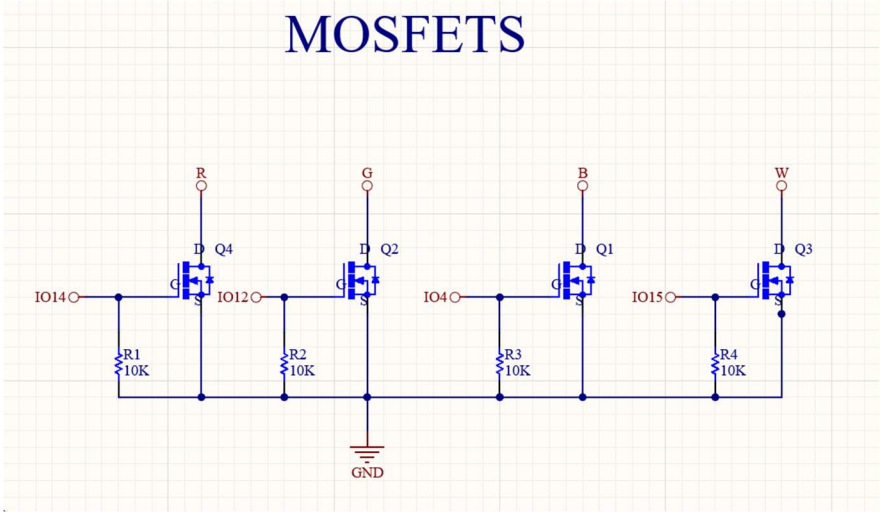
Yeterli GPIO (Giriş/Çıkış) Pini: Şemada da görüldüğü gibi (IO4, IO5, IO12, IO14 vb. olarak etiketlenen pinler), modül, LED şeritlerini veya gruplarını sürecek olan MOSFET'leri veya sürücü entegrelerini tetiklemek için çok sayıda programlanabilir pin sunar. Bu pinler, birden fazla LED kanalını bağımsız olarak kontrol etme esnekliği sağlamaktadır.

Düşük Maliyet ve Kompakt Boyut: Bu modül, sunduğu Wi-Fi ve işlemci özelliklerine kıyasla son derece düşük maliyetlidir. Bu durum, projenin seri üretime uygun ve son kullanıcı için erişilebilir olmasını sağlar. Ayrıca, kompakt yapısı sayesinde projenin hedeflediği "küçük boyutlu" sürücü devresinin içine kolayca entegre edilebilmektedir

Proje için alternatif olarak piyasada sıkça kullanılan ESP32 modülü de değerlendirilmiştir. Ancak ESP32'nin seçilmemesinin temel sebepleri, maliyet ve kullanılmayan özelliklerin getireceği gereksiz yüklerdir.

ESP32, ESP8266'ya kıyasla daha yüksek bir birim maliyetine sahiptir. Daha önemlisi, bu modülün sunduğu çift çekirdekli işlemci, dahili Bluetooth (BLE) desteği ve çok daha fazla GPIO pini gibi gelişmiş özellikler, bu projenin temel gereksinimlerinin (Wi-Fi üzerinden LED kontrolü) çok ötesindedir. Sonuç olarak, projenin nihai maliyetini artıracak ve kullanılmayacak bu ek özellikler nedeniyle ESP32, bu spesifik SmartLED Driver tasarımı için verimli bir çözüm olarak görülmemiş ve tercih edilmemiştir.

Mosfetler



Şekil 3. Mosfetler

MOSFET'lerin Görevi: Neden Gerekli?

Şekil 3'te, projenin güç anahtarlama katmanını, yani MOSFET'leri göstermektedir. Bu bölüm, ESP8266'nın zayıf sinyallerini kullanarak yüksek güçlü LED şeritleri nasıl kontrol ettiğimizi açıklar.

Projemizin beyni olan ESP8266'nın GPIO pinleri (IO4, IO12 vb.) sadece çok düşük akımla (miliamper seviyesinde) ve 3.3 Volt ile çalışabilir. Ancak, bir LED şerit (özellikle RGBW bir şerit) tam parlaklıkta çalışmak için 12V veya 24V gibi yüksek bir voltaja ve Amper seviyesinde yüksek bir akıma ihtiyaç duyar.

ESP8266'yı doğrudan LED'lere bağlamaya çalışmak, ESP8266'nın anında yanmasına sebep olur.

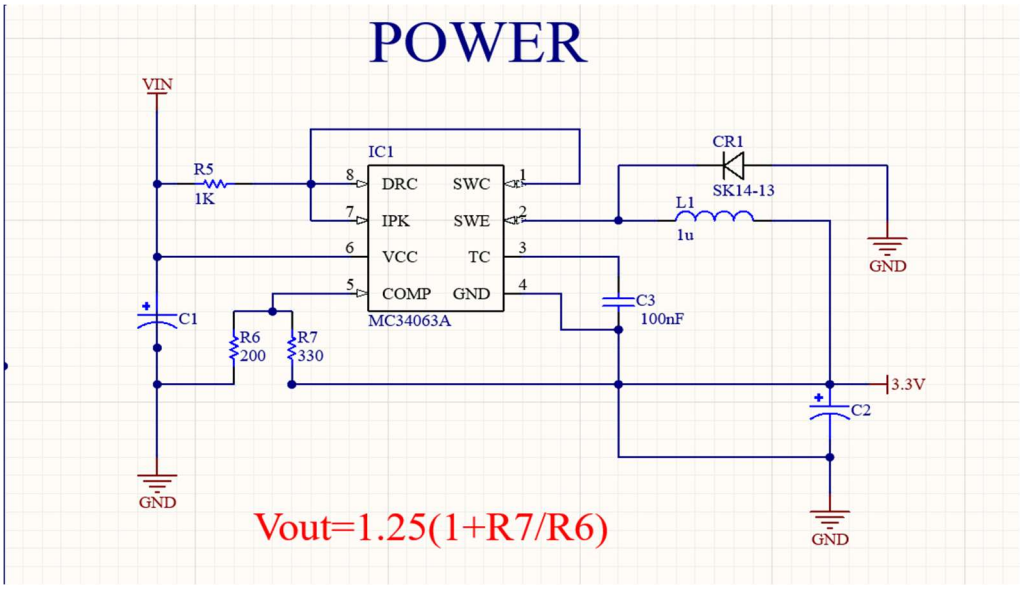
İşte burada MOSFET'ler devreye girer. Bir MOSFET, zayıf bir voltaj sinyali (ESP8266'dan gelen 3.3V) ile kontrol edilen elektronik bir anahtar (tetikleyici) gibi çalışır. Bu zayıf sinyali kullanarak LED'lerin ihtiyaç duyduğu yüksek akım ve voltajı açıp kapatabilir.

MOSFET Seçimi

Projede tedarik bulunması durumunda P25B6EB-5071 N-Kanal MOSFET tercih edilecektir. Bu modelin (veya benzer teknik özelliklere sahip N-Kanal MOSFET'lerin) tercih edilmesinin arkasındaki teknik nedenler şunlardır:

Bu MOSFET'in (veya benzerlerinin) tercih edilmesinin temel nedeni, yüksek verimlilik sağlamasıdır. İletimdeyken (açıkken) çok düşük bir dirence $R_{DS}(on)$ sahip olması, üzerinden akım geçerken çok az güç kaybetmesi ve daha az ısınması anlamına gelir. Aynı zamanda, devrenin çalışma gerilimine V_{DS} rahatlıkla dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bir diğer önemli avantajı ise, mikrodenetleyici gibi düşük voltajlı kontrol sinyalleri (örn. 3.3V veya 5V) ile doğrudan sürülebilmesidir(düşük $V_{GS(th)}$) Bu, ek sürücü devrelere olan ihtiyacı azaltarak tasarımı basitleştirir. Son olarak, çok hızlı açılıp kapanabilme (düşük Q_g) yeteneği, özellikle PWM gibi hızlı anahtarlama gerektiren uygulamalarda kayıpları en aza indirir.

Güç Devresi



Şekil 4. Güç Devresi

Şekil 4 "Buck Converter" (Düşürücü Tip) DC-DC Güç Kaynağı devresidir.

Temel amacı, VIN olarak etiketlenen daha yüksek bir giriş gerilimini alıp, kararlı ve daha düşük bir çıkış gerilimine indirmektir.

BILEŞENLER

IC1 (MC34063A): Devrenin beynidir. Bu, anahtarlamalı bir güç kaynağı (SMPS) kontrol entegresidir. Giriş gerilimini çok yüksek bir frekansta (hızda) açıp kapatarak (anahtarlayarak) çıkış voltajını ayarlar.

L1 (Bobin) ve C2 (Kondansatör): Bu ikili, çıkış filtresi görevi görür. IC1'in ürettiği hızlı "darbeleri" yumuşatır ve pürüzsüz, kararlı bir 3.3V DC gerilime dönüştürür.

CR1 (Schottky Diyot): Bu diyot, devrenin verimliliği için kritik öneme sahiptir. IC1'in içindeki anahtar *kapandığında*, bobinde (L1) depolanan enerjinin akmaya devam edebilmesi için bir yol sağlar. (Buna "flyback" veya "catch" diyot da denir).

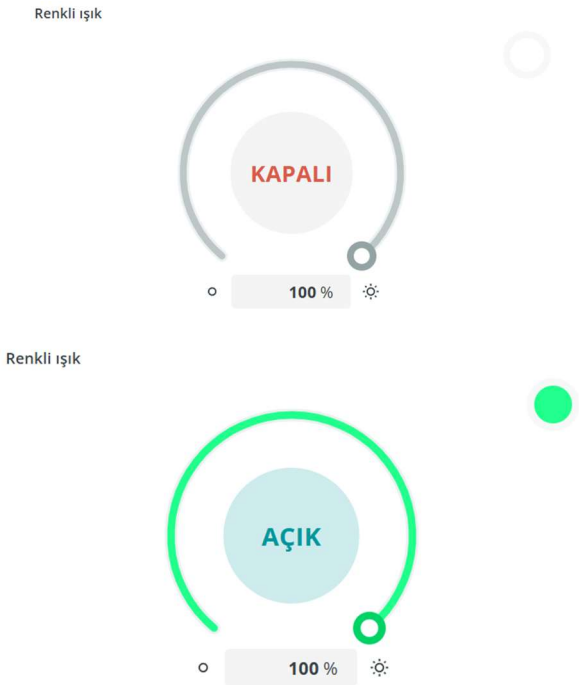
R6 ve R7 (Geri Besleme Dirençleri): Bu iki direnç, bir "gerilim bölücü" oluşturarak çıkış voltajını "ölçer". Çıkıştaki 3.3V'u bölerek IC1'in 5 numaralı 'COMP' (Karşılaştırıcı) pinine bir referans voltajı gönderirler.

Voltaj Nasıl Ayarlanıyor?

Vout = 1.25 * (1 + R7/R6)

1.25V, MC34063A entegresinin içindeki sabit bir referans voltajıdır. Entegre (IC1), 5 numaralı (COMP) pinine gelen voltajı sürekli 1.25V'ta tutmaya çalışır. Bunu yapmak için, R6 ve R7 tarafından bölünen çıkış voltajını izler. Hesaplama: Vout = 1.25 * (1 + 330Ω / 200Ω) = 1.25 * (1 + 1.65) = 1.25 * 2.65 = 3.3125V Gördüğünüz gibi, bu direnç değerleri çıkışı tam olarak 3.3V'a ayarlar.

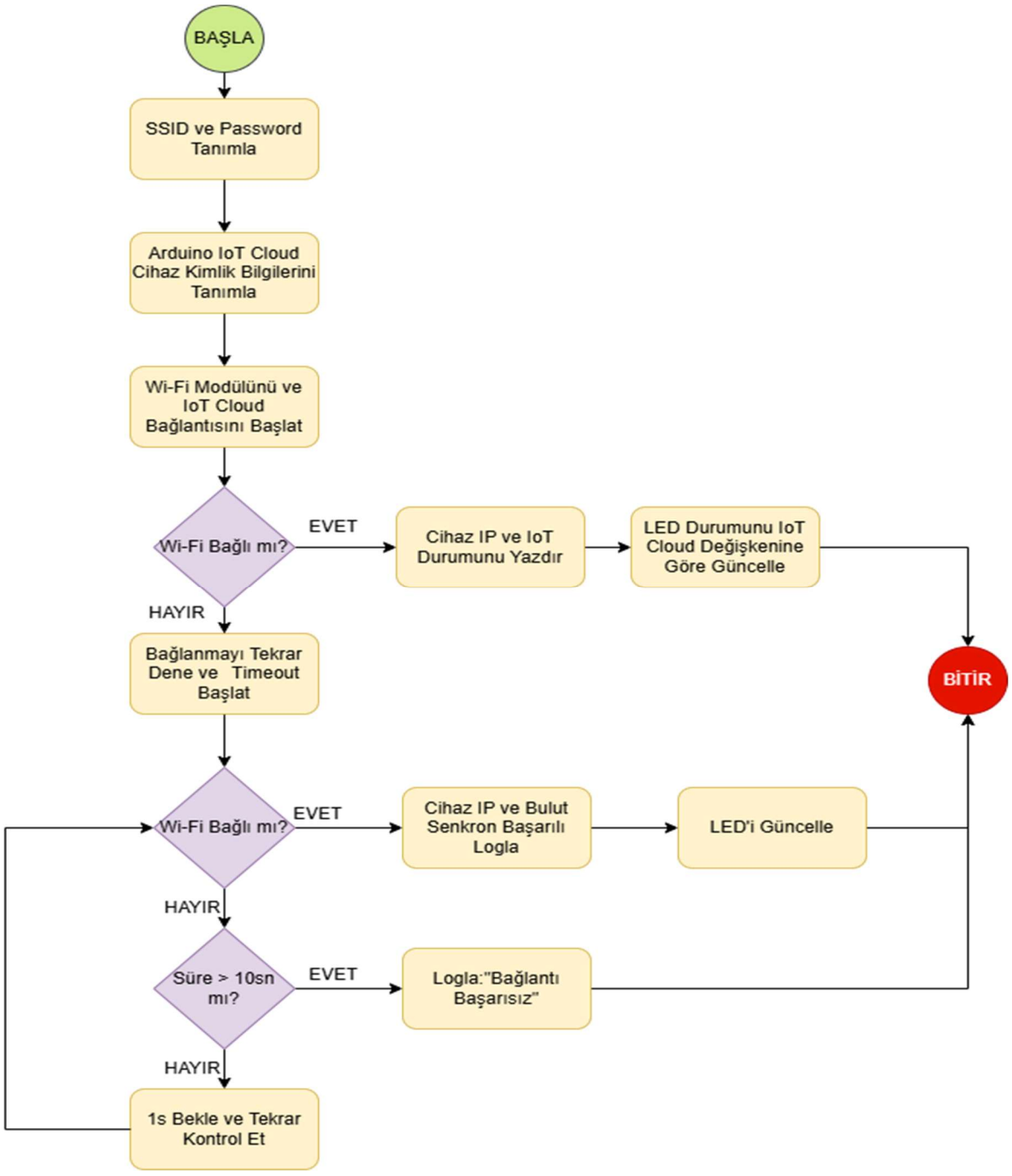
ARAYÜZ



Şekil 5. Arayüz

Şekil 5 , kullanıcının ışığın rengini ve parlaklığını serbestçe seçmesini sağlar. Kullanıcı, tekerlek üzerindeki herhangi bir noktaya dokunarak ya da sürükleyerek istediği rengi (kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi, mor vb.) anında ayarlayabilir. Merkezi kontrol işareti, seçilen rengi onaylar ve ışığa uygular.

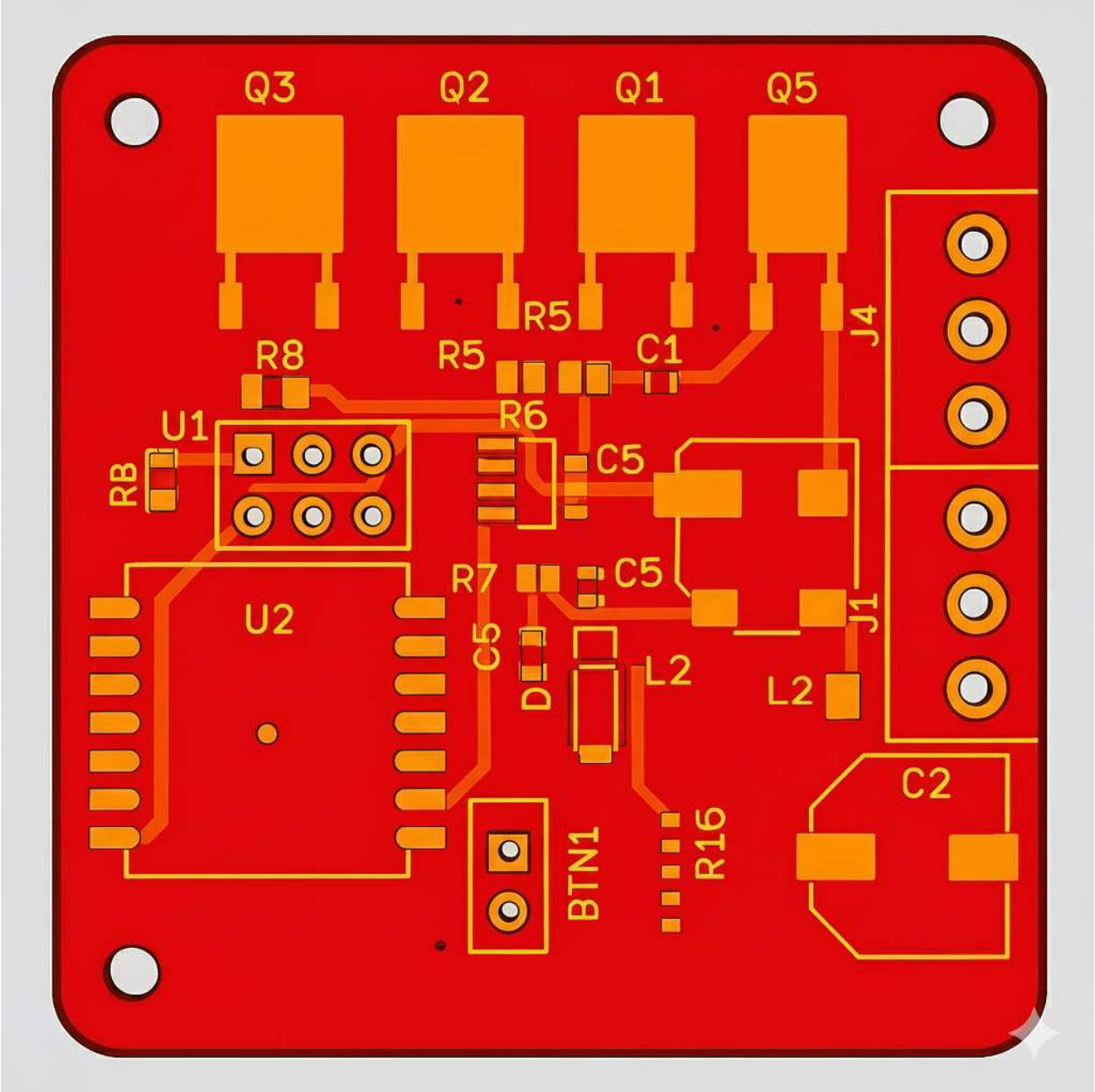
BAĞLANTI AKIŞ ŞEMASI



Şekil 6. Bağlantı Akış Şeması

Şekil 6'da, bir IoT cihazının Wi-Fi ağına ve Arduino IoT Cloud platformuna bağlanma sürecini gösterir. Süreç, SSID, Parola ve Cihaz Kimlik Bilgilerinin Tanımlanması ile başlar, ardından Wi-Fi Modülü ve Cloud Bağlantısı Başlatılır. İlk bağlantının başarılı olması durumunda cihaz IP ve durumu yazılır, LED ise Cloud değişkenine göre hemen güncellenerek akış sonlandırılır. Eğer ilk bağlantı başarısız olursa, bir Tekrar Deneme ve Timeout Mekanizması devreye girer. Bu döngüde, eğer 10 saniyeden kısa sürede Wi-Fi bağlantısı sağlanırsa bu başarı loglanır ve LED güncellenir; eğer 10 saniyelik süre aşılırsa "Bağlantı Başarısız" logu oluşturularak her iki durumda da akış sonlandırılır.

PCB GÖRÜNÜMÜ



Şekil 7. PCB Çizimi

Şekil 7'de, projenin bu aşaması için hazırlanan örnek PCB tasarımı gösterilmektedir. Bu, bileşen yerleşimini ve yolları gösteren bir ön taslaktır. Projenin ilerleyen optimizasyon ve geliştirme aşamalarında, daha iyi performans, üretilebilirlik veya maliyet verimliliği sağlamak amacıyla PCB görünümünde ve yerleşiminde değişiklikler olabilir.

MALIYET TABLOSU

Tablo 1. Maliyet Tablosu

COMPONENTLER	ADET	FİYAT
Kapasitör(fFarklı Değerlerde)	5	35-40
MC34063 DIP-8 DC - DC Çevirici Entegre	1	16
Esp8266-12E 4Mbit Flash Seri Wifi Modül	1	120
Transistör (P25B6EB-5071)	4	40
SK14-13 Diyot	1	25
Reset buton	1	5
3 lü klamens	2	20
Bobin	1	20-30
Şerit led	1	250
TTL Dönüştürücü	1	100-200
Direnç	11	
		Toplam 750TL

KAYNAKLAR

IoT Smart Lighting • The Future of LED IoT Lighting

IoT için bağlantılı ve akıllı LED aydınlatma | Infineon Teknolojileri

Akıllı IoT Aydınlatma ve Sürdürülebilirlik - AGC Aydınlatma

Simple IoT Projects Ideas 2025 - IotCircuitHub

ESPHome - Akıllı Ev Basitleştirildi

Vikipedi: Özgür Ansiklopedi

https://claude.ai/

[1] https://circuitdigest.com

[2] https://esphome.io/

[3] https://iotcircuithub.com

[4] https://sinric.pro/

[5] https://instructables.com

[6] https://easyelectronicsproject.com

[7] https://iotcircuithub.com

[8] https://kno.wled.ge/

[9] https://instructables.com

[10] https://euristiq.com

[11] https://ltech.cn

[12] https://dusuniot.com

[13] https://infineon.com

[14] https://adayoled.com

[15] https://secretled.com

[16] https://sciencedirect.com

[17] https://agclighting.com

[18] https://docs.arduino.cc/

[19] https://www.makeuseof.com/tag/esp32-smart-home-lighting/

[20] https://www.hackster.io/

RÜZGAR TÜRBİNİ ENERJİ İZLEME KONTROL SİSTEMİ

Mehmet ERTUNÇ[1*], Tubanur ASLAN[2]

[1] Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, Türkiye*
[2] Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, Türkiye

[1](223302141@ogr.selcuk.edu.tr)*
[2](tubanuraslan016@gmail.com)*

Özet– Proje kapsamında, 230V DC çıkışlı bir motor jeneratör olarak kullanılarak rüzgarın mekanik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Elde edilen enerji, tasarlanan şarj regülatörü devresi aracılığıyla 12V 9Ah bir aküye güvenli biçimde aktarılmaktadır. Şarj regülatörü, akünün aşırı şarj veya deşarj durumlarını önleyerek sistemin ömrünü uzatmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Aküden alınan enerji, LM2596 ayarlanabilir DC/DC voltaj regülatörü üzerinden düşürülerek STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisine uygun çalışma gerilimine dönüştürülmüştür. Bu sayede sistemin kararlı ve güvenilir biçimde çalışması sağlanmıştır. STM32 mikrodenetleyicisi, sistemin tüm ölçüm ve kontrol görevlerini üstlenmektedir. Rüzgar türbininin dönüş hızı, mil üzerine yerleştirilen US1881 Hall Effect sensörü aracılığıyla ölçülerek anlık RPM (devir sayısı) bilgisi elde edilmiştir. Üretilen elektriğin akımı ACS712 akım sensörü ile, gerilimi ise tasarlanan gerilim bölücü devre üzerinden ölçülmüştür. Tüm bu veriler STM32 tarafından işlenmekte ve 0.96” I2C OLED ekran üzerinden kullanıcıya anlık olarak gösterilmektedir. Böylece sistemin çalışma durumu, üretilen enerji miktarı ve türbin performansı gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler– Rüzgâr Türbini; Enerji İzleme Sistemi; LM317; Pre-Regülatör; STM32; Hall Sensörü; DC Motor Jeneratör; Akü Şarjı

GİRİŞ

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre küresel elektrik tüketiminin giderek artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payını kritik hâle getirmiştir. Özellikle dağıtık üretim sistemlerinde küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin kullanımının arttığı ve düşük maliyetli enerji depolama çözümleriyle desteklenen mikro ölçekli rüzgâr sistemlerinin yaygınlaştığı raporlanmıştır [1]. Küçük rüzgâr türbinlerinin verimli çalışabilmesi, türbin çıkışındaki gerilim ve akımın doğru yönetilmesine, şarj regülatörlerinin kararlı çalışmasına ve enerji depolama birimleriyle uyumlu çalışmalıdır.

Rüzgâr türbinlerinin düşük güçlü uygulamalarda DC motorları jeneratör olarak kullanarak enerji üretmesi, maliyet açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak rüzgâr hızına bağlı olarak değişkenlik gösteren türbin çıkışının 30–230 V gibi geniş bir aralıkta değişmesi, hem batarya şarj devreleri hem de kontrol elektronikleri açısından gerilim kararlılığı problemini ortaya çıkarmaktadır. Literatürde küçük rüzgâr türbinlerinde gerilim kararlılığı ve şarj kontrol yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar, MPPT algoritmaları, anahtarlamalı DC-DC dönüştürücüler ve hibrit enerji depolama yapılarının sistem performansını belirleyen başlıca faktörler olduğunu göstermektedir [2–4]. Özellikle doğru akım tabanlı batarya şarj sistemlerinde pre-regülatör kullanımı, yüksek gerilim tepe değerlerinin regülatör elemanlarına zarar vermesini önlemek açısından kritik öneme sahiptir [5].

Küçük rüzgâr türbinleri ile akü şarj eden sistemlerde sabit akım, sabit voltaj (CC–CV) yöntemlerinin uygulanması, akü ömrünün korunması ve güvenli şarj akışının sağlanması açısından standart bir yaklaşımdır [6]. Fakat türbin kaynaklı gerilim dalgalanmaları nedeniyle klasik lineer regülatörlerin tek başına kullanılması yeterli olmamakta, bu nedenle pre-regülatör ve aktif kelepçe devreleri ile desteklenmiş yapılar tercih edilmektedir [7]. Literatürde, LM317 gibi ayarlanabilir doğrusal regülatörlerin düşük güçlü rüzgâr sistemlerinde uygun maliyetli çözümler sunduğu, ancak yüksek giriş gerilimlerinde aşırı ısınma ve kırılma riskinin bulunduğu belirtilmiştir [8].

Rüzgâr türbinli enerji üretim sistemlerinde elektriksel büyüklüklerin izlenmesi için mikrodenetleyici tabanlı ölçüm yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Hall etkili akım sensörleri ile temasız akım ölçümü, gerilim bölücülerle yüksek gerilimlerin ADC seviyesine düşürülerek okunması ve Hall etkili hız sensörleriyle rotor devrinin belirlenmesi

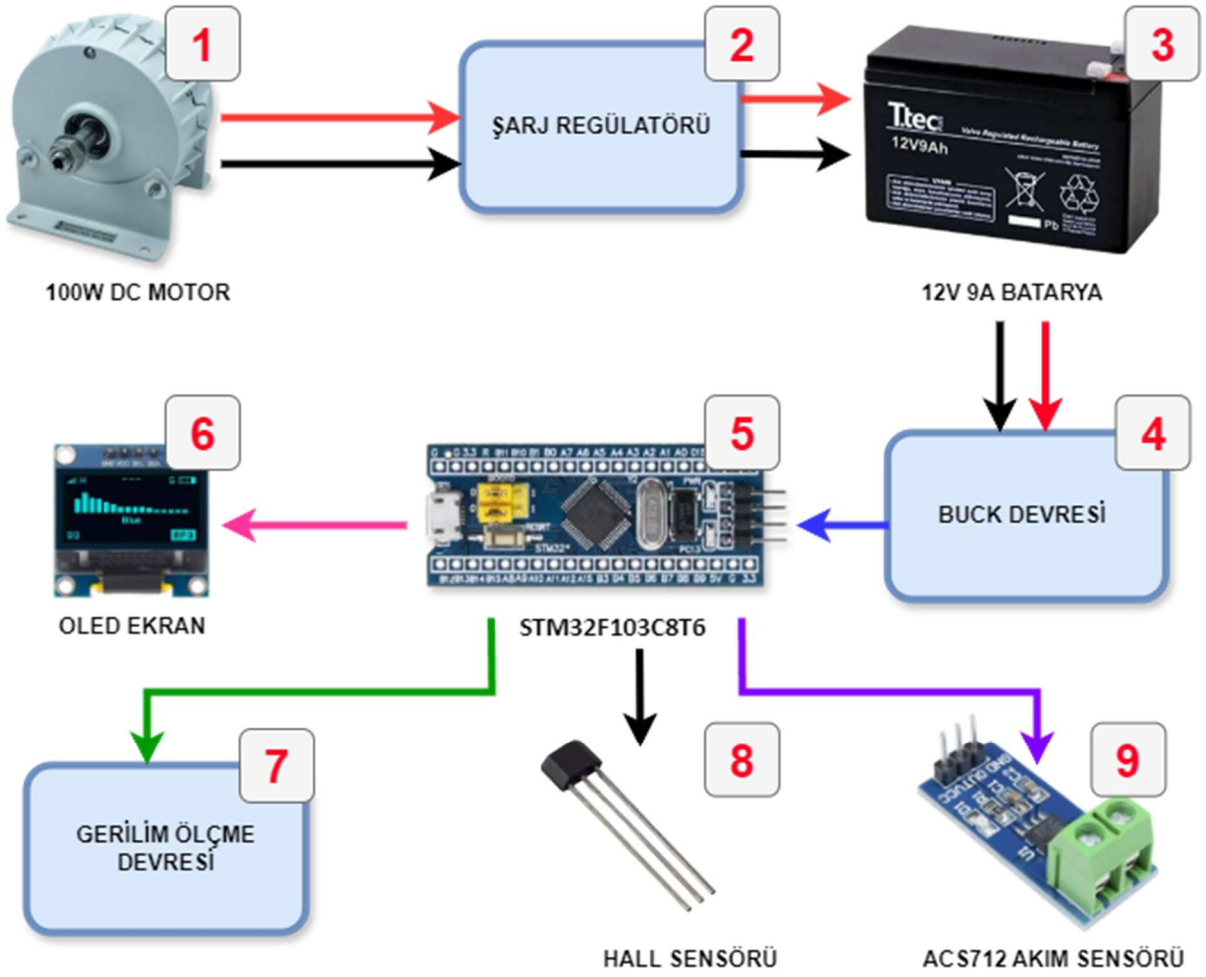
literatürde sıkça önerilen yöntemler arasındadır [9–11]. Ayrıca, STM32 tabanlı gerçek zamanlı izleme sistemlerinin küçük rüzgâr türbinlerinde hem maliyet hem doğruluk açısından etkili çözümler sunduğu gösterilmiştir [12].

Bu çalışma, rüzgâr türbininden elde edilen değişken DC gerilimin güvenli bir şekilde düzenlenmesi, akünün CC–CV prensibine uygun biçimde şarj edilmesi, akım, gerilim, RPM verilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve tüm bu işlemlerin düşük maliyetli, kompakt bir sistem üzerinde uygulanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen sistem; pre-regülatörlü LM317 şarj devresi, ACS712 akım sensörü, gerilim bölücü tabanlı gerilim ölçüm devresi, US1881 Hall sensörü ve STM32 mikrodenetleyici biriminden oluşmaktadır. Böylece literatürde rüzgâr enerjisi, batarya şarjı ve düşük güçlü gerçek zamanlı izleme konularında belirtilen performans gereksinimlerini karşılayan bütünleşik bir çözüm sunulmuştur.

MATERYALLER VE METOT

Küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin doğası gereği düzensiz, geniş aralıklı ve hızla değişken bir yapıya sahip olması, bu tür sistemlerin güvenli ve kararlı biçimde izlenmesini güçleştirmektedir. Rüzgâr hızındaki ani değişimler, türbin milinden alınan mekanik enerjinin DC motor çıkışında 30–230 V arasında değişen gerilimlere dönüşmesine neden olmakta; bu durum hem batarya şarj devreleri hem de mikrodenetleyici tabanlı ölçüm birimleri için risk oluşturmaktadır. Geleneksel şarj devreleri bu yüksek gerilim dalgalanmalarını tolere edemediğinden, lineer regülatörlerin aşırı ısınması, sensörlerin zarar görmesi ve ölçüm hataları bu tür sistemlerde sıkça karşılaşılan problemlerdir.

Bu nedenle çalışmada, değişken rüzgâr kaynaklı giriş enerjisinin önce güvenli seviyeye çekilmesi, ardından bataryanın kontrollü şekilde şarj edilmesi ve aynı zamanda sistemin bir mikrodenetleyici tarafından gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi için çok katmanlı bir güç elektroniği mimarisi geliştirilmiştir.



Şekil 1. Sistem blok diyagramı.

Şekil 1'deki blok diyagramında görüldüğü üzere, rüzgâr türbini tarafından döndürülen DC motor (1) alternatör görevi görerek değişken DC gerilim üretmektedir. Bu enerji, aşırı gerilim darbelerini sınırlayan şarj regülatörü (2) aracılığıyla düzenlendikten sonra 12 V'luk aküye (3) aktarılmaktadır. Aküden alınan gerilim ise sistemin elektronik birimlerini beslemek amacıyla buck tipi DC–DC dönüştürücü (4) ile 5 V seviyesine düşürülmektedir.

Kontrol yapısının merkezindeki STM32F103C8T6 mikrodenetleyici (5), ACS712 akım sensöründen aldığı akım verilerini, US1881 Hall sensöründen elde edilen rotor hızı bilgisini ve gerilim ölçüm devresinden gelen değerleri işleyerek sistemin elektriksel ve mekanik davranışını gerçek zamanlı olarak izlemektedir. İşlenen tüm ölçüm sonuçları, OLED ekran (6) üzerinden kullanıcıya anlık olarak aktarılmaktadır

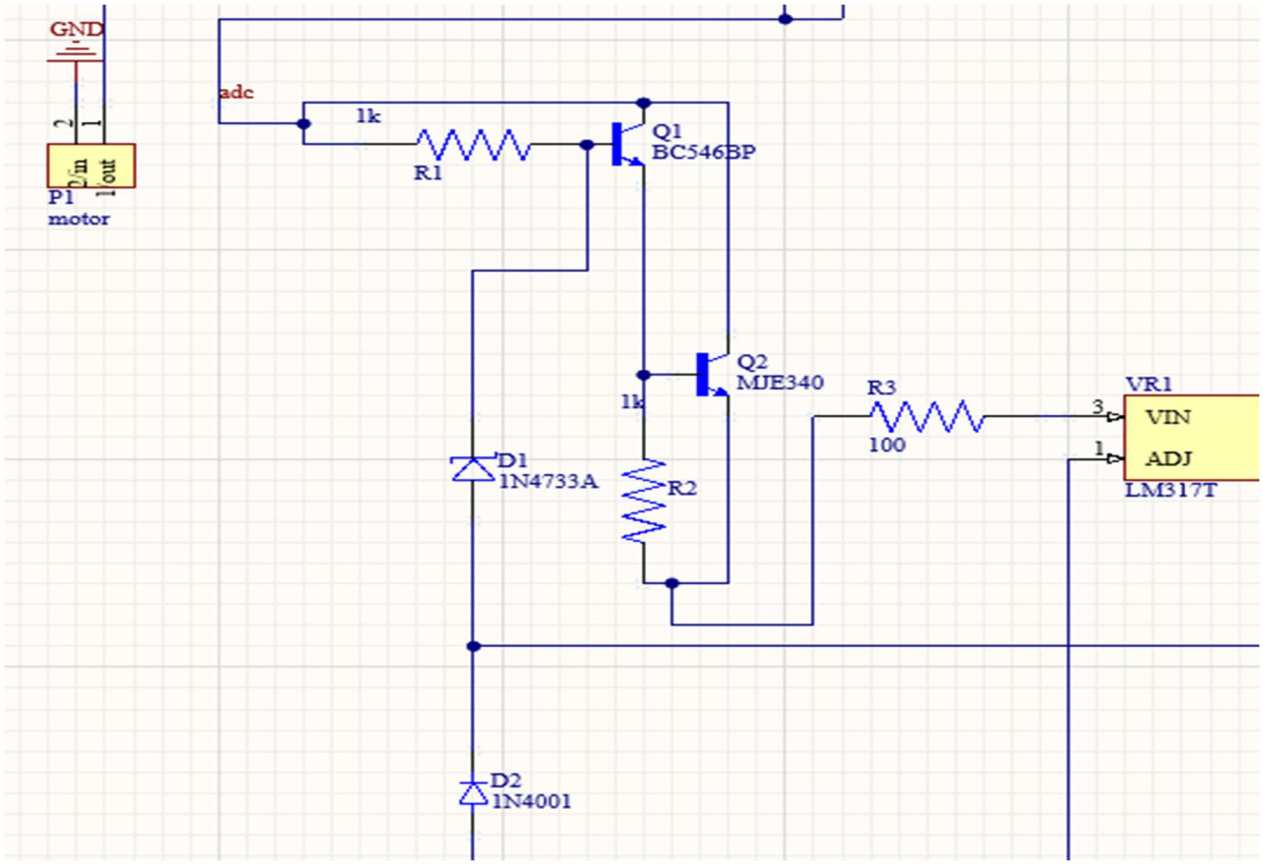
Elektronik Kontrol ve Enerji İşleme Sistemi

Sistemin enerji işleme yapısı, rüzgâr kaynaklı değişken DC gerilimi güvenli ve ölçülebilir bir elektriksel forma dönüştürmek için tasarlanmış üç temel katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar birbirini tamamlayarak hem batarya şarjını hem de ölçüm-karar mekanizmalarını tutarlı şekilde mümkün kılar.

Katman 1 – Giriş Koruma (Pre-Regülatör) Yapısı

Rüzgâr türbininin dönme hızına bağlı olarak 30–230 V arasında değişebilen geniş aralıklı DC gerilim üretmesi, sistemin karşılaştığı temel güçlüklerden biridir. Bu yüksek giriş seviyeleri, LM317 gibi lineer regülatörlerin dayanım sınırlarını aşarak aşırı ısınma ve devre hasarı riskine yol açabilmektedir. Bu problemi önlemek amacıyla girişte aktif bir koruma katmanı (pre-regülatör) tasarlanmıştır.

Şekil 2'de gösterilen bu yapı; 6.2 V zener diyotu, BC546 ve MJE340 transistörlerinden oluşan aktif kelepçe devresi ile direnç ağından meydana gelmektedir. Giriş gerilimi belirlenen eşik seviyesini aştığında kelepçe devresi iletime geçerek LM317'nin girişini sınırlandırmakta ve regülatörün güvenli çalışma bölgesinde kalmasını sağlamaktadır. Böylece hem LM317 hem de batarya hattı, rüzgâr kaynaklı ani gerilim yükselmelerine karşı korunmaktadır.

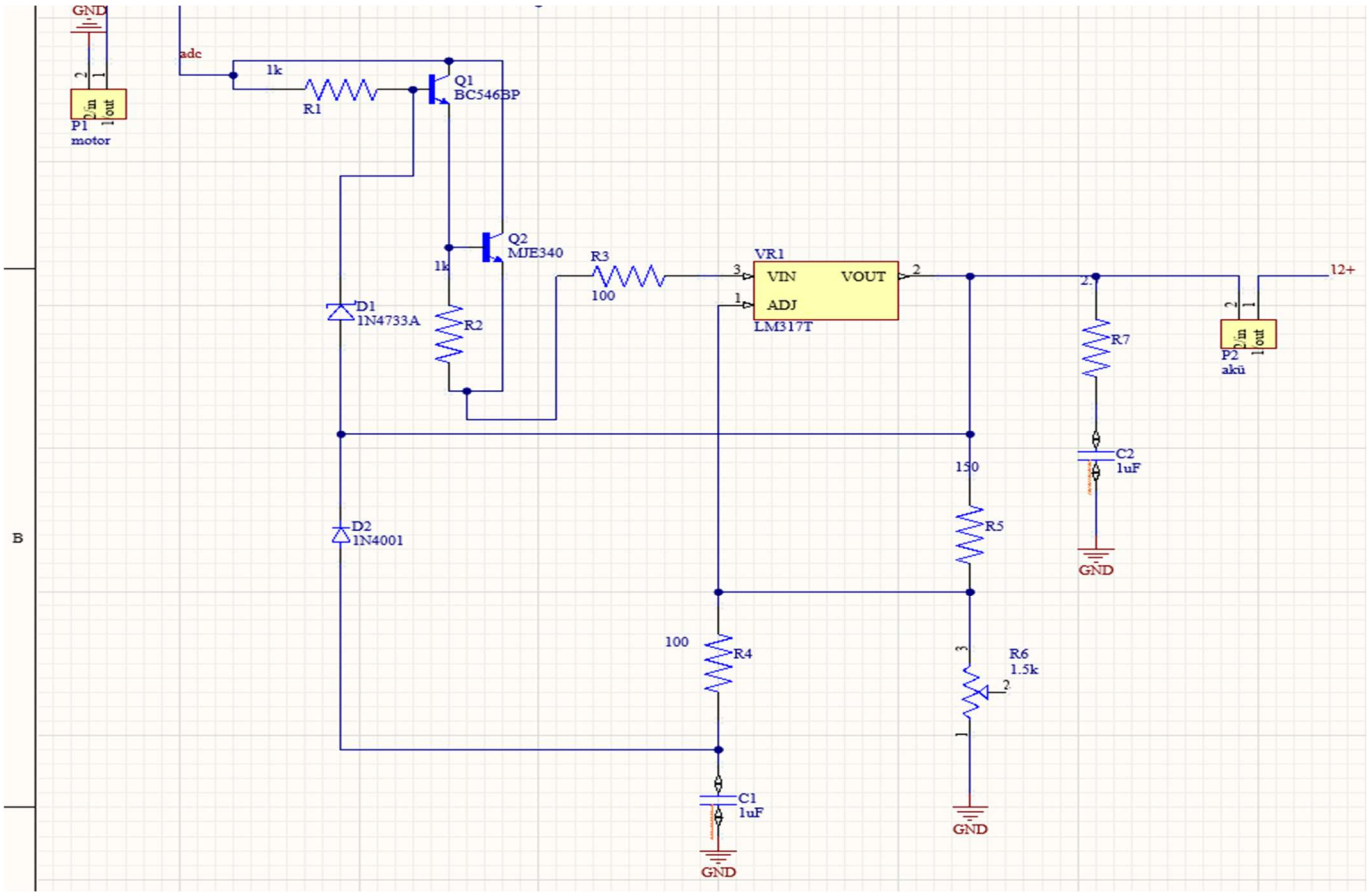


Şekil 2. Giriş Koruma (Pre-Regülatör) Yapısı.

Ayrıca pre-regülatör devresinde yer alan 1N4001 diyotu, sistem durduğunda aküden türbine doğru gerçekleşebilecek ters akım akışını engelleyerek ek bir güvenlik katmanı oluşturur. Bu yapı sayesinde motor çıkışındaki yüksek genlikli dalgalanmalar bastırılmış, böylece sistemin sonraki katmanlarının kararlı ve güvenilir şekilde çalışması için stabil bir giriş gerilimi elde edilmiştir.

Katman 2 – Analog CC–CV Şarj Katmanı (LM317)

İkinci katman, sistemde kullanılan 12 V kurşun-asit akünün güvenli biçimde şarj edilmesi amacıyla LM317 tabanlı sabit akım–sabit voltaj (CC–CV) yapısı üzerine tasarlanmıştır. LM317'nin OUT–ADJ uçları arasındaki 1.25 V'luk sabit referans gerilimi, direnç ağı aracılığıyla çıkış geriliminin 13.8–14.4 V aralığında ayarlanmasına olanak tanımakta ve batarya doldukça gerekli sabit voltaj (CV) karakteristiğini sağlamaktadır. Katmana ait devre şeması Şekil 3'de verilmiştir..

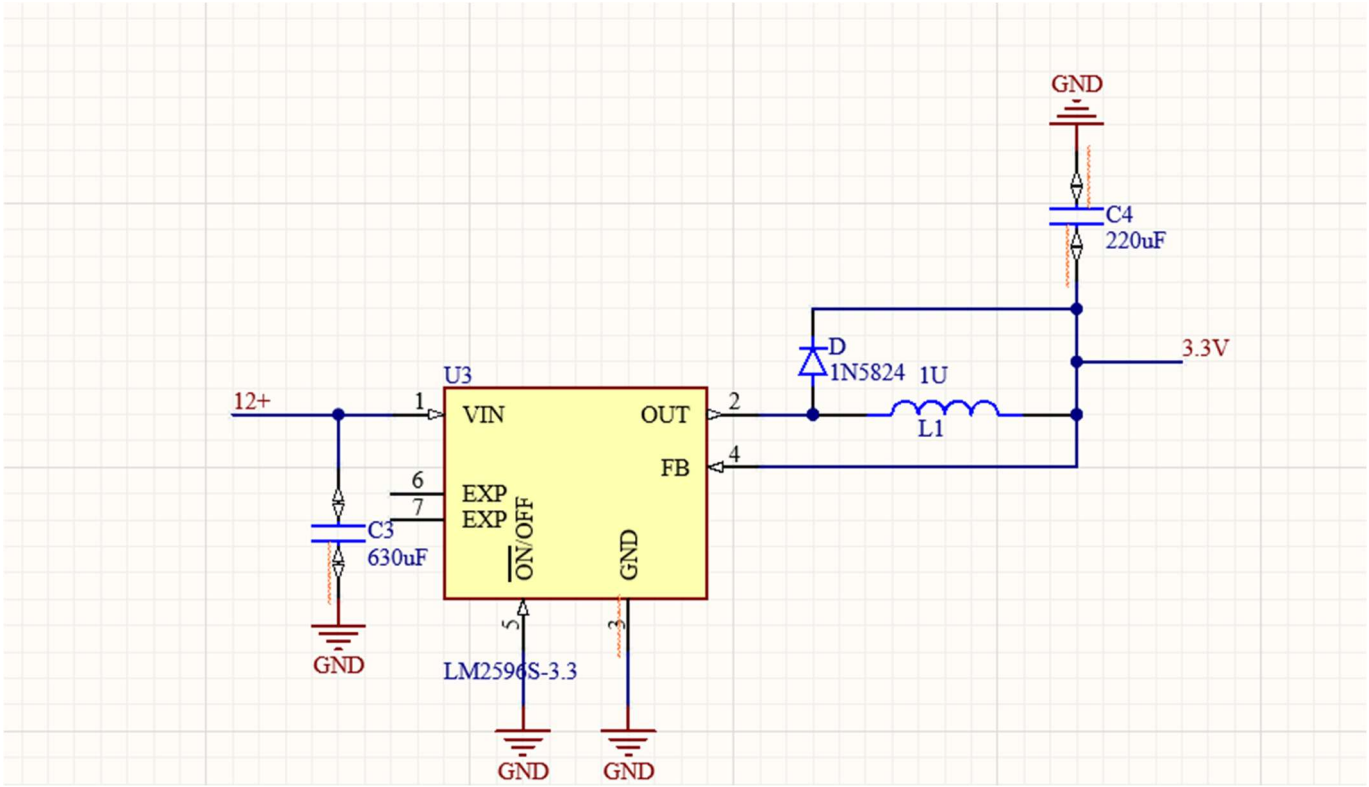


Şekil 3. LM317 tabanlı şarj regülatörü devresi.

Aşırı akım ise LM317 çıkışı ile batarya arasına yerleştirilen seri akım sınırlayıcı eleman tarafından kontrol edilmektedir. Batarya düşük gerilimdeyken akım yükselme eğiliminde olduğundan bu eleman akımın güvenli sınırlar içinde tutulmasını sağlar; batarya gerilimi arttıkça akım doğal olarak azalır ve sistem ek bir kontrol mekanizmasına gerek duymadan CC'den CV'ye yumuşak bir geçiş gerçekleştirir.
Proteus simülasyonları, LM317 katmanının geniş bir giriş gerilim aralığında kararlı çıkış sağladığını ve akım sınırlama yapısının beklenen şekilde çalıştığını göstermiştir. Bu doğrulama, katmanın batarya şarj sürecinde güvenli ve istikrarlı bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Katman 3 – LM2596S ile Kontrol Kartı ve Sensör Beslemesi

Üçüncü katman, kontrol kartı ve sensörlerin ihtiyaç duyduğu 3.3 V beslemeyi sağlayan LM2596S-3.3 tabanlı anahtarlamalı (buck) dönüştürücüden oluşmaktadır. Aküden gelen 12 V doğru gerilim, LM2596'nın yüksek verimli DC–DC düşürücü mimarisi sayesinde düşük kayıpla 3.3 V seviyesine indirilmiştir. Lineer regülatörlere kıyasla oldukça az ısı üreten bu yapı, özellikle STM32 mikrodenetleyici, OLED ekran ve düşük gerilimli sensörlerin kararlı ve güvenli biçimde çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Katmanın devre yapısı Şekil 4'de verilmiştir.



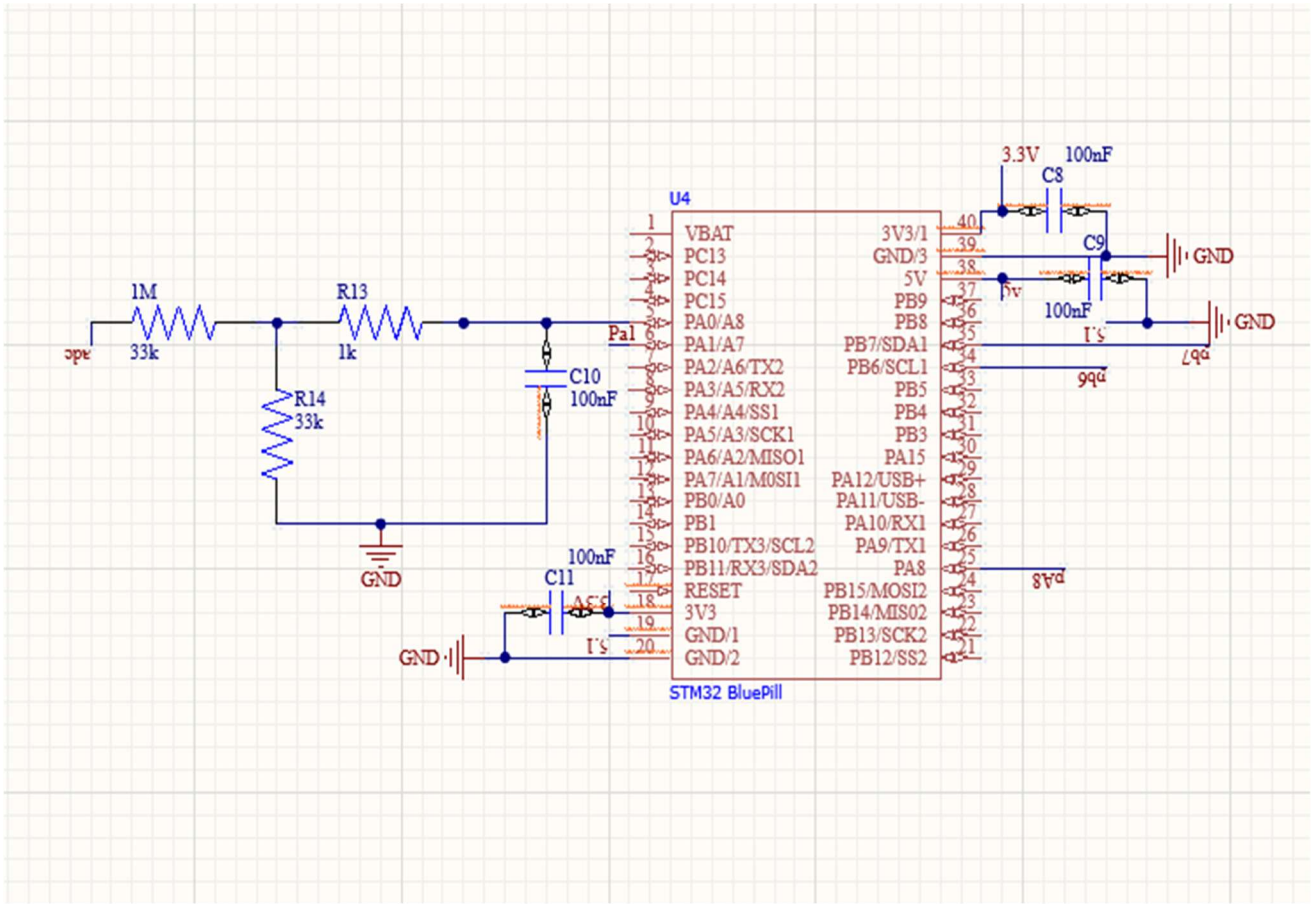
Şekil 4. LM2596 devre şeması.

Regülatörün giriş hattına bağlanan 630 µF'lik C3 kondansatörü, akü gerilimindeki ani değişimleri filtreleyerek LM2596'nın daha kararlı çalışmasını sağlamaktadır. Çıkış tarafında ise 1 µH'lik L1 indüktörü ile 1N5824 Schottky diyot anahtarlamalı filtre katını oluşturmaktadır. L1, anahtarlama sürecinde akımın sürekliliğini korurken; hızlı toparlanma özellikli 1N5824 diyotu ters akımı engelleyerek enerji kaybını azaltır. Çıkış hattındaki 220 µF'lik C4 kondansatörü, yüksek frekanslı gürültüyü bastırarak 3.3 V hattının kararlılığını artırır.

Entegrenin geri besleme (FB) hattı, LM2596S-3.3'ün fabrika ayarlı geri besleme mekanizması ile çıkış geriliminin hassas biçimde 3.3 V seviyesinde sabit tutulmasını sağlamaktadır. Böylece mikrodenetleyici ve sensörler, akü gerilimindeki dalgalanmalardan etkilenmeden güvenilir biçimde çalışabilmektedir.

Mikrodenetleyici ve Sensör Tabanlı Ölçüm Yapısı

Sistemin ölçüm ve veri işleme altyapısı, düşük güç tüketimi, yüksek ADC çözünürlüğü ve geniş çevresel birim desteği nedeniyle tercih edilen STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi üzerine kurulmuştur. Mikrodenetleyici; ADC modülü, kesme (interrupt) yapısı ve I²C haberleşme birimlerini kullanarak akım, gerilim ve rotor hızı gibi temel parametreleri gerçek zamanlı olarak toplamaktadır. Sistemin tüm sensör bağlantıları ve besleme hatları Şekil 5'de verilen STM32 bağlantı şemasında gösterilmiştir.

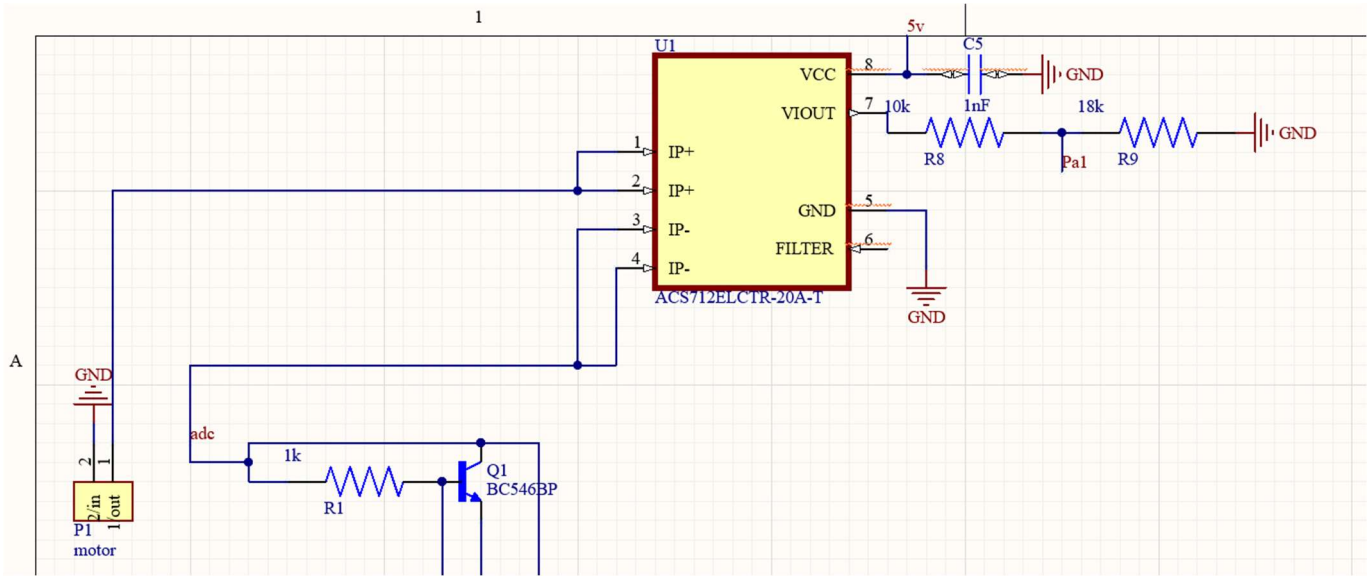


Şekil 5. STM32F103C8T6 tabanlı ölçüm kartının sensör bağlantı şeması.

Şema, gerilim ölçümü için kullanılan gerilim bölücü devresinin ADC pinine bağlantısını, ACS712 akım sensörünün analog çıkışının mikrodenetleyiciye girişini ve US1881 Hall sensörünün kesme hattına bağlanmasını göstermektedir. Ayrıca kartın 3.3 V ve 5 V besleme hatları, decoupling kondansatörleri ve temel topraklama yapısı da şemada yer almaktadır. Bu bağlantı düzeni, sensörlerin kararlı çalışması ve mikrodenetleyicinin doğru örnekleme yapabilmesi için gerekli olan altyapıyı sağlamaktadır.

ACS712 Akım Sensörü

Sistemde akım ölçümü, Hall etkisi prensibiyle çalışan ACS712ELCTR-20A akım sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Hall yapısı sayesinde sensör, iletim hattıyla doğrudan temas etmeden akımı ölçebilmekte, böylece hem kullanıcı güvenliği hem de galvanik izolasyon sağlanmaktadır. Bu özellik, rüzgâr türbini gibi akımın ani değişim gösterdiği sistemlerde ölçüm doğruluğunu artırmaktadır. Şekil 6'da devre bağlantıları verilmiştir.



Şekil 6. ACS712ELCTR-20A akım sensörü bağlantı şeması.

Sensörün IP+ ve IP− uçları jeneratör çıkış hattına seri bağlanmış olup, iletim hattından geçen akımın oluşturduğu manyetik alan sensör içinde ölçülerek akıma orantılı analog bir VIOUT sinyali üretilmektedir. Bu sinyal mikrodenetleyiciye aktarılmadan önce, R8 ve R9 dirençleri ile uygun seviyeye getirilmekte ve C5 kondansatörü ile yüksek frekanslı gürültüler bastırılmaktadır.

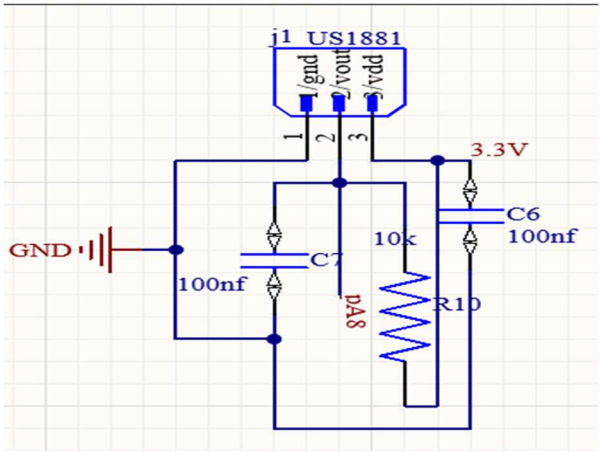
Besleme hattı VCC pini üzerinden 5 V ile sağlanırken, GND pini sistem toprağına bağlanmıştır. Sensörün ±20 A ölçüm aralığı, türbin tarafından üretilen akımın yönü ve büyüklüğünün gerçek zamanlı izlenmesine imkân tanımış; böylece batarya şarj durumu ve yük davranışı mikrodenetleyici tarafından güvenilir biçimde değerlendirilmiştir.

US1881 Hall Etkili Sensörü

Rüzgâr türbininin dönme hızını gerçek zamanlı izlemek amacıyla sistemde US1881 Hall etkili sensörü kullanılmıştır. Manyetik alan değişimlerini algılayan bu sensör, türbin miline yerleştirilen mıknatıs her dönüş yaptığında çıkışında bir dijital darbe üretmektedir. Üretilen darbeler STM32F103C8T6 mikrodenetleyici tarafından kesme (interrupt) yöntemiyle sayılarak rotorun devir hızı (RPM) yüksek doğrulukla hesaplanmaktadır. Temassız algılama prensibi, sensörün mekanik aşınmaya karşı dayanıklı ve dış ortam koşullarına uygun olmasını sağlamaktadır.Sensörün devre bağlantıları Şekil 7'de verilmiştir.

US1881'in 1 numaralı pini toprak, 3 numaralı pini 3.3 V besleme hattına bağlanmıştır. Manyetik alan değişimine göre darbe üreten 2 numaralı çıkış pini ise mikrodenetleyicinin PA8 kesme girişine aktarılmıştır. Çıkış hattına eklenen 10 kΩ değerindeki pull-up direnci, sensörün açık-kollektör yapısını destekleyerek lojik seviyelerin kararlı biçimde okunmasını sağlamaktadır. Sensör besleme ve çıkış hatlarına yerleştirilen 100 nF'lık kondansatörler (C6, C7), yüksek frekanslı parazitleri filtreleyerek ölçüm doğruluğunu artırmaktadır.

Bu yapı ile türbinin dönüş hızı dış ortam koşullarında dahi güvenilir şekilde algılanmakta; elde edilen RPM verisi mikrodenetleyici tarafından işlenerek izleme arayüzüne gerçek zamanlı olarak sunulmaktadır.



Şekil 7. US1881 Hall Etkili Sensörü Bağlantı Şeması.

Gerilim Ölçme Devresi (ADC Uyumlu Gerilim Bölücü)

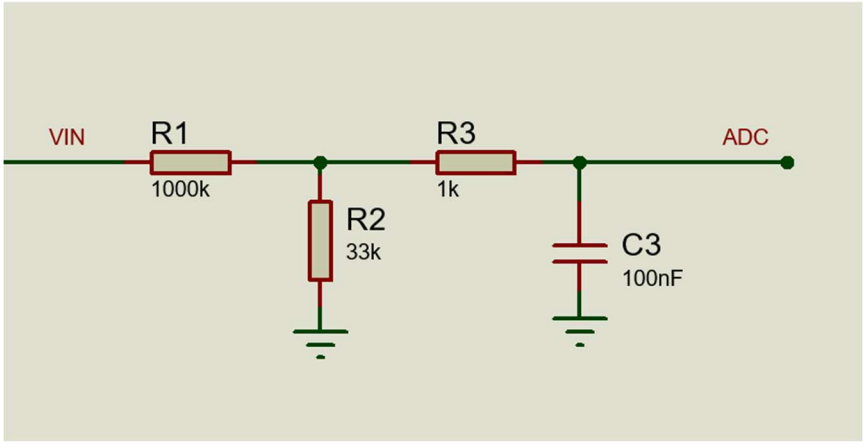
Rüzgâr türbini çıkışındaki gerilim çalışma koşullarına bağlı olarak yüksek değerlere ulaşabildiğinden, bu sinyalin mikrodenetleyicinin ADC girişine doğrudan uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle gerilim, Şekil 2.X.X'te gösterilen gerilim bölücü ve RC filtre yapısı ile güvenli ölçüm seviyesine indirgenmiştir. Şekil 8'de gerilim bölücü devresi verilmiştir.

Gerilim bölücü, seri bağlı 1 MΩ (R1) ve 33 kΩ (R2) dirençlerinden oluşur. Bu yapı, giriş gerilimini yaklaşık %3,19 oranına düşürerek STM32F103C8T6'nın 0–3.3 V ADC aralığına uygun hâle getirir:

$$V_{out}=V_{in}\times 0.00319$$

Bölücü çıkışından ADC girişine eklenen 1 kΩ seri direnç (R3), giriş darbelere karşı koruma sağlar. 100 nF kondansatör (C3) ise bu noktanın ADC için temiz ve kararlı olmasını sağlayan bir RC filtresi oluşturur. Filtrenin kesim frekansı yaklaşık 1.6 kHz'tir ve yüksek frekanslı gürültüleri etkili şekilde bastırır.

Bu yapı sayesinde türbin çıkışındaki değişken ve gürültülü gerilim, hem güvenli seviyeye düşürülmüş hem de filtrelenerek mikrodenetleyicinin ADC modülüne kararlı bir analog sinyal hâlinde aktarılmıştır. Böylece sistemin gerilim ölçümleri, performans analizinde yüksek doğrulukla kullanılabilmektedir.



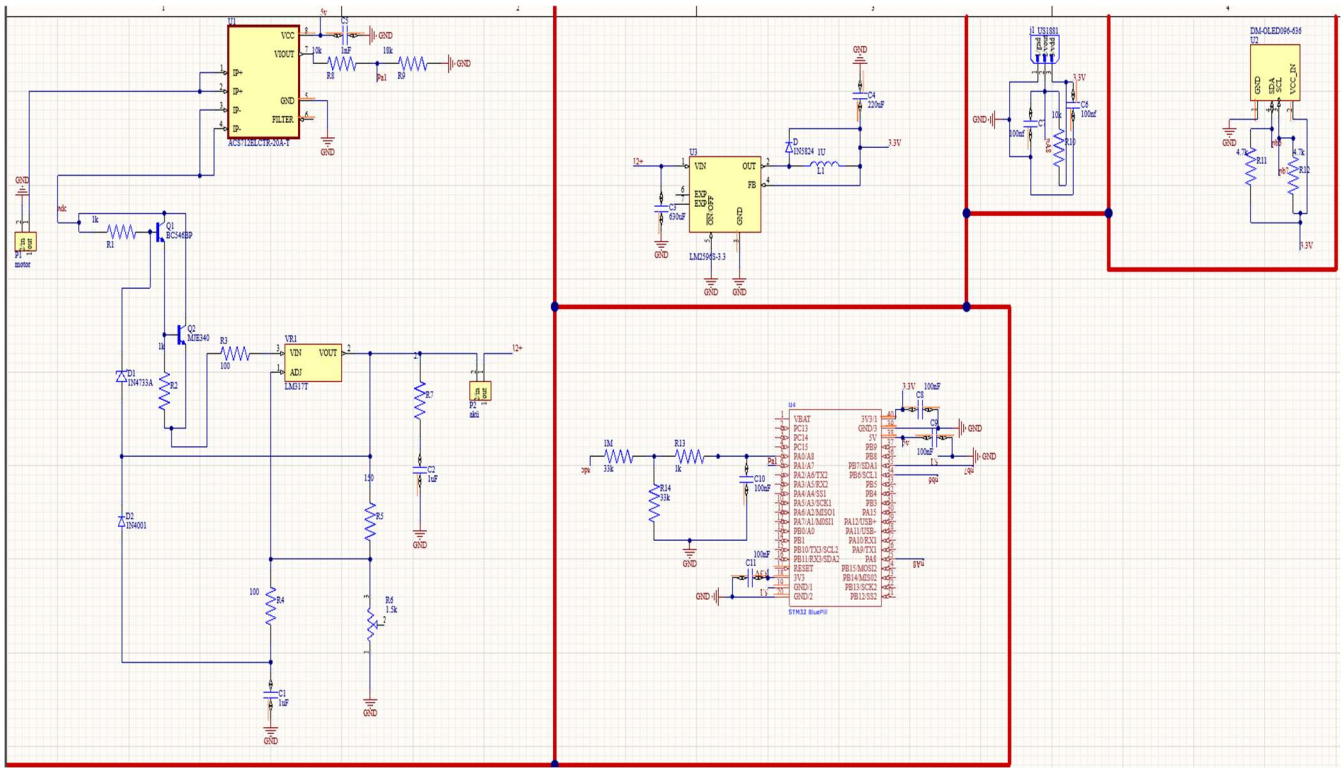
Şekil 8. Gerilim Bölücü.

Baskı Devre Kartı (PCB) Tasarımı ve Donanım Bütünlüğü

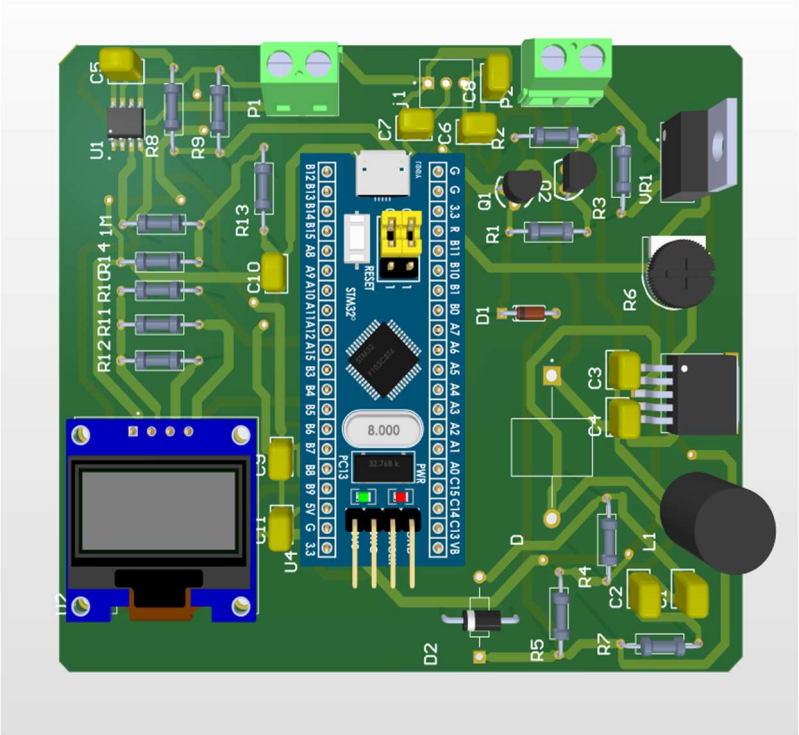
Geliştirilen güç elektroniği mimarisinin tüm katmanları (pre-regülatör, LM317 tabanlı şarj katmanı, LM2596S güç dönüştürücüsü, sensör arabirimleri ve mikrodenetleyici birimi) tek bir baskı devre kartı (PCB) üzerinde birleştirilmiştir. Kart tasarımı, yüksek akım yolları, ADC ölçüm hatları, topraklama düzeni ve ısıl dağılım dikkate alınarak hazırlanmış; böylece hem güç katlarının güvenli çalışması hem de ölçüm devrelerinin gürültüden minimum etkilenmesi sağlanmıştır.

PCB'ye ait genel devre şeması, yerleşim görünümü ve 3D kart modeli sırasıyla Şekil 9–10-11'de verilmiştir.

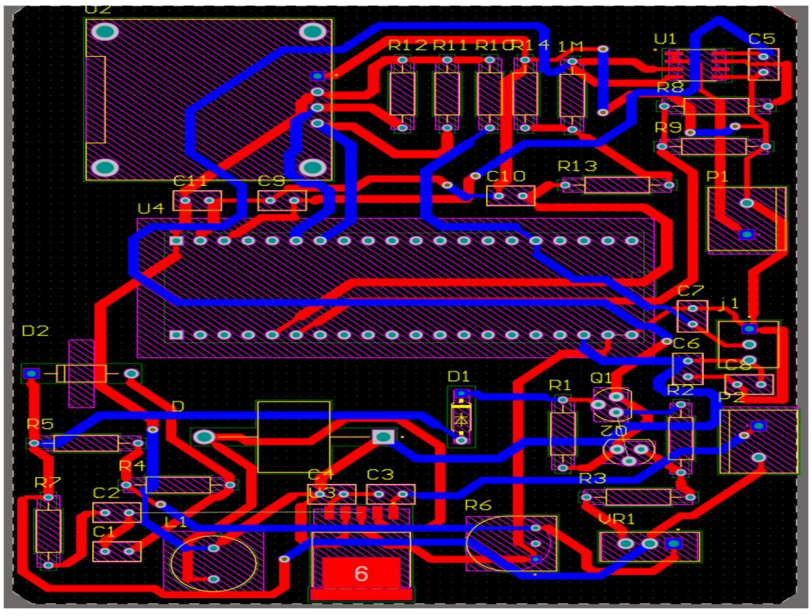
Bu kart, rüzgâr türbini tabanlı enerji üretim sisteminin hem güç işleme hem de veri toplama görevlerini tek bir kompakt donanım üzerinde toplayarak, sistemin laboratuvar ve saha uygulamalarına uygun biçimde kullanılmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 9. Sisteme ait bütünleşik devre şeması.



Şekil 10. PCB yerleşim (top-layer / bottom-layer) görünümü.



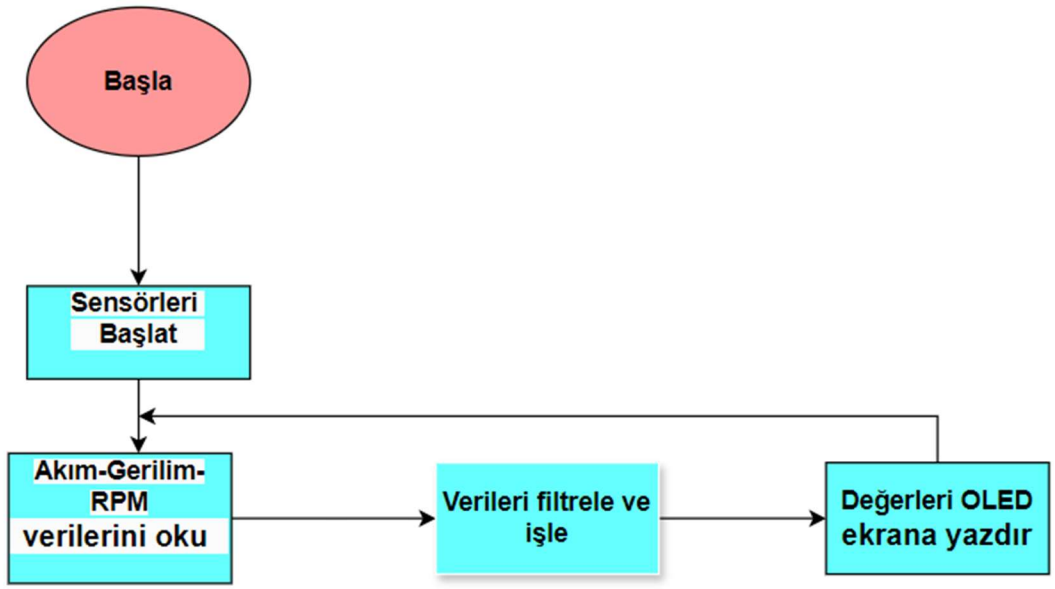
Şekil 11. PCB'nin 3D montaj modeli.

Sistem Çalışma Algoritması

Rüzgâr türbininden elde edilen akım, gerilim ve rotor hızı bilgilerinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesi ve OLED ekranda görüntülenmesi amacıyla geliştirilen sistemin çalışma süreci, Şekil 12'de verilen algoritma üzerinden açıklanmaktadır.

Sistem, STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisinin başlatılmasıyla çalışmaya başlamakta; bu aşamada sistem saat ayarı yapılmakta, ADC ve I²C modülleri etkinleştirilmekte ve OLED ekran görüntüleme için hazır hâle

getirilmektedir. Başlatma işlemlerinin ardından sistem, sürekli ölçüm döngüsüne geçerek sensörlerden akım, gerilim ve RPM verilerini toplamaktadır. ACS712 akım sensörü jeneratör çıkışındaki akımı Hall etkisine dayalı bir analog sinyale dönüştürmekte; gerilim ölçümü için kullanılan gerilim bölücü devresi türbinin yüksek çıkış gerilimini ADC aralığına düşürmekte; US1881 Hall sensörü ise türbin miline yerleştirilen mıknatısın her geçişinde ürettiği dijital darbeler aracılığıyla rotor hızını belirlemektedir. Mikrodenetleyici tarafından okunan akım ve gerilim değerleri, ölçümdeki ani dalgalanmaların etkisini azaltmak amacıyla yazılımsal filtreleme (ör. hareketli ortalama) işleminden geçirilmekte; filtrelenen akım, gerilim ve RPM değerleri I²C tabanlı OLED ekranda periyodik olarak güncellenmektedir. Sistem, başlatma aşamasından itibaren sensör okuma, veri filtreleme ve sonuçları ekrana yazdırma döngüsünü kesintisiz olarak tekrar eder. Herhangi bir kontrol, yük anahtarlama veya geri besleme mekanizması içermeyen bu yapı, rüzgâr türbininin performansının düşük güç tüketimiyle gerçek zamanlı ve güvenilir biçimde izlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 12. Sistem Çalışma Algoritması.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma, küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinden elde edilen değişken elektriksel çıktının güvenli ve kararlı bir şekilde düzenlenmesi, ölçülmesi ve izlenmesi sırasında karşılaşılan temel sorunlara düşük maliyetli ve kompakt bir çözüm sunmaktadır. Literatürde yer alan birçok rüzgâr türbini kontrol yaklaşımı, MPPT tabanlı güç elektroniği devrelerine ve karmaşık kontrol algoritmalarına dayanmaktadır. Ancak küçük güçlü sistemlerde türbin çıkışındaki yüksek gerilim dalgalanmaları, bataryanın güvenli şarjı ve mikrodenetleyici tabanlı ölçüm doğruluğu için bu yapıların maliyet ve karmaşıklık açısından yetersiz veya gereksiz olabileceği görülmektedir. Bu nedenle, çalışmada hem türbin çıkış gerilimini stabilize eden hem de akü şarjını CC–CV prensibine uygun şekilde gerçekleştiren sade, ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm geliştirilmiştir.

Deneysel sistemde DC motor alternatör olarak kullanılarak rüzgâr türbininin mekanik gücü elektrik enerjisine dönüştürülmüş; bu enerji doğrudan şarj regülatörüne aktarılmıştır. Türbinin dönme hızına bağlı olarak 30–230 V arasında değişen gerilim değeri, deney sürecinde özellikle rüzgârın ani artışlarında LM317 lineer regülatörün giriş sınırlarını aşabilecek seviyelere ulaşmıştır. Bu durum, lineer regülatörlerde aşırı ısınma, iç yapıda kırılma ve kontrolsüz akım geçişi gibi istenmeyen sonuçlara yol açmaktadır. Benzer şekilde literatürde de düşük güçlü sistemlerde yüksek gerilim tepe değerlerinin regülatör yapılarının verimini düşürdüğü ve güvenli çalışma sınırlarını

zorladığı ifade edilmektedir. Bu nedenle sistemde LM317'nin girişine yerleştirilen aktif kelepçe yapısına sahip pre-regülatör devresi, yüksek gerilim darbelerini sınırlayarak hem regülatörü hem de aküyü güvence altına almıştır.

Alternatif çözümler arasında anahtarlamalı DC-DC dönüştürücüler bulunsa da, düşük güçlü rüzgâr türbinlerinde türbin hızına bağlı olarak giriş geriliminin aşırı geniş aralıkta değişmesi bu yapılarda kararlılık problemlerine neden olabilmektedir. Ayrıca bu dönüştürücülerin yüksek maliyeti ve EMI kaynaklı gürültü sorunları, özellikle mikrodenetleyici tabanlı hassas ölçüm sistemlerinde ek filtreleme ihtiyacı doğurmaktadır. Bu nedenle çalışmada seçilen LM317 + pre-regülatör kombinasyonu, düşük maliyetli ve kararlı bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar, regülatör çıkışının 14.4 V seviyesinde sabit kaldığını ve akünün güvenli bir şekilde şarj edildiğini göstermektedir.

Sistem performansının değerlendirilmesinde, akım ve gerilim ölçümlerinin doğruluğu kritik bir parametre olmuştur. ACS712 akım sensörünün Hall etkili yapısı sayesinde türbin çıkış akımı temassız şekilde ölçülmüş, bu da hem elektriksel güvenliği hem de ölçüm doğruluğunu artırmıştır. Gerilim ölçüm devresinde kullanılan yüksek oranlı direnç bölücü sayesinde STM32 mikrodenetleyicinin ADC girişine 0–3.3 V aralığında güvenilir bir ölçüm sinyali aktarılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında yüksek giriş gerilimlerinde ADC okuma kararlılığının korunduğu, RC filtre yapısı sayesinde gürültünün büyük oranda bastırıldığı gözlemlenmiştir.

Rüzgâr türbininin mekanik performansı, rotor miline yerleştirilen mıknatıs ve US1881 Hall Effect sensörü ile ölçülen RPM değerleri üzerinden incelenmiştir. Sensörün dijital çıkışının kesme tabanlı okuma yöntemi ile işlenmesi, türbinin düşük hızlardan yüksek hızlara kadar geniş bir aralıkta hassas RPM ölçümü yapmasına imkân sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, rüzgâr hızındaki değişimlerin sistem tarafından anlık olarak algılandığını ve OLED ekranda gecikme olmadan görüntülendiğini göstermektedir.

Sistem genelinde yapılan testlerde, şarj devresi, akım–gerilim ölçüm devreleri ve RPM ölçüm yapısının birlikte kararlı çalıştığı doğrulanmıştır. Pre-regülatör sayesinde LM317'nin aşırı ısınması engellenmiş, akünün tam şarj değerine ulaştığı koşullarda CV bölgesine geçiş doğru bir şekilde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ekran üzerinden alınan verilerin, ölçüm devresi tasarımının doğruluğunu gösterir şekilde kararlı olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, rüzgâr türbinlerinden elde edilen değişken enerjiyi hem güvenli hem de izlenebilir hâle getiren entegre bir izleme–kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistem düşük maliyetli, kurulumu kolay ve küçük güçlü rüzgâr türbinleri için uygulanabilir niteliktedir. Özellikle eğitim ve laboratuvar ortamlarında rüzgâr türbini performansının analiz edilmesi, batarya şarj süreçlerinin incelenmesi ve sensör tabanlı ölçüm tekniklerinin uygulanması açısından pratik ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Elde edilen sonuçların, küçük ölçekli yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımında ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesinde gelecekte yapılacak çalışmalara rehberlik edeceği düşünülmektedir.

REFERENCES

[1] A. Watil et al., "Multimode control and battery charging in standalone wind energy systems," 2022.
[2] Y. Li et al., "Design of an intelligent charger for small wind systems," 2012.
[3] J. M. Lujano-Rojas et al., "Performance of charge controllers in small wind–battery systems," 2012.
[4] Z. Qi et al., "Integrated MPPT and speed control for small wind turbines," 2012.
[5] M. Barzegar-Kalashani et al., "High-wind control strategies for small-scale turbines," 2023.
[6] S. Dunnett, "100W wind-driven battery charger design," 2000.
[7] G. Watson, "Low-cost battery charging from micro wind systems," 1999.
[8] LM317 Datasheet, STMicroelectronics.
[9] ACS712 Datasheet, Allegro Microsystems.
[10] C. I. Martínez-Márquez et al., "Small wind turbine emulator with battery charger," MDPI Energies, 2019.
[11] J. W. Park et al., "Feasibility of micro-wind battery charging systems," 2012.
[12] J. Clavijo-Camacho et al., "STM32-based real-time monitoring for small PMSG wind systems," 2025.

UZAKTAN KONUM KONTROLLÜ LİNEER AKTÜATÖR SİSTEMİ

Mehmet Baykan Aktaş[1], Talha Doruk[2], Hakan Ateş[3]

Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya

Özet – Bu çalışmada, lineer aktüatörlerin modern IoT teknolojileri ile entegre edilerek uzaktan kontrol edilebilir bir otomasyon sistemi geliştirilmiştir. Lineer aktüatörler, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren ve endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan mekanik-elektronik sistem bileşenleridir. Geliştirilen sistemde, ESP32 mikrodenetleyici kullanılarak Wi-Fi tabanlı web sunucusu oluşturulmuş ve kullanıcıya gerçek zamanlı konum kontrolü imkanı sağlanmıştır. Sistem, L298N motor sürücü kartı aracılığıyla 12V DC lineer aktüatörü kontrol etmekte ve potansiyometre/enkoder ile geri besleme mekanizması sağlamaktadır. Web tabanlı arayüz üzerinden kullanıcı, aktüatörün ileri-geri hareketini kontrol edebilmekte ve anlık konum bilgisini izleyebilmektedir. Sistem tasarımı, devre şeması, PCB tasarımı ve yazılım algoritmaları detaylı olarak sunulmuştur. Çalışma sonucunda, uzaktan erişim ile hassas konum kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiş ve sistemin endüstriyel otomasyon, akıllı ev sistemleri ve IoT uygulamalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

GİRİŞ

Lineer aktüatörler, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren mekanik-elektronik sistem bileşenleridir. Günümüzde birçok endüstriyel ve otomasyon sisteminde konum kontrolü, hassas hareket ve güvenilir çalışma gereksinimlerini karşılayan temel elemanlardır. Bu projede, lineer aktüatörün uzaktan kontrol edilebilir bir yapıya dönüştürülmesi amaçlanmıştır.

Hazırlanan sistem, kullanıcıya uzaktan erişim ile aktüatörün konumunu gerçek zamanlı olarak ayarlama ve izleme imkânı sağlamaktadır. Kontrol mekanizması, kablosuz iletişim protokolleri üzerinden veri aktarımı yapacak biçimde tasarlanmıştır. Böylece fiziksel erişim gerektirmeden hareketli sistemlerin yönetimi mümkün hale getirilmiştir.

Lineer aktüatörler, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nava-Pintor ve arkadaşları [1], mekatronik eğitiminde kullanılmak üzere kamera tabanlı konum algılama sistemi ve bulanık mantık kontrol yöntemiyle yüksek doğrulukta konum kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Uppsala Üniversitesi'nde yapılan çalışmada [2], elektromekanik lineer aktüatörlerin performans değerlendirmesi için kapsamlı bir test metodolojisi geliştirilmiştir.

Kablosuz kontrol sistemleri konusunda, Awari ve arkadaşları [3] RF kontrollü lineer aktüatörlü masa lambası geliştirerek kablosuz kontrolün pratik uygulamalarını göstermişlerdir. Endüstriyel uygulamalarda ise, Jang ve arkadaşları [4] CNC torna tezgahları için yüksek kuvvet üretebilen elektromekanik lineer aktüatör tasarlamışlardır.

IoT entegrasyonu açısından, Platero-Horcajadas ve arkadaşları [5] sera kontrol sistemlerinde sıcaklık, nem ve ışık sensörleri kullanarak lineer aktüatörlerle otomatik pencere ve havalandırma kontrolü sağlamışlardır.

Bu projenin temel amacı, lineer aktüatör sistemlerinin modern IoT teknolojileri ile entegre edilerek uzaktan kontrol edilebilir, akıllı bir otomasyon çözümü geliştirmektir. Proje kapsamında belirlenen hedefler şunlardır: Wi-Fi bağlantısı üzerinden gerçek zamanlı konum kontrolü, geri besleme mekanizması ile milimetrik hassasiyet, mobil ve web tabanlı kullanıcı dostu arayüz, ekonomik bileşenlerle yüksek performans, optimize edilmiş güç tüketimi ve farklı uygulama alanlarına uyarlanabilir ölçeklenebilir yapı.

Bu çalışma, uzaktan erişim destekli lineer aktüatör kontrol sisteminin tasarımını, kontrol devresi yapısını ve yazılım bileşenlerinin entegrasyon sürecini kapsamaktadır. Geliştirilen sistem, farklı uygulama alanlarında kullanılabilirlik ve uyarlanabilirlik açısından güçlü bir temel oluşturmaktadır.

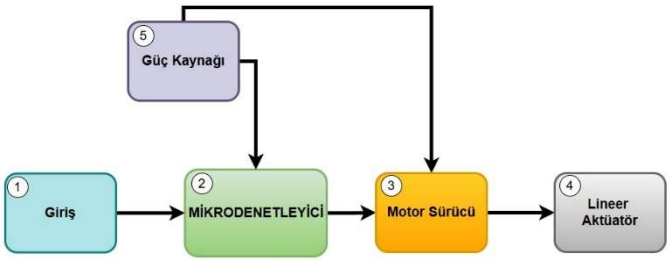
MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, uzaktan konum kontrollü lineer aktüatör sisteminin tasarımı için kullanılan malzemeler, sistem mimarisi, devre tasarımı ve yazılım geliştirme süreci detaylı olarak açıklanmaktadır.

Sistem Mimarisi

Geliştirilen sistemin genel yapısı Şekil 1'de gösterilen blok diyagramı ile açıklanmaktadır. Sistem, beş ana bileşenden oluşmaktadır: giriş bloğu, mikrodenetleyici (ESP32), motor sürücü (L298N), lineer aktüatör ve güç kaynağı.

1



Şekil 1. Sistem Blok Diyagramı.

Blok diyagramda görüldüğü gibi, potansiyometre/enkoderden alınan konum bilgisi ESP32'ye aktarılır, burada işlenen veri motor sürücüye PWM ve yön sinyali olarak gönderilir. Motor sürücü, güç kaynağından aldığı enerjiyi kullanarak lineer aktüatörü istenen yönde çalıştırır. Böylece sistem hem konum bilgisini algılar hem de aktüatörün hareketini kontrol eder.

Giriş Bloğu: Kullanıcının sisteme komut girmesini sağlar. Web arayüzü üzerinden kullanıcı tarayıcıdan "AÇ/UZAT", "KAPAT/GERİ ÇEK" ve "DURDUR" butonlarına basar. Butonlar basıldığında HTTP istekleri ESP32'ye gönderilir ve WiFi üzerinden kablosuz veri aktarımı gerçekleştirilir.

Mikrodenetleyici: Sistemin beyni olarak görev yapar ve tüm kararları alır. Web sunucu görevi yaparak WiFi ağına bağlanır, HTTP isteklerini dinler, web arayüzünü sunar ve kullanıcı komutlarını alır. Gelen komutları yorumlar, algoritma çalıştırır ve hangi pinin ne yapacağına karar verir.

Motor Sürücü: ESP32'nin düşük akımlı sinyallerini, lineer aktüatörü çalıştıracak yüksek akıma dönüştürür. ESP32 pinleri maksimum 40mA verirken, lineer aktüatör 2-10A arası akım çekmektedir. Direkt bağlantı ESP32'yi yakacağı için motor sürücü kullanılması zorunludur. L298N modülü çift H-Bridge yapısında olup maksimum 2A sürekli akım sağlar ve IN1, IN2 pinleri ile yön kontrolü yapar.

Lineer Aktüatör: Elektrik enerjisini doğrusal harekete dönüştürür. İçinde DC motor ve vida mekanizması bulunur. Motor döndükçe vida ilerler veya geri çekilir, böylece dönel hareket doğrusal harekete çevrilir. Kullanım alanları arasında pencere açma/kapama, masa yükseklik ayarı, kapı kilitleme, güneş paneli takip ve robotik kollar bulunmaktadır.

Güç Kaynağı

Tüm sisteme elektrik enerjisi sağlar. İki farklı gerilim seviyesi kullanılmaktadır: ESP32 için 3.3V ve aktüatör için 12V kullanılmaktadır.

Lineer Aktüatör Motor

Dönme hareketini doğrusal harekete çeviren bir mekanizmadır. Projede uzaktan kontrolle fiziksel bir nesnenin ilerigeri hareket etmesi istenmektedir. Yüksek hassasiyet, sessiz çalışma, kompakt yapı ve elektrikle kolay kontrol edilebilme avantajlarına sahiptir. Hidrolik sistemlere göre daha az bakım gerektirir ve enerji tüketimi düşüktür.
Teknik özellikleri: Çalışma Voltajı 12V DC, Strok Uzunluğu 100-200 mm, İtme Kuvveti 50-100 N, Hız 10-30 mm/s. Şekil 2'de lineer aktüatör gösterilmektedir.

Şekil 2. Lineer Aktüatör

Motor Sürücü Kartı (L298N)

Lineer aktüatörün motoruna güç vermek ve yön kontrolü sağlamak için gereklidir. ESP32 gibi mikrodenetleyiciler doğrudan yüksek akım sağlayamaz. Motorun dönüş yönünü (ileri/geri) ve hızını kontrol edebilmek için çift yönlü (H-köprüsü) kontrol sunar. Ayrıca aşırı akım koruması ve voltaj kararlılığı sağlar. Teknik özellikleri: Çip L298N Dual H-Bridge, Giriş Voltajı 4.824V DC, Maksimum Çıkış Akımı 2A, Çıkış Voltajı 5V, PWM Frekans Aralığı 0-40 kHz. Şekil 3'te motor sürücü kartı gösterilmektedir.

Şekil 3. L298N Motor Sürücü Kartı

12V Adaptör

Lineer aktüatörün motoru genellikle 12V ile çalışır ve sistemin ana enerji kaynağını oluşturur. 12V adaptör, sabit çalışma ortamlarında kararlı enerji sağlar. Taşınabilir sistemlerde ise 12V Li-ion piller esneklik ve kablosuz çalışma olanağı sunar. Teknik özellikleri: Adaptör 12V 3A (36W), Pil (opsiyonel) 12V Li-ion 2200-4400 mAh, Çalışma Süresi 2-4 saat (yük seviyesine bağlı).

Regülatör (LM2596)

ESP32 gibi kontrol kartları 3.3V ile çalışır. 12V adaptörden gelen enerjiyi bu değerlere düşürmek için regülatör kullanılır. Gerilim dalgalanmaları ESP32 veya sensörlere zarar verebilir. Regülatör, sabit çıkış voltajı sağlayarak sistemin kararlılığını ve uzun ömürlülüğünü garanti eder. Teknik özellikleri: Tip Buck Converter, Giriş 4-35V, Çıkışlar 1.25-30V, Çıkış Akımı 3A.

Şekil 4. Buck Converter Regülatör

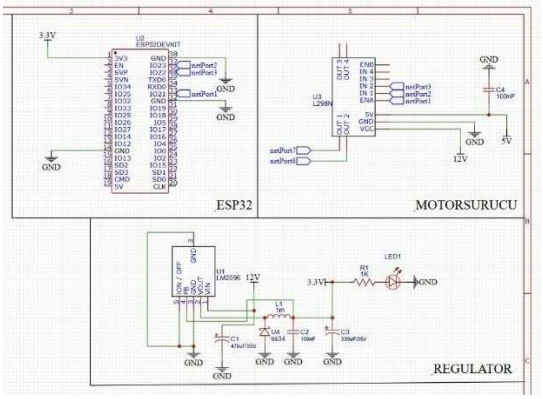
ESP32

Sistemin beyni olarak görev yapar. Aktüatörün hareketini, sensörlerden gelen verileri ve uzaktan bağlantıyı kontrol eder. Wi-Fi ve Bluetooth bağlantı özelliklerine sahip olması, uzaktan kontrol için ideal hale getirir. Ayrıca düşük güç tüketimi, yüksek işlem gücü ve Arduino IDE desteği sayesinde programlama kolaylığı sunar. Teknik özellikleri: İşlemci Dual-core Xtensa 32-bit 240 MHz, RAM 520 KB, Flash Bellek 4 MB, Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth 4.2/BLE, GPIO 34 pin, ADC 12-bit 18 kanal, Çalışma Voltajı 3.3V.

Şekil 5. ESP32.

Devre Tasarımı Devre Şeması

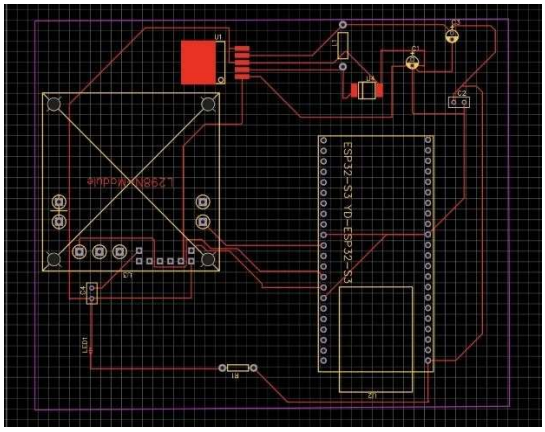
Aktüatör motor ile konum kontrollü devre şeması Şekil 6'da gösterilmiştir. Devre şemasında, potansiyometre/enkoderden alınan konum bilgisi ESP32'ye aktarılmakta, işlenen veri motor sürücüye PWM ve yön sinyali olarak gönderilmektedir. Motor sürücü, güç kaynağından aldığı enerjiyi kullanarak lineer aktüatörü istenen yönde çalıştırmaktadır.



Şekil 6. Devre Şeması

PCB Tasarımı

Aktüatör motor ile konum kontrollü devre PCB'si Şekil 7'de gösterilmiştir. PCB tasarımında kompakt bir yerleşim düzeni kullanılarak sistemin küçük boyutlarda üretilmesi sağlanmıştır.



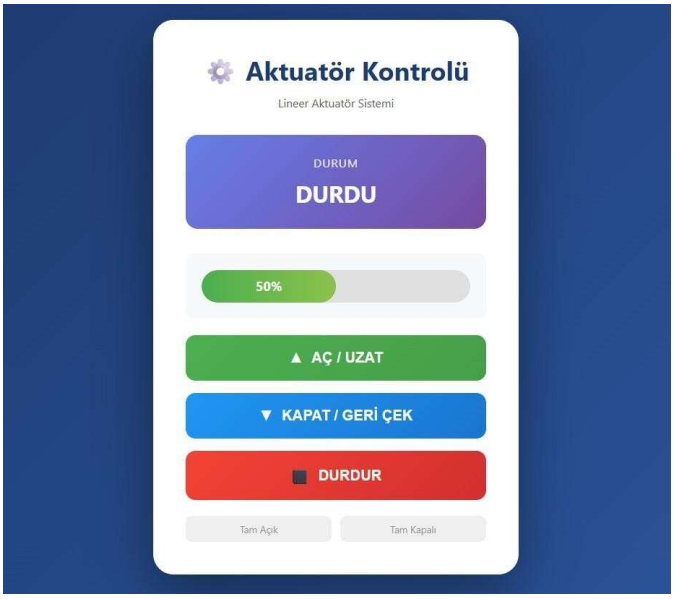
Şekil 7. PCB Tasarımı

Yazılım Tasarımı

Web Sunucusu Arayüzü ve Kontrol Mantığı

Projenin temel hedeflerinden biri olan uzaktan kontrol işlevselliği, ESP32 kartının Wi-Fi özellikleri kullanılarak geliştirilmiştir. ESP32, yerel bir ağ üzerinde bir web sunucusu olarak görev yapar. Kullanıcı, herhangi bir web tarayıcısı üzerinden ESP32'nin IP adresine bağlandığında kontrol paneli ile karşılaşır. Arayüz, sistemin anlık durumunu ve konumunu gösterirken, kullanıcıya tam kontrol imkânı sağlar.

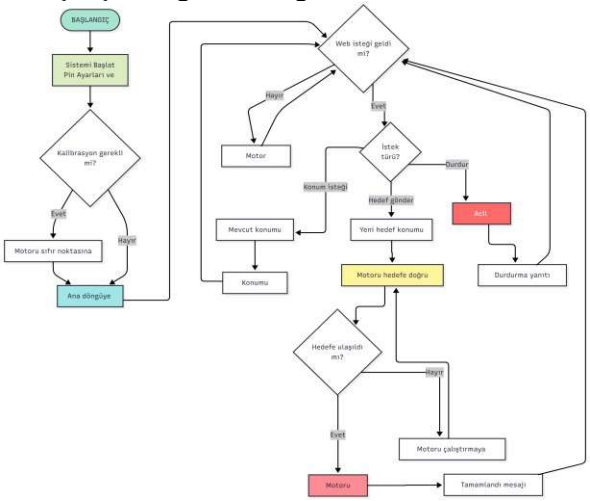
Şekil 7'de web arayüzü kontrol paneli gösterilmektedir. Arayüz bileşenleri şunlardır: Durum Göstergesi (aktüatörün o anki hareket durumunu "DURDU", "AÇILIYOR/UZUYOR", "KAPANIYOR/ÇEKİLİYOR" şeklinde gösteren dinamik alan), Konum Çubuğu (aktüatörün mevcut fiziksel konumunu yüzde olarak gösterir, bu veri potansiyometre veya enkoderden anlık olarak okunur), Kontrol Butonları (AÇ/UZAT: aktüatöre ileri yönde hareket için motor sürücüye komut gönderir, KAPAT/GERİ ÇEK: geri yönde hareket için komut gönderir, DURDUR: o anki hareketi sonlandırmak için motor sürücüye "dur" komutu gönderir).



Şekil 7. Web Arayüzü Kontrol Paneli

Çalışma Algoritması

Sistem, iki ana mantık üzerine kuruludur: ESP32 üzerinde çalışan sunucu taraflı kod ve web tarayıcıda çalışan istemci taraflı kod. Şekil 8'de sistem çalışma algoritması gösterilmektedir.



Şekil 8. Sistem Çalışma Algoritması

ESP32 (Sunucu Taraflı) Algoritması şu şekilde çalışmaktadır

Başlatma aşamasında ESP32 Wi-Fi ağına bağlanır ve bir IP adresi alır, web sunucusu başlatılır, motor sürücü kartı ve potansiyometre için kullanılacak GPIO pinleri ayarlanır. Sunucu yönetiminde, sunucu belirli URL adreslerine gelen HTTP isteklerini dinler. Tarayıcıya arayüzü oluşturan HTML, CSS ve JavaScript kodlarını gönderir, İLERİ butonundan gelen isteği alır ve motor sürücü pinlerini ileri hareket için ayarlar, durum "UZUYOR" olarak güncellenir, GERİ ÇEK butonundan gelen isteği alır ve motor sürücü pinlerini geri hareket için ayarlar, durum "ÇEKİLİYOR" olarak güncellenir, DURDUR butonundan gelen isteği alır ve motor sürücü pinlerini duruş için ayarlar, durum "DURDU" olarak güncellenir, web arayüzünün anlık veri çekmesi için JSON verisi sağlar. Ana döngüde sürekli olarak potansiyometreden analog konum verisini okur, mevcut motor durumunu (İleri, Geri, Durdu) ve hesaplanan yüzde konumunu değişkenlerde saklar.

Web Arayüzü Algoritması şu şekilde çalışmaktadır;

Sayfa yükleme ve başlatma aşamasında kullanıcı tarayıcıdan ESP32'nin IP adresine bağlandığında sunucu HTML sayfasını ve CSS dosyalarını gönderir, JavaScript başlatma fonksiyonu devreye girer, kontrol butonlarına tıklama algılayıcıları atanır, periyodik veri güncelleme zamanlayıcısı başlatılır, sistem durumu ve aktüatör konumu için ilk veri çekimi yapılır. Veri güncelleme sisteminde her 500 milisaniyede bir ESP32'den güncel veri talep edilir, web arayüzü ESP32'nin /data adresine HTTP GET isteği gönderir, sunucudan JSON formatında yanıt gelir, gelen veriler işlendikten sonra arayüzdeki görsel elemanlar dinamik olarak güncellenir.

Kullanıcı etkileşimi buton kontrolleri şu şekildedir;

İLERİ butonu işlem akışında kullanıcı butona tıkladığında öncelikle buton geçici olarak devre dışı bırakılır, ESP32'nin /ileri adresine HTTP isteği gönderilir, kullanıcıya "Aktüatör açılıyor..." şeklinde bildirim gösterilir, ESP32'den yanıt geldikten sonra işlem başarılıysa yeşil onay mesajı, hata oluştuysa kırmızı uyarı mesajı gösterilir, yaklaşık bir saniye sonra buton tekrar aktif hale gelir. GERİ ÇEK butonu işlem akışı İLERİ butonu ile aynıdır, tek fark ESP32'nin /kapat adresine istek gönderilmesi ve motor sürücünün geri yönde hareket sinyali almasıdır, kullanıcıya "Aktüatör kapanıyor..." bildirimi gösterilir. DURDUR butonu işlem akışında acil durdurma butonu hiçbir zaman devre dışı bırakılmaz, butona basıldığında anında ESP32'nin /dur adresine istek gönderilir, sunucu bu komutu en yüksek öncelikle işler ve motor sürücüye durdurma sinyali iletir, kullanıcıya "Aktüatör durduruldu" şeklinde sarı renkli uyarı mesajı gösterilir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada geliştirilen uzaktan konum kontrollü lineer aktüatör sisteminin performansı, maliyet analizi ve uygulama sonuçları bu bölümde detaylı olarak sunulmaktadır.

Geliştirilen sistemin avantajları şu şekilde sıralanabilir: Düşük maliyet, kolay kurulum, ölçeklenebilirlik, kullanıcı dostu arayüz (web tabanlı kolay kontrol), uzaktan erişim (Wi-Fi ile her yerden erişebilme).

Sistem, çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilir potansiyele sahiptir. Endüstriyel otomasyon sistemlerinde hassas konum kontrolü gerektiren uygulamalarda, akıllı ev uygulamalarında perde ve pencere kontrolünde, tarım otomasyonunda sera havalandırma sistemlerinde, güneş paneli takip sistemlerinde güneşin konumuna göre panel pozisyonlamasında ve medikal cihazlar ile rehabilitasyon ekipmanlarında kullanılabilir.

Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde, Nava-Pintor ve arkadaşlarının [1] kamera tabanlı konum algılama sistemi kullanarak elde ettikleri hassasiyet ile bu çalışmada potansiyometre kullanılarak elde edilen hassasiyet karşılaştırılabilir düzeydedir. Awari ve arkadaşlarının [3] RF kontrollü sistemi ile karşılaştırıldığında, bu çalışmada Wi-Fi kullanılması daha geniş bir kontrol aralığı ve internet üzerinden erişim imkanı sağlamaktadır.

Platero-Horcajadas ve arkadaşlarının [5] sera kontrol sisteminde olduğu gibi, geliştirilen sistem de IoT teknolojileri ile entegre edilebilir yapıdadır. Ancak bu çalışmada geliştirilen sistem, daha düşük maliyetle ve daha basit kurulum ile benzer işlevselliği sağlamaktadır.

Sistemin geliştirilmesi için önerilen gelecek çalışmalar şunlardır: PID kontrol algoritması entegrasyonu ile hassasiyetin artırılması, çoklu aktüatör kontrolü için sistem genişletilmesi, Android ve iOS platformları için mobil uygulama geliştirilmesi, sıcaklık, basınç gibi farklı sensörlerin sisteme entegrasyonu, makine öğrenmesi algoritmaları ile otomatik konum öğrenme özelliğinin eklenmesi.

Deneysel çalışmalar sırasında karşılaşılan bazı sınırlamalar da bulunmaktadır. Wi-Fi bağlantısının kesintiye uğraması durumunda manuel kontrol imkanının olmaması, yüksek yük altında motor sürücünün ısınması nedeniyle duty cycle limitinin düşmesi, web arayüzünün eş zamanlı çoklu kullanıcı erişiminde performans düşüşü gözlemlenmesi bu sınırlamalar arasındadır. Bu sınırlamaların gelecek çalışmalarda ele alınması planlanmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen uzaktan konum kontrollü lineer aktüatör sistemi, belirlenen hedeflere ulaşmış ve başarılı bir şekilde test edilmiştir. Sistemin düşük maliyeti, kolay uygulanabilirliği ve ölçeklenebilir yapısı, endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanım potansiyelini göstermektedir.

REFERANS

[1] Nava-Pintor, J. A., Carlos-Mancilla, M. A., Guerrero-Osuna, H. A., Luque-Vega, L. F., Carrasco-Navarro, R., CastroTapia, S., Solís-Sánchez, L. O. (2023). Design, Implementation, and Control of a Linear Electric Actuator for Educational

Mechatronics. MDPI, 11(9), 894. https://www.mdpi.com/2075-1702/11/9/894

[2] Linder, I. (2022). Development of Test Methodology for Electromechanical Linear Actuators (Master's thesis). Uppsala
UNIVERSITY. https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1648176/FULLTEXT01.pdf

[3] Awari, R., Barudwale, S., & Raundal, S. (2022). Wireless Remote Controlled Linear Actuator Lamp. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). https://www.ijraset.com/research-paper/wirelessremote-controlled-linear-actuator-lamp

[4] Jang, D., Shin, H., Paul, S., Chang, J., & Yun, Y. (2019). Design of a High-Force Electromechanical Actuator for
Electrically Driven Lathe Machine. IEEE/ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/336642301

[5] Platero-Horcajadas, M., et al. (2024). Enhancing Greenhouse Efficiency: Integrating IoT and Optimization. MDPI Sensors, 24(24), 8109. https://www.mdpi.com/1424-8220/24/24/8109

AKILLI BİNA SİSTEMLERİ İÇİN OTONOM VE MANUEL PANJUR YAPIMI

MEHMET ÇAPAN*1

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,Selçuklu,Konya

*(mehmetcapan84@gmail.com)

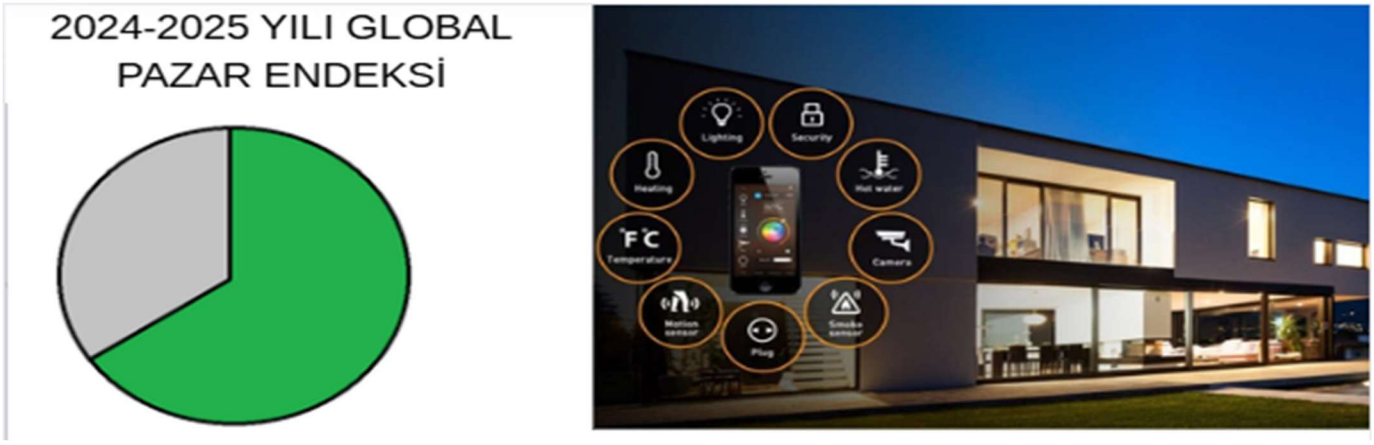
ÖZET – Bu makale akıllı bina sistemlerinin hayat konforunu, güvenliğini ve enerji tasarrufunu nasıl yaptığı ve sistemlerin nasıl kurulduğu ile ilgilidir. Bu makalede akıllı bina sistemlerinin sadece bir parçası olan otonom panjur ve güvenliği içermektedir. Çalışmanın amacı, ESP32S ile panjur sistemini he manuel olarak hem mobil uygulama üzerinden kontrol etmenin yanı sınıra sisteme eklenilen güvenlik elemanları olan sensörler sayesinde duruma göre otonom şekilde açılıp kapanmasını sağlamaktır.

ANAHTAR KELİMELER-AKILLI BİNA;ESP32S

GİRİŞ

Teknolojinin günlük hayatımıza daha fazla nüfus etmesiyle birlikte dijital ve akıllı cihazların birincil yaşam alanı olan evlerdeki kullanımı da artıyor. Bu cihazlar evin ısıtma, soğutma, aydınlatma, güvenlik ve eğlence sistemlerini otomatikleştirir. Otomatikleştirme için de sensörlerden faydalanılır. Akıllı ev, kullanıcının yaşam kalitesini arttırmayı, enerji tasarrufu sağlamayı ve evdeki yaşantıyı daha konforlu hale getirmeyi amaçlar. [1] Statista'nın yayımladığı verilere göre dünya genelinde 175 milyon akıllı ev olduğuna işaret ediyor. Mevcut evlerin akıllı teknolojilerle yenilenmesine yönelik artan talep sayesinde, yenileme segmenti 2024 yılında en büyük pazar payına sahip oldu. Birçok ev sahibi, önemli tadilatlar yapmadan evlerini akıllı termostatlar, aydınlatma, güvenlik sistemleri ve ev otomasyon cihazlarıyla yenilemeyi tercih ediyor. Bu segment, daha düşük kurulum maliyetleri ve mevcut altyapıyla kolay entegrasyon gibi avantajlara sahip. Uygun fiyatlı ve erişilebilir yenileme ürünleri trendi, bu ürünleri sıfırdan başlamadan evlerini modernize etmek isteyen geniş bir tüketici yelpazesi için cazip kılıyor.[2] (şekil-a)

Globalde akıllı ev sisteminin market değeri 2024-2025 yılları arasında pazarın %60-%65 oran ile 127.800$



değerlerindeyken günümüzde halen artışını devam ettirmektedir.

MATERYAL VE METOT

Akıllı ev otomasyonlarında kullanılan motorlu panjur sistemlerinin gerçek çalışma koşulları altında performanslarının doğru şekilde analiz edilebilmesi amacıyla bir akıllı panjur prototipi ve kontrol algoritması geliştirilmiştir. Konut ve ticari binalarda kullanılan panjur motorları; güneş ışığı, iç mekân gereksinimleri, güvenlik beklentileri ve kullanıcı alışkanlıklarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Geliştirilen sistemde panjur mekanizmasının hareketi, 28BYJ-48 step motor ve ULN2003 sürücü kartı ile sağlanmıştır. Motor hareketi; kablosuz kontrol, sensör geri bildirimleri ve manuel butonlar aracılığıyla yönetilmektedir. Panjur sisteminde kullanılan motorun farklı hızlarda, farklı tork gereksinimlerinde ve değişken yük altında (örneğin rüzgâr etkisi, panjur ağırlığı veya sürtünme değişimleri) kararlı ve güvenilir şekilde çalışması hedeflenmiştir. Bu nedenle motor sürme algoritması, hem otomatik hem de manuel çalışma modlarında doğru konumlandırma yapacak şekilde tasarlanmıştır.

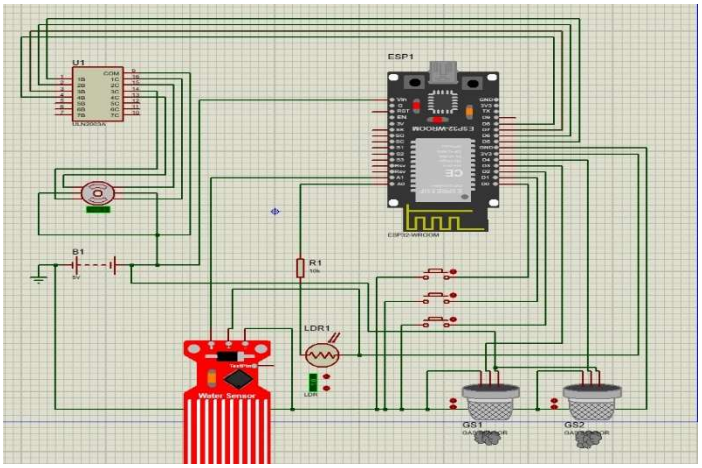
Akıllı panjur sisteminin endüstriyel uygulamalarda veya konut otomasyonlarında kullanılabilir hâle gelmesi için düşük maliyetli, enerji verimli ve kolay uygulanabilir bir mimari tercih edilmiştir.

Sistem; gaz, duman, su, termostat/nem ve ışık (LDR) sensörleriyle entegre edilerek çevresel koşullara göre otomatik tepki verebilecek bir yapı kazanmıştır. Örneğin ortamda duman algılandığında panjurun otomatik olarak açılması veya yağmur/su algılandığında camların kirlenmesini engellemek için kapalı konuma geçmesi sağlanmıştır.

Tasarlanan kontrol modeli, hem bağımsız bir akıllı panjur sistemi olarak hem de geniş kapsamlı bir ev otomasyonuna entegre olacak şekilde çalışabilmektedir. Sistemin temel bileşenleri olan ESP32-S mikrodenetleyici, sensör modülleri, kablosuz iletişim altyapısı ve mobil uygulama arayüzü, kullanıcıya uzaktan kontrol imkânı sunmaktadır. Böylece panjur, mobil uygulama üzerinden aç-kapa, yüzde konumlandırma ve otomatik mod seçimi gibi komutları güvenilir şekilde yerine getirebilmektedir.

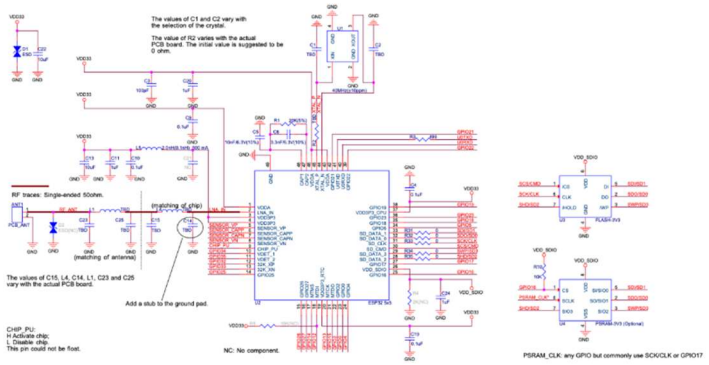
Bu çalışma kapsamında tasarlanan akıllı panjur deney düzeneği, düşük maliyeti, modüler yapısı ve genişletilebilir sensör entegrasyonu sayesinde herhangi bir panjur sistemine uyarlanabilecek niteliktedir. Geliştirilen prototipin genel bağlantı mimarisi ve mekanik düzeni Şekil b'de gösterilmektedir.

(ŞEKİL-b)



Sistem Bileşenleri;

ESP32-S Mikrodenetleyici

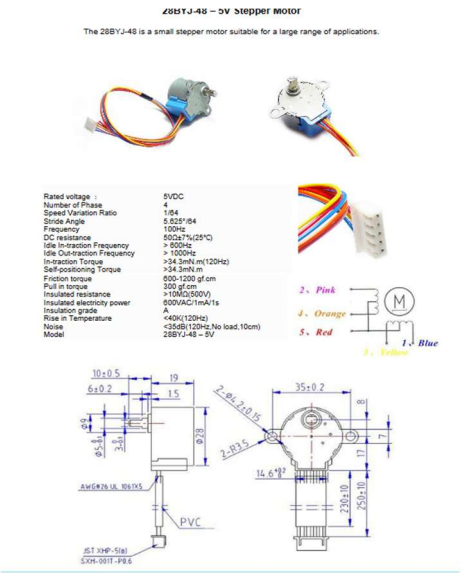


Şekil-1

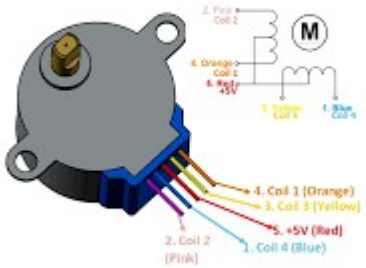
şekil-2

- Sistemin merkezi işlem birimidir
- Wi-Fi bağlantısı sayesinde mobil uygulama ile haberleşmeyi sağlar.
- Sensörlerden alınan verileri işler, motor sürücüye kontrol sinyali gönderir.
- Şekil 1'da datasheet ve şekil-2 de ürünün görseli verilmiştir.

28BYJ-48 Step Motor



Şekil-3



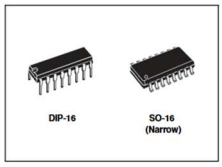
şekil-4

- Panjur açma-kapama hareketini gerçekleştirir.
- Yüksek hassasiyetli adım kontrolü sayesinde panjurun yüzde konumlandırmasını gerçekleştirebilir.
- Şekil 3'de datasheet ve şekil-4 de ürünün görseli verilmiştir.

ULN2003 Motor Sürücü Kartı

Features

- Seven darlingtons per package
- Output current 500mA per driver (600mA peak)
- Output voltage 50V
- Integrated suppression diodes for inductive loads
- Outputs can be paralleled for higher current
- TTL/CMOS/PMOS/DTL Compatible inputs
- Inputs pinned opposite outputs to simplify layout



Description

The ULN2001, ULN2002, ULN2003 and ULN 2004 are high voltage, high current darlington arrays each containing seven open collector darlington pairs with common emitters. Each channel rated at 500mA and can withstand peak currents of 600mA. Suppression diodes are included for inductive load driving and the inputs are pinned opposite the outputs to simplify board layout.

The versions interface to all common logic families:

ULN2001	General Purpose, DTL, TTL, PMOS, CMOS
ULN2002	14-25V PMOS
ULN2003	5V TTL, CMOS
ULN2004	6-15V CMOS, PMOS

These versatile devices are useful for driving a wide range of loads including solenoids, relays DC motors, LED displays filament lamps, thermal printheads and high power buffers.

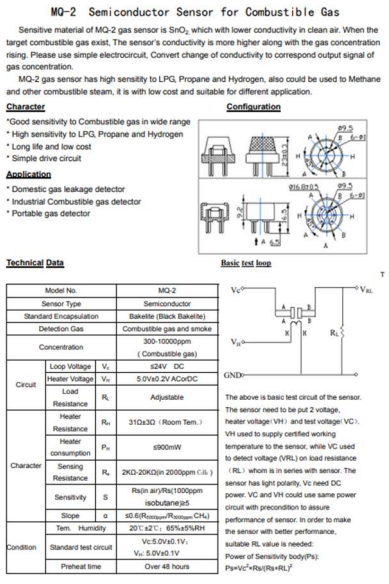
The ULN2001A/2002A/2003A and 2004A are supplied in 16 pin plastic DIP packages with a copper leadframe to reduce thermal resistance. They are available also in small outline package (SO-16) as ULN2001D1/2002D1/2003D1/ 2004D1.

Şekil-5 şekil-6

- Step motorun gerekli akım seviyelerini sağlar.
- ESP32'den gelen düşük güçlü kontrol sinyallerini güçlendirir.
- Şekil 5'da datasheet ve şekil-6 da ürünün görseli verilmiştir.

Çevresel Sensörler

- **Gaz Sensörü (MQ-2):** Duman/gaz algılandığında panjuru açarak güvenli tahliye sağlar. Şekil 7'da datasheet ve şekil-8 de ürünün görseli verilmiştir.



MQ-2 Semiconductor Sensor for Combustible Gas

Sensitive material of MQ-2 gas sensor is SnO_2 which with lower conductivity in clean air. When the target combustible gas exist, The sensor's conductivity is more higher along with the gas concentration rising. Please use simple electrocircuit, Convert change of conductivity to correspond output signal of gas concentration.

MQ-2 gas sensor has high sensitity to LPG, Propane and Hydrogen, also could be used to Methane and other combustible steam, it is with low cost and suitable for different application.

Character

*Good sensitivity to Combustible gas in wide range
* High sensitivity to LPG, Propane and Hydrogen
* Long life and low cost
* Simple drive circuit

Application

* Domestic gas leakage detector
* Industrial Combustible gas detector
* Portable gas detector

Configuration

Technical Data

Model No.			MQ-2
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite (Black Bakelite)
Detection Gas			Combustible gas and smoke
Concentration			300-10000ppm (Combustible gas)
Circuit	Loop Voltage	V_c	≤24V DC
	Heater Voltage	V_H	5.0V±0.2V ACorDC
	Load Resistance	R_L	Adjustable
Character	Heater Resistance	R_H	31Ω±3Ω (Room Tem.)
	Heater consumption	P_H	≤900mW
	Sensing Resistance	R_s	2KΩ-20KΩ(in 2000ppm C_4H_{10})
	Sensitivity	S	R_s(in air)/R_s(1000ppm isobutane)≥5
	Slope	α	≤0.6($R_{s1000ppm}$/$R_{s300ppm}$,CH_4)
Condition	Tem. Humidity		20℃±2℃; 65%±5%RH
	Standard test circuit		V_c:5.0V±0.1V; V_H: 5.0V±0.1V
	Preheat time		Over 48 hours

Basic test loop

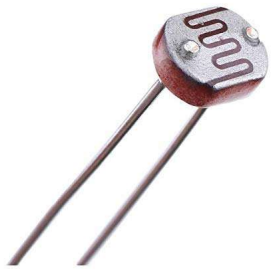
The above is basic test circuit of the sensor. The sensor need to be put 2 voltage, heater voltage(VH) and test voltage(VC). VH used to supply certified working temperature to the sensor, while VC used to detect voltage (VRL) on load resistance (RL) whom is in series with sensor. The sensor has light polarity, Vc need DC power. VC and VH could use same power circuit with precondition to assure performance of sensor. In order to make the sensor with better performance, suitable RL value is needed: Power of Sensitivity body(Ps): $P_S=V_C^2*R_S/(R_S+RL)^2$

Şekil-7 şekil-8

- **Su Sensörü:** Panjur alt kısmında su birikmesi veya yağış algılandığında panjuru kapatma komutu verir. Şekil 9'da ürünün görseli verilmiştir.

Şekil-9

- **LDR Sensörü:** Ortam ışığına göre otomatik açma/kapama yapar.
Şekil 10'da ürünün görseli verilmiştir.



şekil-10

- **Duman Sensörü:** Yangın durumunda otomatik açılma sağlar.
Duman sensörü model olarak gaz sensörü ile aynı model kullanılacaktır.

Manuel Kontrol Butonları

- **Yukarı**, **Durdur**, **Aşağı butonları.**
- Sensör verilerinden bağımsız doğrudan kullanıcı kontrolü sağlar.

Mobil Uygulama

- Wi-Fi üzerinden FİREBASE ile gerçek zamanlı ESP32s haberleşir.
- Panjuru aç-kapa yapma, yüzde konumlandırma, otomatik mod seçimi ve durum takibi sağlar.
- Mobil uygulama FLUTTER programında yazılır.

Çalışma Prensibi

Sistem, ESP32 mikrodenetleyicisi üzerinden hem manuel hem otomatik kontrol sağlar. Kullanıcı, mobil uygulama veya fiziksel butonlar aracılığıyla panjuru açabilir, kapatabilir veya sabit bir konuma taşıyabilir. Sensörlerden alınan veriler gerçek zamanlı olarak değerlendirilir:

- **Gaz/Duman algılandığında:**
  Panjur otomatik olarak açılır ve ortamın tahliyesi sağlanır.
- **Su algılandığında:**
  Camların kirlenmemesi için kapatılır.
- **Güneş ışığı yüksek ise:**
  Panjur yarı kapalı konuma getirilerek ısı yükü azaltılır.
- **Gece olduğunda:**
  Panjur otomatik kapanır.

Motor kontrol algoritması, step motorun belirli adım sayısına göre belirlenen pozisyona gitmesini sağlar. Motor yönü ULN2003 üzerinden yönetilir.

Sonuç

Bu çalışmada, düşük maliyetli bileşenler kullanılarak tam fonksiyonel bir akıllı panjur sistemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Sistem; çevresel sensörlerle uyumlu, hızlı tepki veren, tamamen uzaktan kontrol edilebilir ve modüler bir yapı sunmaktadır. Geliştirilen prototipin akıllı ev otomasyonlarında kolaylıkla uygulanabileceği ve ileride IoT, yapay zekâ destekli karar mekanizmaları veya enerji optimizasyonu gibi ek fonksiyonlarla geliştirilebileceği değerlendirilmektedir.

REFERANSLAR

[1] Grand View Research. (2025). *Smart Home Market Size and Share, Industry Report, 2030*. Retrieved November 16, 2025, from https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-homes-industry

[2] Adıyaman Akıllı Ev – Otomasyon Sistemleri. (2021, 1 Ekim). *Akıllı Bina KNX*. Retrieved November 16, 2025, from https://adiyamansmarthome.wordpress.com/2021/10/01/akilli-bina-knx/

[3] Espressif Systems. (2025). *ESP32 Hardware Design Guidelines* (Release master, November 07, 2025). Espressif Systems.

[4] https://www.robolinkmarket.com/esp32-wroom-esp32s-wifi-ve-bluetooth-modulu-38-pin?srsltid=AfmBOoqJt0cVHMSapseX2yNHi3fL_Jjw1Hj1-tUW65Ggx50PgD82J_yi https://www.robolinkmarket.com/esp32-wroom-esp32s-wifi-ve-bluetooth-modulu-38-pin?srsltid=AfmBOoqJt0cVHMSapseX2yNHi3fL_Jjw1Hj1-tUW65Ggx50PgD82J_yi

[5] 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor Datasheet.” (n.y.). *AllDatasheet.com*. Erişim: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=28byj48

[6] STMicroelectronics. (2021, November 30). *ULN2001/ULN2002/ULN2003/ULN2004 Datasheet* (DocID 5279 Rev 14). STMicroelectronics. Erişim: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/170214/STMICROELECTRONICS/ULN2003A.htm

[7] Shenzhen Funkey Tech Co., Ltd. (2025). *5V 4 Phase 5-Wires 28BYJ-48 Unipolar Stepper Motor With 64:1 Gear Reduction Ratio* [Ürün sayfası]. Alibaba. Erişim: https://www.alibaba.com/product-detail/5V-4Phase-5-Wires-28BYJ-48_1600296644673.html

[8] Robotistan. (t.y.). *Su Seviyesi / Yağmur Sensörü – Water Level / Rain Sensor* [Ürün sayfası]. Erişim: https://www.robotistan.com/su-seviyesi-yagmur-sensoru-water-level-rain-sensor

[9] ProjeHocam. (t.y.). *3 mm LDR Işık Sensörü* [Ürün sayfası]. Erişim: https://www.projehocam.com/urun/3mm-ldr-isik-sensoru/?srsltid=AfmBOooVYQXV0st88hllgki7aPxkAKBg1Xva5kKFB4jbUXPHlYeYpu9o

13S LİTYUM - İYON BATARYALAR İÇİN MİKRODENETLEYİCİ TABANLI KORUMA SİSTEMİ TASARIMI

Hakan TERZİOĞLU[1*], Sema Nur ECEVİT[2]

[1*]*Elektirik Elektronik Mühenndisliği Bölümü, Selcuk Üniversitesi Telnoloji Fakültesi Selçuklu, Konya*

[2] *Elektirik Elektronik Mühenndisliği Bölümü, Selcuk Üniversitesi Telnoloji Fakültesi Selçuklu, Konya*

[*]*(hterzioglu@selcuk.edu.tr)*

Özet – Bu projenin amacı, 13S lityumiyon batarya paketinde gerilim, akım ve sıcaklık parametrelerini gerçek zamanlı izleyerek, tanımlı sınırlar aşıldığında röle üzerinden batarya yük bağlantısını otomatik kesmek ve böylece paket bütünlüğünü ile bağlı yüklerin emniyetini sağlamaktır. Mimari olarak elektrikli araç ölçeğindeki BMS literatürünün önerdiği çekirdek akış (ölç–karşılaştır–kes) ve paket düzeyi donanım kararlılığı ilkeleri gözetilmiş; yüksek gerilim hattı iki kademeli güç dönüştürme ile (buck → 12 V; ardından temiz 5 V ölçüm rayı) kontrol elektroniğinden ayrıştırılmıştır [1,3]. Akım algılamada Hall etkili sensör seçimi, galvanik izolasyon ve EMI bağışıklığı nedeniyle yapılmış; böylece güç hattındaki hızlı geçişlerin ölçüm katına taşınması en aza indirilmiştir [5]. Sıcaklık arayüzünde RC filtreleme ve yerel decoupling uygulanarak anahtarlamalı güç kaynağı ve röle komütasyonu kaynaklı yüksek frekans bileşenlerinin ADC okumalarına etkisi azaltılmış, karar katmanında ise yalancı tetiklemeleri önlemek için eşik/histerezis ve "eşik üzerinde kalma süresi" (ör. ≥200 ms) koşulu birlikte kullanılmıştır [2,4]. Kullanıcı arayüzünde 6 LED ile yüksek/düşük gerilim, aşırı/düşük akım ve yüksek sıcaklık gibi durumların açıkça bildirilmesi, düşük maliyetli MCU tabanlı prototiplerde raporlanan pratik bir teşhis yöntemidir [2]. Termal açıdan yük bloğunun fan ile soğutulması, BTMS literatüründe önerildiği üzere uzun sürüş/test senaryolarında yüzey sıcaklığını düşürmek ve kararlı çalışma sağlamak için amaçlanmıştır [6]. Böylece ortaya konan miniBMS prototipi; güvenli eşik algılama, hızlı ve seçici yük kesme, görsel durum bildirimi ve ısıl yönetimi tek kart üzerinde birleştirerek laboratuvar/test kullanımına uygun, düşük maliyetli ve modüler bir altyapı sunar.

Anahtar Kelimeler – Lityum-İyon Batarya; Batarya Koruma Sistemi; Mikrodenetleyici; Arduino; Gerilim İzleme; Akım Algılama; ACS758.

GİRİŞ

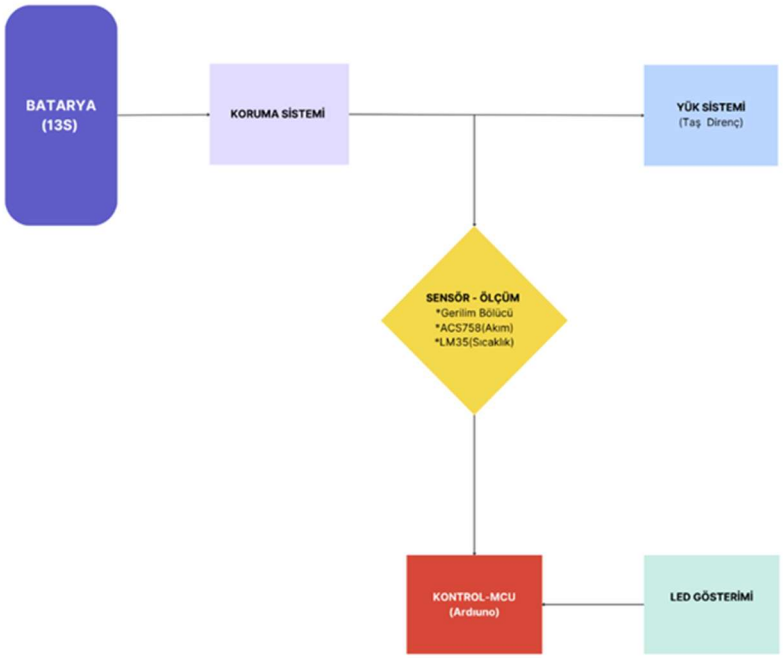
Lityum-iyon bataryaların güvenli işletimi, paket gerilimi, akımı ve sıcaklığın sürekli izlenmesine ve eşik aşımlarında gecikmeden devreye giren koruma eylemlerine dayanır; elektrikli araç ölçeğindeki başat BMS çalışmaları bu çekirdek akışı (ölç–karşılaştır–kes) mimari düzeyde ayrıntılandırarak, donanım katmanında doğru gerilim ölçekleme, güvenilir akım algılama ve paket düzeyinde ısı gözetimi gibi işlevlerin zorunluluğunu ortaya koyar [1]. Uygulama ölçeği küçüldüğünde —örneğin laboratuvar/test düzeneği veya hafif elektrikli araçlar— düşük maliyetli mikrodenetleyici tabanlı yaklaşımlar öne çıkar; literatürde Arduino/benzeri MCU ile basit sinyal koşullandırma, eşik/histerezis ve "süre" koşullu karar, röle ya da MOSFET ile yük kesme ve LED tabanlı durum bildirimi bir araya getirilerek hızlı prototipleme başarılmıştır [2]. Öte yandan, EV/HEV odaklı kapsamlı derlemeler, BMS'in yapıtaşlarını (ölçüm, dengeleme, koruma, veri işleme) ve tipik koruma stratejilerini sistematik biçimde sunarak, paket düzeyi gözetimin niçin ve nasıl yapılması gerektiğini üst düzey bir çerçeveye oturtur [3]. Güvenlik eksenli incelemeler ise özellikle aşırı gerilim/akım/sıcaklık senaryolarının sonuçlarına ve bu parametrelerin "sürekli ve güvenilir" biçimde izlenmesi gereğine vurgu yapar; bu vurgu, eşik tabanlı ve gecikme-toleranslı bir karar katmanı tasarlamamıza doğrudan gerekçe oluşturur [4]. Bu tasarımın akım algılamasında tercih ettiği Hall etkili sensör yaklaşımı, güç hattı ile ölçüm elektroniği arasında galvanik izolasyon sağlayarak mikrodenetleyiciyi yüksek gerilimden yalıtır ve ortak kip gürültüsüne (buck dönüştürücü/röle kaynaklı dv/dt'ler) karşı daha yüksek bağışıklık sunar; bu iki avantaj da saha uygulamalarında ölçüm güvenilirliği açısından kritik kabul edilir [5].Son olarak, paket/yük üzerinde ısıl kararlılığın korunması için zorlanmış konveksiyon (fan) gibi BTMS ilkelerinin uygulanması, sabit güç yüklerinde bileşen yüzey sıcaklığını belirgin biçimde düşürdüğünü gösteren çalışmalarla

desteklenmektedir; bu nedenle yük bloğunun fan ile soğutulması, uzun süreli testlerde kararlı çalışma hedefimizle uyumludur [6]

MATERYAL VE METOT

2.1. Sistem Mimarisi ve Bileşenleri

Projenin genel çalışma yapısı Şekil 1'de verilen blok şeması üzerinden gösterilmiştir. Bu şemada sistemin temel bileşenleri olan batarya birimi, kontrol kartı, voltaj sensörü ve yük devresi arasındaki veri ve enerji akışı şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 1.Proje Blok Şeması

Batarya Bloğu: Seri bağlı on üç lityum-iyon hücreden oluşan (nominal 48 V, tam şarj 54.6 V) batarya paketi sistemin birincil enerji kaynağıdır; batarya çıkışına doğrudan bağlanan gerilim ölçüm bölücüleri, akım sensörü ve röle tabanlı koruma devreleri üzerinden hem izleme hem de koruma işlevleri gerçekleştirilirken, aynı çıkış hattından XL4016 dönüştürücü beslenerek kontrol elektroniği için gerekli düşük gerilim rayları üretilir; böylece batarya çıkışındaki yüksek gerilim bir yandan gerilim bölücü aracılığıyla mikrodenetleyicinin ADC girişine güvenli düzeyde aktarılır, diğer yandan güç dağıtımı düzenli ve kararlı hâle getirilir. "Paket düzeyi izleyiciler, MCU ADC girişleri için hat gerilimini genellikle direnç bölücülerle düşürür." [10]

Koruma sistemi: Batarya ile yük arasına seri yerleştirilen 12 V bobinli DC röle, Arduino Nano'nun çıkış sinyalinin BD139 tabanlı NPN sürücü üzerinden uygulanmasıyla enerjilendirilip bırakılarak yükün elektriksel bağlantısını yönetir; aşırı gerilim, aşırı akım veya yüksek sıcaklık koşullarından herhangi biri yazılım tarafından algılandığında mikrodenetleyici röleyi açarak batarya–yük devresini keser ve kesim anında röle bobininde depolanan endüktif enerji 1N4007 flyback diyot üzerinden güvenle deşarj edilerek hem BD139 transistör hem de mikrodenetleyici ani gerilim darbelerine karşı korunur. "Endüktif bir yükün uçlarına yerleştirilen diyot, alan çöküş akımı için düşük empedanslı bir yol sağlayarak anahtar üzerindeki büyük gerilim sıçramalarını önler." [12]

Yük Sistemi: Test yükü, bataryadan yaklaşık 1 A akım çekmek üzere tasarlanmış olup seri bağlanmış dört adet 15 Ω/25 W taş dirençten oluşarak toplam 60 Ω eşdeğer sağlar; bu konfigürasyon yaklaşık 50 W düzeyinde sabit ve öngörülebilir bir güç tüketimi üretirken her bir direnç üzerinde yaklaşık 12 W'lık dağılım gerçekleşir, böylece ısıl

artış sınır değerlerin altında tutulur ve uzun süreli testlerde kararlı çalışma elde edilir. "Zorlanmış konveksiyon, sabit güç yükleri altında bileşen yüzey sıcaklığını belirgin ölçüde düşürür." [13]

Sensör-Ölçüm Bloğu: Sensör-ölçüm bloğu; batarya–yük hattındaki akımı galvanik izolasyonla izlemek üzere seri yerleştirilen ACS758 akım sensörü, batarya gerilimini mikrodenetleyicinin 0–5 V ADC aralığına güvenle ölçeklemek için 100 kΩ/10 kΩ değerlerinden oluşturulan gerilim bölücü ve paketin kritik noktalarındaki ısıl değişimleri takip edebilmek amacıyla batarya gövdesi ile yük üzerine konumlandırılan üç adet LM35 sıcaklık sensöründen oluşur; böylece akım, gerilim ve sıcaklık bilgileri eşzamanlı ve güvenli seviyelerde Arduino'ya aktarılır, yazılım da bu verileri sürekli değerlendirerek koruma kararlarını üretir. "Hall etkili akım sensörleri, galvanik izolasyon ve ortak kip gürültüsüne yüksek bağışıklık sunar." [11] "Basit RC filtreleme ve yerel ayırma, sensör arayüzündeki gürültüyü yüzde onlar mertebesinde azaltır."

MCU Sistemi: Arduino Nano, ACS758 akım sensörü ve LM35 sıcaklık sensörlerinden ve gerilim bölücüden aldığı analog verileri ADC üzerinden örnekler; yazılım, hareketli ortalama/histerezis ve süre koşulu uygulayarak eşik aşımı tespitinde röle kontrolünü gerçekleştirir ve eş zamanlı olarak ilgili LED göstergelerini sürer; 5 V rayı LM7805 ile üretilir ve giriş-çıkış kapasitörleriyle kararlı tutulur. "Düşük maliyetli MCU platformları, basit sinyal koşullandırma ve eşik mantığıyla BMS işlevlerinin prototiplenmesini mümkün kılar." [8]

LED Gösterimi: 6 adet LED'in her biri, mikrodenetleyiciden aldığı dijital sinyal ile 330 Ω seri direnç üzerinden sürülerek belli bir durumu temsil eder; hata durumlarında yalnızca ilgili LED yanar (yüksek/düşük gerilim, aşırı/düşük akım, yüksek sıcaklık), tüm parametreler normalse "Sistem OK" LED'i aktif kalır ve kullanıcı anlık durumu kolayca görür.

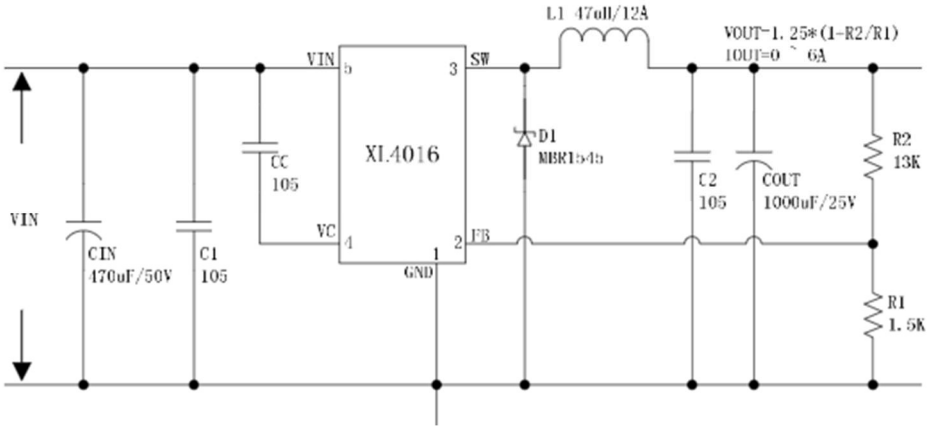
2.2. Tasarım ve Gerçekleştirme Metodolojisi

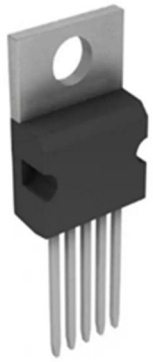
Literatür Araştırması: Batarya güvenlik sistemleri, akım/gerilim/sıcaklık sensörleri ve koruma yöntemleri incelenerek proje için yol haritası belirlenecek.
Sistem Tasarımı ve Blok Diyagramı: Projenin genel işleyişini gösteren blok şema oluşturulacak. Sensörler, MCU, güç kesici eleman ve yük sisteminin görevleri tanımlanacak.
Komponent Seçimi: Ölçüm ve kontrol için uygun sensörler (ACS758, LM35), mikrodenetleyici (STM32), kesme elemanı (DC kontaktör), taş dirençler ve LED'ler seçilecek.
Devre Şeması Tasarımı: Seçilen komponentler elektronik şema üzerinde düzenlenip sensör çıkışları ADC girişlerine, MCU çıkışları LED ve kontaktör sürücülerine bağlandı.
Simülasyon ve Ön Testler: Devre Proteus ortamında simüle edilerek akım, voltaj ve sıcaklık senaryoları test edilecek. **PCB Tasarımı ve Üretimi:** Devrenin fiziksel tasarımı yapılacak. Daha sonra PCB üretilip komponentler monte edilecek. **Yazılım Geliştirme:** MCU için C tabanlı yazılım ile geliştirilecek. ADC okuma, eşik kontrolü, LED kontrolü ve röle/kontaktör sürme işlevleri kodlanacak.
Test ve Doğrulama: Gerçek batarya ve taş direnç yükleri ile farklı senaryolar denenecek uygun hale gelmesi için.

2.3. Devre Materyalleri ve Detaylı Metot

Materyal

Güç dönüştürme (XL4016E1 + diyot/kapasitörler): XL4016E1'in seçilme sebebi, 60 V sınıfı giriş gerilimine dayanabilmesi ve 12 V omurgayı kararlı üretmesidir; giriş tarafında VIN–GND arasına 220 µF/63 V elektrolitik ile 100 nF seramik kapasitör paralel bağlanarak batarya hattından gelebilecek düşük - yüksek frekans dalgalanmaları bastırılır, çıkış tarafında VOUT–GND arasına 470 µF/25 V + 100 nF seramik kapasitör yerleştirilerek yük adımlarında gerilim düşüşü ve anahtarlama dalgalanması sönümlenir; serbest geçiş yolu için hızlı bir Schottky diyot (VRRM ≥ 60 V, IF ≥ 5–10 A) kullanılır; geri besleme ağında yaklaşık Rtop ≈ 18.9–20 kΩ ve Rbot = 2.2 kΩ ile 12 V seviyesi ayarlanır, Rbot'a 100 nF paralel küçük bir kondansatör eklemek regülasyonu pürüzsüzleştirir.

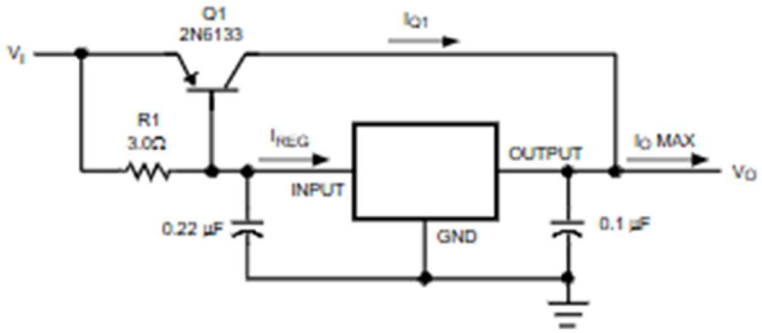




(a) XL4016E1 Datasheet Şematik Gösterimi (b) XL4016E1 Devre elemanı

Şekil 2.

5 V regülatör (LM7805 + kapasitörler): 12 V'tan 5 V üretmek için LM7805 kullanılır; modül çıkışına yakın 100 µF/25 V + 100 nF seramik yerleştirilerek Arduino ve sensörlerin besleme rayı temizlenir; hedef, ADC/sensör beslemesinin parazitsiz kalmasıdır.

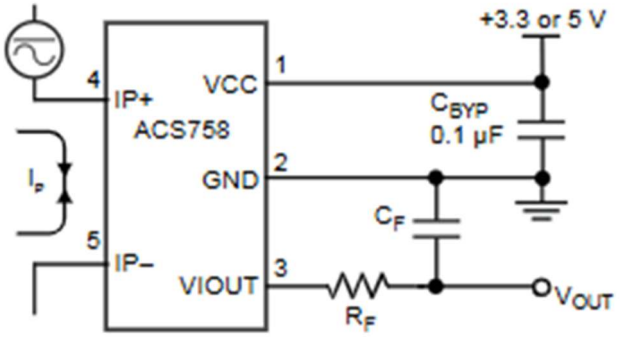


(a) LM7805 Datasheet Şematik Gösterimi (b)LM7805 Devre Elemanı

Şekil 3.

Gerilim bölücü ve ADC koruma ağı: 100 kΩ/10 kΩ oranıyla batarya örneği ADC aralığına çekilir; bu yüksek direnç değerleri bataryadan sürekli çekilen akımı düşük tutarak güç kaybını azaltır (1% toleranslı metal film dirençler doğruluğu artırır); ADC girişini korumak için 2.2 kΩ seri direnç, 5.1 V zener (katot A0, anot GND) ve 100 nF paralel kondansatör kullanılır; seri direnç zener iletiminde akımı sınırlar, zener 5 V üzerindeki pikleri kelepçeler, 100 nF ise hızlı parazitleri toprağa kaçırır.

ACS758 akım sensörü ve çıkış filtresi: Galvanik izolasyon sağlar, güç hattını doğrudan ADC'ye bağlamaz; Vout hattında 100 Ω seri direnç ve ADC noktasında 100 nF kondansatör ile yaklaşık 15–20 kHz'de basit bir düşük geçiren filtre elde edilir, 150 kHz civarındaki buck anahtarlama gürültüsü bastırılır; sensör Vcc'sine 10 µF + 100 nF decoupling eklenerek iç referans dalgalanması azaltılır.

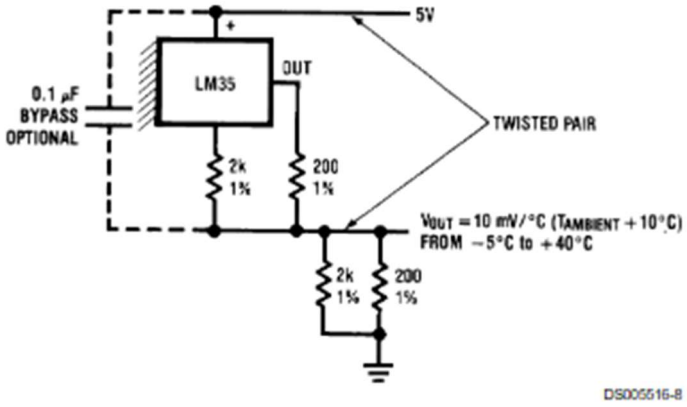


(a)ACS758 Datasheet Şematik Gösterimi

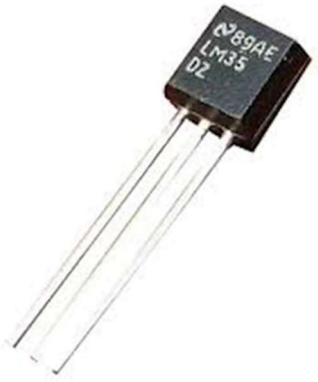
(b)ACS758 Devre Elemanı

Şekil 4.

LM35 sıcaklık sensörü ve RC filtre: Her sensörün Vcc-GND'sine 10 µF elko + 100 nF seramik koymak besleme rayını "sakinleştirir"; Vout'a 100 Ω seri ve ADC noktasına 100 nF paralel eklemek, sıcaklığın yavaş değişen doğasına müdahale etmeden yüksek frekans parazitlerini sönümler; bu değerler, ölçümün gecikmeden ve titreşimsiz okunması için dengeli bir noktadadır



(a)LM35 Datasheet Şematik Gösterimi



(b)LM35 Devre Elemanı

Şekil 5.

Röle sürücü (BD139 + 1 kΩ + 1N4007): BD139 orta güç kapasitesi ve uygun kılıfıyla röle bobinini güvenle sürer; 1 kΩ baz direnci yaklaşık 5 mA baz akımıyla transistörü doyuma götürüp bobini çekerken, ATmega pin akım sınırlarını aşmaz; 1N4007 flyback diyot, bobin enerjisi kesildiğinde oluşan ters EMF'yi kendi üzerinden dolaştırarak transistörü ve MCU'yu korur; röle anahtarlama frekansı düşük olduğundan hızlı Schottky gerekmez, 1N400x serisi yeterlidir.

Fan koruma ve filtre (1N5819 + 100 µF + 100 nF): Schottky diyotun hızlı toparlanma ve düşük ileri düşüm özellikleri, fan kapandığında oluşan ters EMF'yi hızlıca toprağa döndürüp 12V hattını korur; 100 µF elko kalkışta gerilim sarkmalarını yumuşatır, 100 nF seramik komütasyon kliklerini süzer; iki kondansatör paralel bağlanır çünkü biri düşük, diğeri yüksek frekans bölgesinde etkindir.

LED ve sınırlama dirençleri (330 Ω): 5 V seviyede tipik LED ileri düşümü ~2 V olduğundan 330 Ω, ~9–10 mA gibi güvenli ve yeterli bir parlaklık akımı üretir; bu seçim hem LED parlaklığını homojen tutar hem de MCU pin akımlarını güvenli sınırda tutar

.

PCB/EMI yöntemleri: GND ve 12 V güç hatları polygon olarak döşenir; yüksek akım izleri kısa ve kalın, SW-L-D-Cout döngüsü küçük çevrim alanında konumlandırılır; sensör/ADC hatları güç izlerinden ayrıştırılır; FB direnci XL4016E1'in FB pinine yakın yerleştirilir (Rbot'a 100 nF paralel eklenmesi regülasyonu pürüzsüzleştirir); iz genişlikleri akıma göre seçilir (12 V/GND için ≥1.5–2 mm, 5 V için ~0.6–0.8 mm, sinyal için ~0.25–0.35 mm).

Metot

Veri Toplama: Akım, gerilim ve üç farklı sıcaklık kanalına ait analog veriler Arduino'nun ADC girişlerinden (A0=gerilim, A1=akım, A2/A3/A4=sıcaklık) periyodik olarak okunur; örnekleme periyodu uygulamada 500 ms seçilerek hem zaman çözünürlüğü korunur hem de röle sürme kararları için yeterli tepki hızı sağlanır, ADC referansı 5 V rayıdır ve her okuma turunda kanallar arası sıralama sabit tutularak zamanlama kaynaklı kaymalar en aza indirilir. "Düşük maliyetli MCU platformları, basit sinyal koşullandırma ve eşik mantığıyla BMS işlevlerinin prototiplenmesini mümkün kılar." [8]

Veri İşleme: Ham ADC sayımları, kalibrasyon katsayıları kullanılarak fiziksel büyüklüklere dönüştürülür; batarya gerilimi için ölçek çarpanı gerilim bölücü oranına göre $V_{bat} = V_{adc} \times (R_{top}+R_{bot})/R_{bot}$ ($\approx\times 11$), akım için ACS758'in sıfır noktası ($V_{zero}\approx 2.5$ V) ve hassasiyeti (Ki) ile $I = (V_{out}-V_{zero})/K_i$, sıcaklık için her LM35 kanalı $T(°C)=V_{out}(V)\times 100$ bağıntısı uygulanır; ölçüm gürültüsünü bastırmak amacıyla her kanal için 10 örnekli hareketli ortalama (moving average) filtresi kullanılır, ani sıçramalara karşı "median-of-3" (isteğe bağlı) ön filtresi eklenerek yanlış tetikleme olasılığı daha da düşürülür. "ADC pinindeki RC alçak geçiren filtre, yüksek frekanslı anahtarlama gürültüsünü zayıflatmada etkilidir." [14]

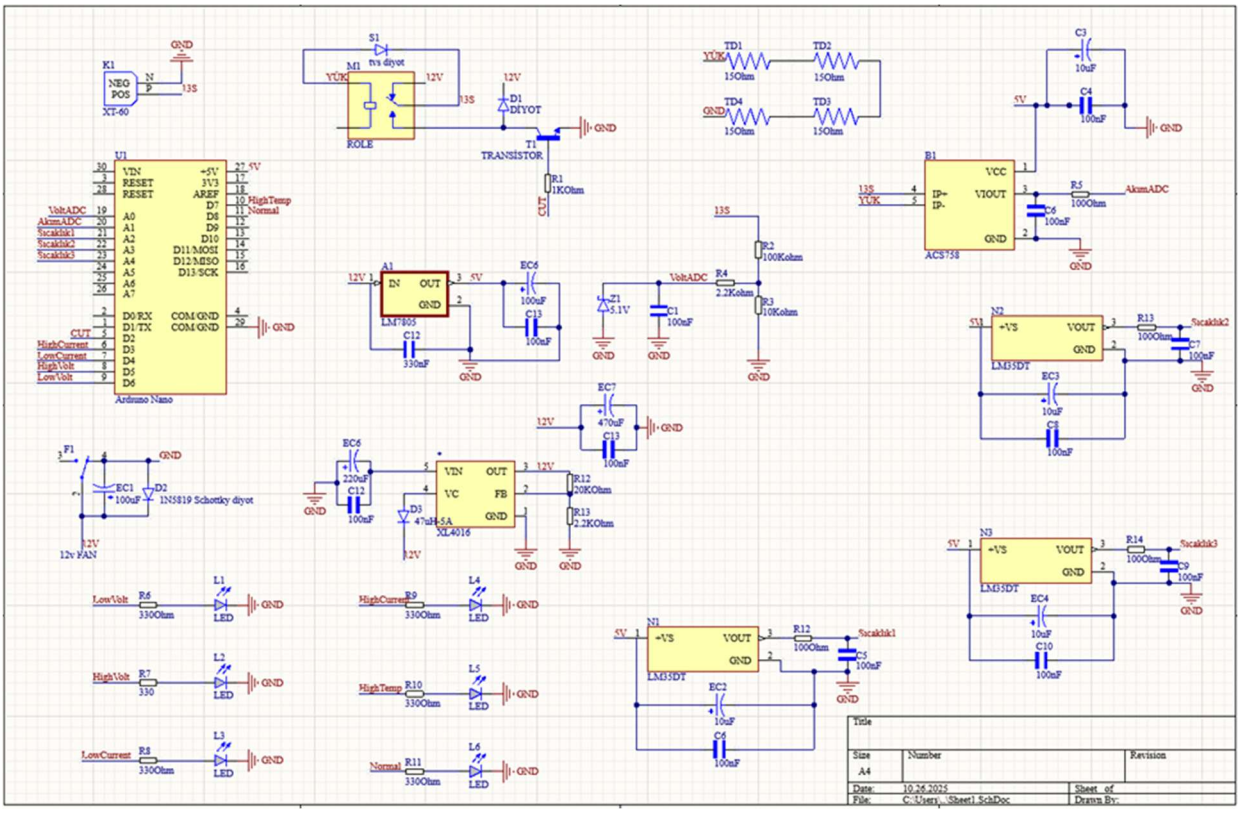
Karar Mekanizması: Her güncelleme döngüsünde işlenmiş değerler güvenli aralıklarla karşılaştırılır; gerilim üst sınır aşıldığında "aşırı gerilim" (OV), alt sınırın altına inildiğinde "düşük gerilim" (UV) durumu oluşturulur, akım nominal eşik değerinin üzerine çıktığında "aşırı akım" (OC) alarmı üretilir, üç sıcaklık kanalından herhangi biri eşik sıcaklığın üzerindeyse "aşırı sıcaklık" (OT) tespiti yapılır; yalancı tetiklemeleri engellemek için her eşik için küçük bir histerezis (ör. gerilim ±0.5 V, akım ±0.1 A, sıcaklık ±2 °C) uygulanır ve kararlar süre koşuluna bağlanır (ör. eşik üzerinde kesintisiz ≥200 ms kalma); ayrıca düşük akım/yük yok durumu bilgilendirme amaçlı olarak $I<0.1$ A eşiği ile izlenir, fakat koruma kesmesi gerektirmez; birden fazla hata aynı anda oluşursa öncelik sırası güvenlik kritikliğine göre OV/OC/OT > UV > düşük akım şeklinde belirlenir. "Li-iyon hücrelerde hızlanmış yaşlanmayı ve termal olayları önlemek için koruyucu eylemler zorunludur." [9]

Çıkış Kontrolü: Herhangi bir hata durumu geçerli ve süre/histerezis koşulunu sağlıyor ise mikrodenetleyici röle/kontaktör sürme pinini pasif hâle getirerek yük devresini açar (fail-safe mantıkla, varsayılan durum "enerjisiz-açık" olacak şekilde tasarlanır) ve aynı anda ilgili LED göstergesi aktif edilir; tüm parametreler güvenli sınırlarda iken yalnız "Sistem OK" LED'i yanar, hata LED'leri söner ve röle enerjilendirilerek devre iletimde tutulur; LED sürmede titreşim olmaması için durum değişimlerine yazılımsal debouncing ve histerezis uygulanır.

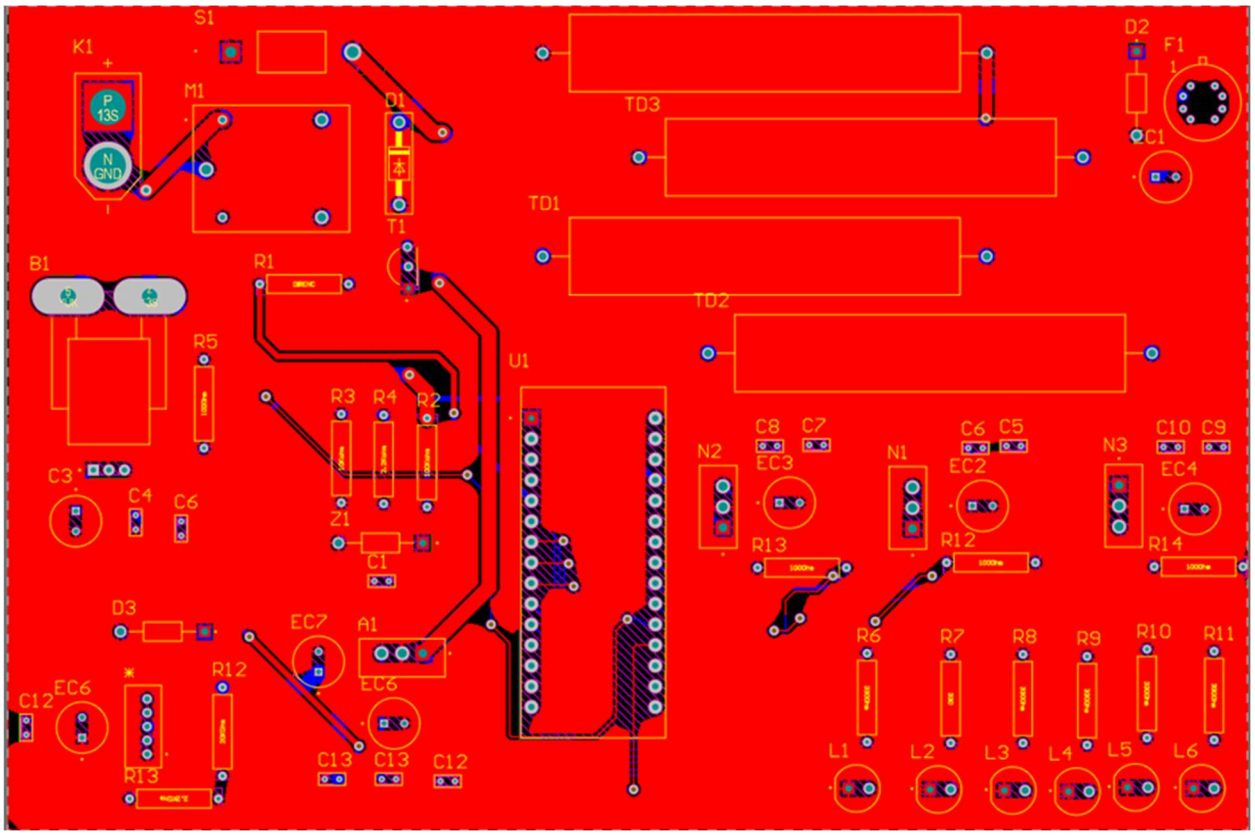
Reset İşlevi: Koruma tetiklendikten sonra sistem "kilitli" (latch) moda alınır ve hata koşulu ortadan kalksa dahi kullanıcı onayı olmadan otomatik kapanıp açma döngüsüne girmez; hata giderildikten sonra, yalnız tüm ölçümler yeniden güvenli aralığa döndüğünde (OV/UV/OC/OT yok) ve manuel reset butonuna basıldığında röle tekrar devreye alınır; reset girişi yazılımsal olarak 20–50 ms aralığında debounced edilir, istenirse otomatik kurtarma (ör. yalnız UV kalkınca) ayrı bir yazılım seçeneği olarak etkinleştirilebilir.

Tasarlanan devrenin elektronik yapısını göstermek amacıyla öncelikle devre şeması oluşturulmuş, ardından baskı devre (PCB) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şematik tasarım aşamasında devrenin işlevsel bağlantıları belirlenmiş,

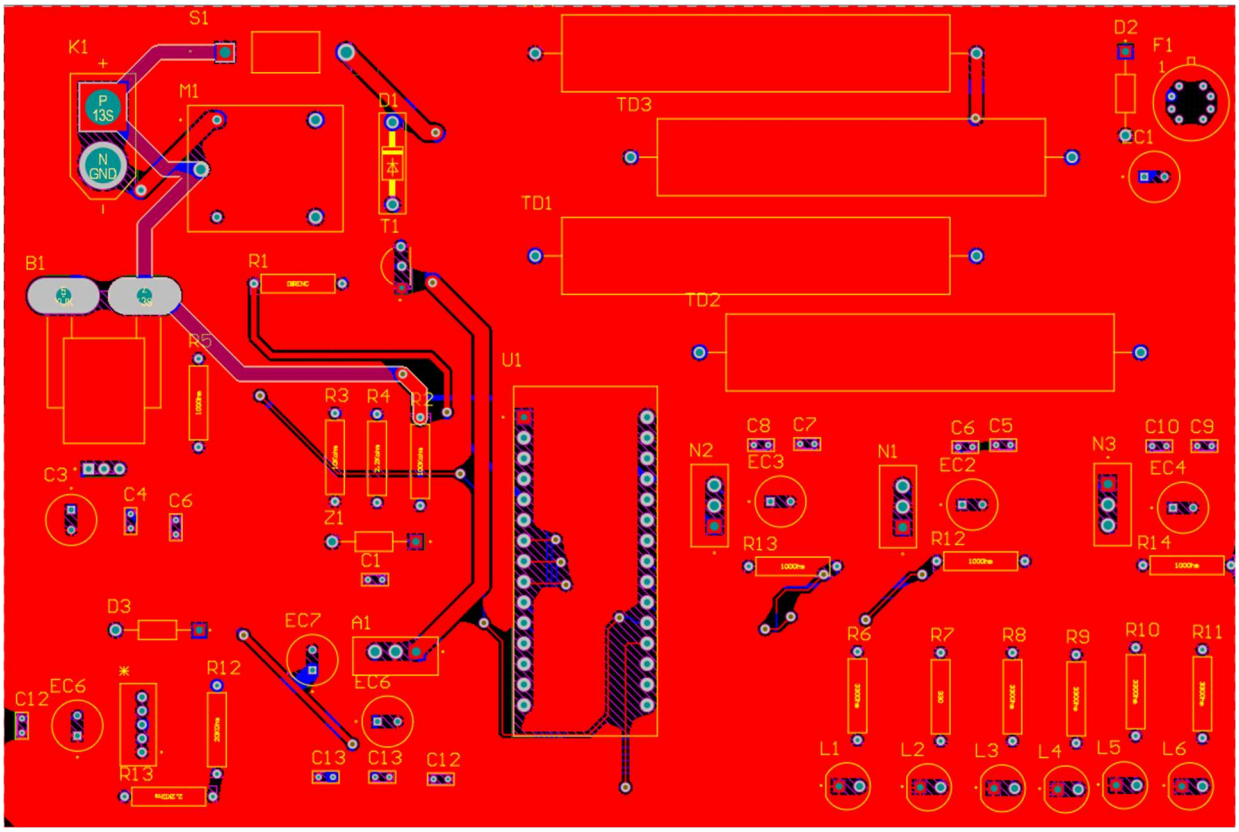
baskı devre tasarımı ile bileşenlerin konumlandırılması ve hatların yönlendirilmesi optimize edilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımlara ait şematik ve PCB görünümleri Şekil 6-11 arasında sunulmaktadır.



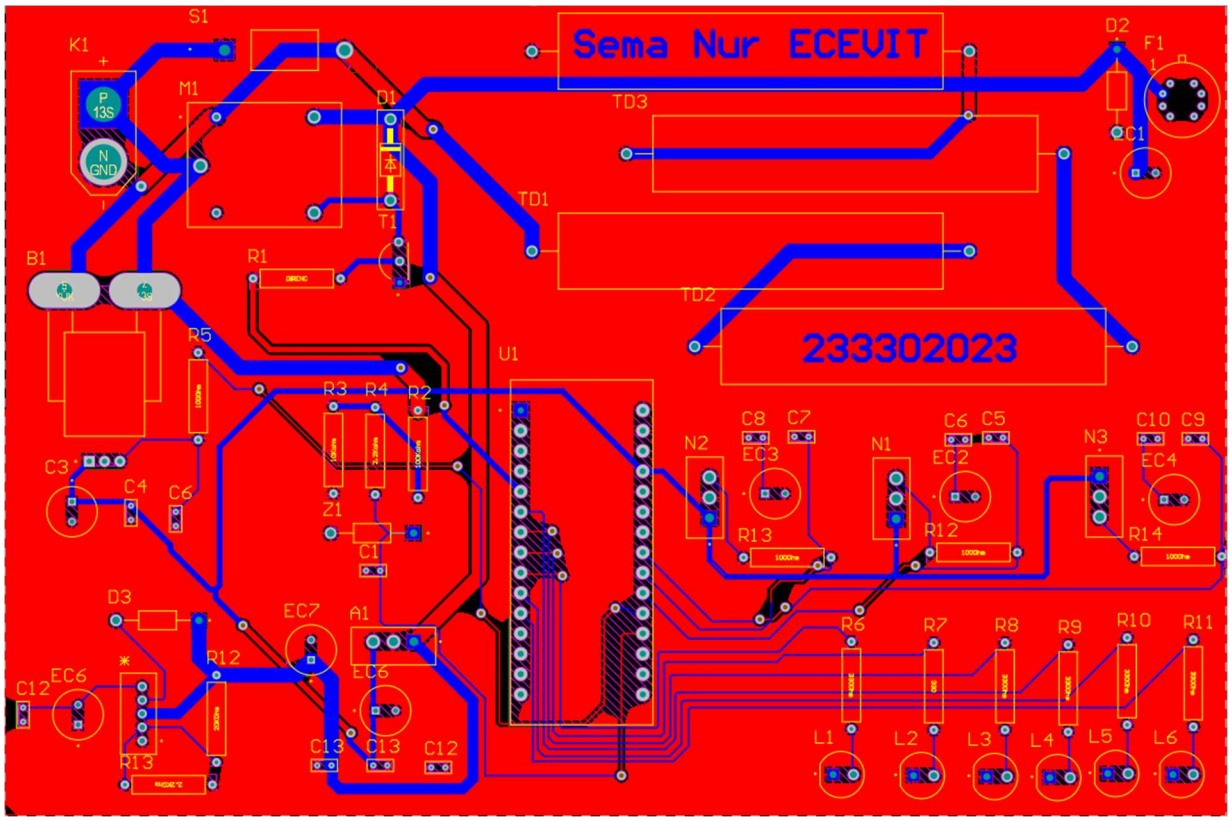
Şekil 6. Tasarlanan sistemin genel devre şema



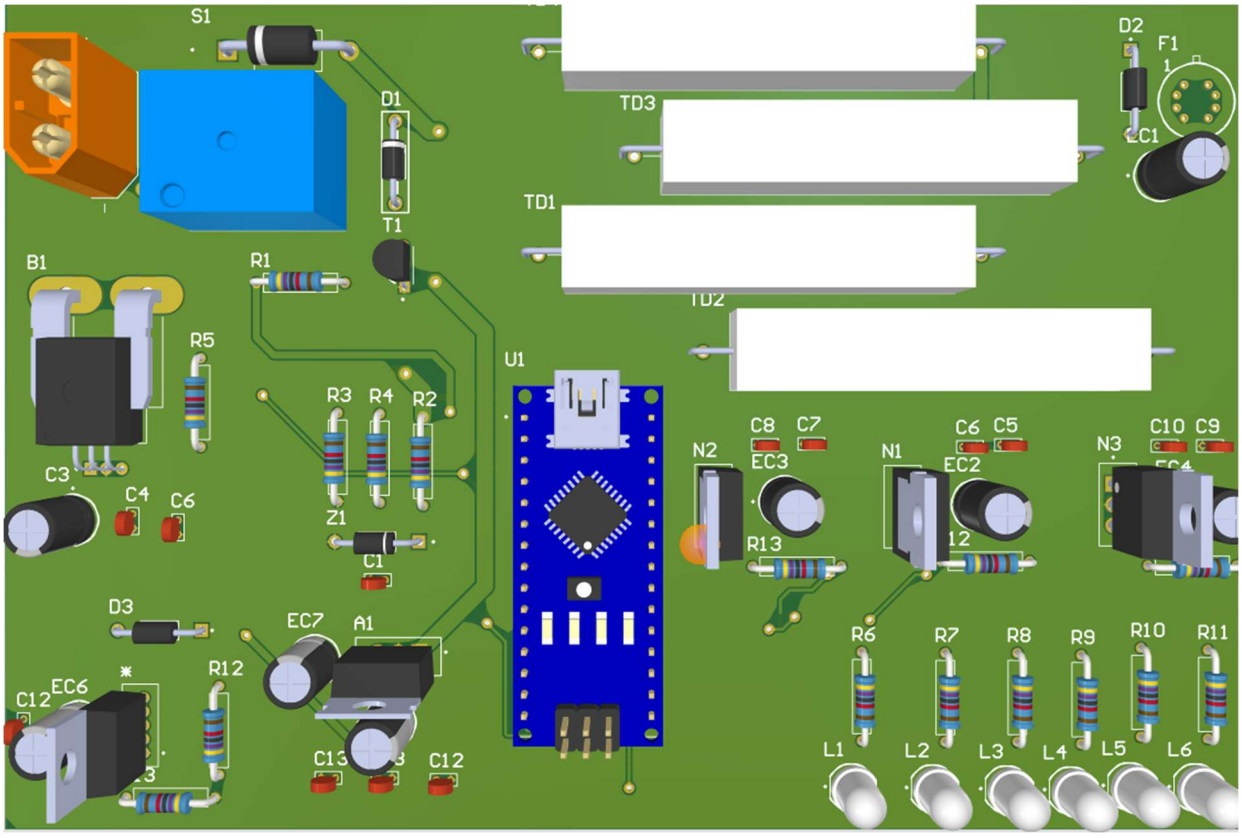
Şekil 7. Devreye ait baskı devre (PCB) tasarımının ön yüz görünümü



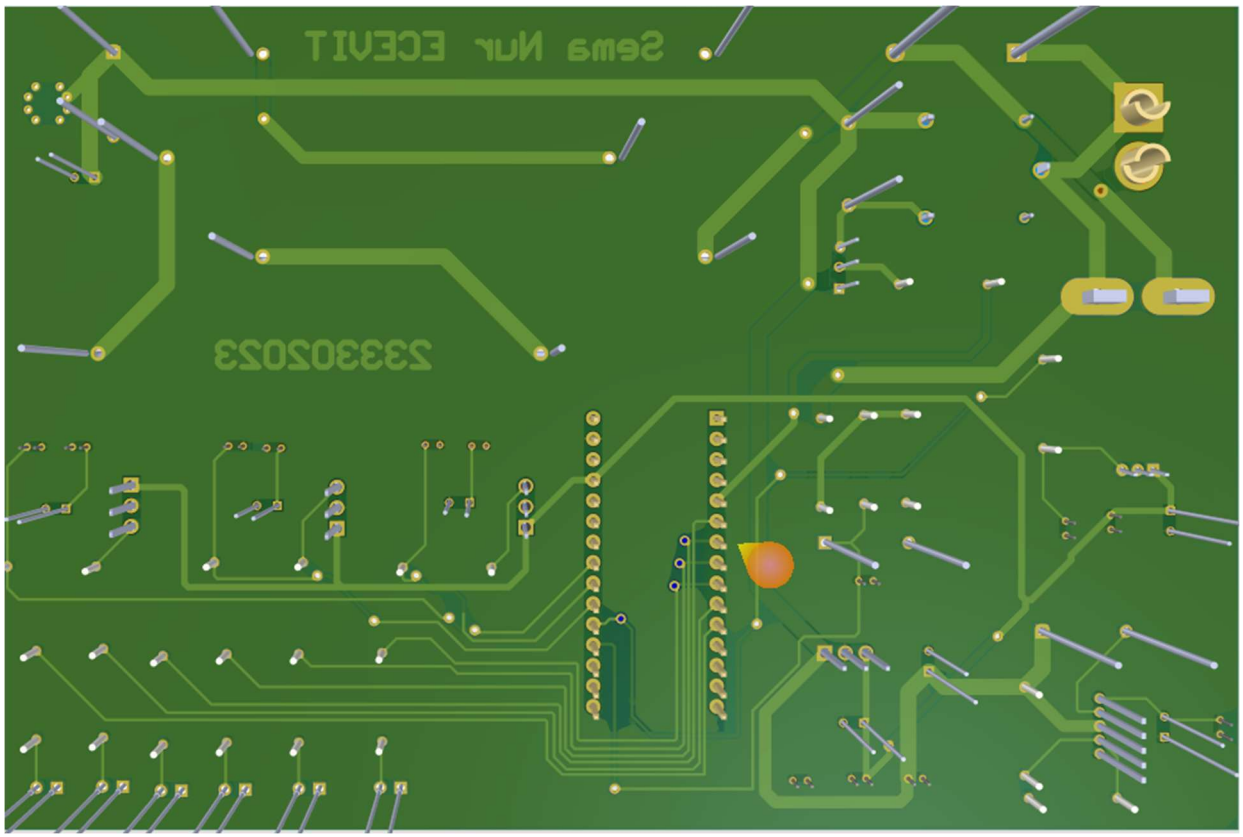
Şekil 8. Baskı devre tasarımının bileşen yerleşim planı



Şekil 9. Baskı devre tasarımının hat (iz) yönlendirmesi görünümü



Şekil 10. Devrenin 3 boyutlu (3D) model ön yüz görünümü



Şekil 11. Devrenin 3 boyutlu (3D) model arka yüz görünüm

KAYNAKÇA

[1] Design of Battery Management System for Electric Vehicles — B. Padmanabhan, R. Dutta, S. Harb, 2019 Ev ölçeğinde BMS mimarisi; paket düzeyi V/I/T izleme, koruma zinciri ve donanım kararlılığı. https://ieeexplore.ieee.org/document/8782576

[2] A Low Cost Microcontroller Based Battery Monitoring System — H. Jung, S. Lee, J. Kim, 2019 Düşük maliyetli MCU tabanlı prototip; eşik/histerezis + LED bildirimi + donanım korumaları ile hızlı uygulama. https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2066

[3] Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles — Y. Xing, E.W.M. Ma, K.-L. Tsui, M. Pecht, 2011 BMS yapıtaşları ve tipik koruma/izleme stratejileri; mimari çerçeve. https://www.mdpi.com/1996-1073/4/11/1840

[4] Li Ion Battery Safety Management: Thermal and Electrical Aspects — Z. Xu, Y. Ouyang, X. Wang, 2020 Güvenlik perspektifi; aşırı V/I/T senaryoları ve "sürekli gözetim" gereği. https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1307

[5] Hall Effect Current Sensors for High Current Applications — R. Teodorescu, et al., 2021 Hall akım sensörlerinin galvanik izolasyon, düşük kayıp ve EMI bağışıklığı avantajları. https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4844

[6] Battery Thermal Management Systems for Electric Vehicles — A. Jarrett, X.Y. Yao, 2018 BTMS ilkeleri; zorlanmış konveksiyonla (fan) yüzey sıcaklığı düşürme ve kararlı işletim. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117321800.

[7] Xu, Z.; Ouyang, Y.; Wang, X. "Li-Ion Battery Safety Management: Thermal and Electrical Aspects," Energies, 13(5), 1307, 2020. https://www.mdpi.com/1996-1073/4/11/1840

[8] Jung, H.; Lee, S.; Kim, J. "A Low-Cost Microcontroller-Based Battery Monitoring System," Sensors, 19(9), 2066, 2019. https://doi.org/10.3390/s19092066

[9] Hannan, M. A.; Lipu, M. S. H.; Hussain, A.; Mohamed, A. "A review of Li-ion battery SoC estimation and BMS," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 834–854, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001

[10] Lu, L.; Han, X.; Li, J.; Hua, J.; Ouyang, M. "A review on the key issues for Li-ion battery management," Journal of Power Sources, 226, 272–288, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060

[11] Teodorescu, R.; et al. "Hall Effect Current Sensors for High-Current Applications," Sensors, 21(14), 4844, 2021. https://doi.org/10.3390/s21144844.

[12] Horowitz, P.; Hill, W. The Art of Electronics, 3rd ed., Cambridge UNIVERSITY Press, 2015. (Inductive loads and snubbers bölümü)

[13] Jarrett, A.; Yao, X. Y. "Battery thermal management systems for electric vehicles," Applied Thermal Engineering, 129, 1101–1116, 2018. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.073

[14] Ma, Y.; et al. "Noise Reduction in Temperature Sensor Interface," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 68(10), 4018–4026, 2019.
https://ieeexplore.ieee.org/document/8685600

DC-DC BUCK CONVERTER DEVRESİ

Mustafa Samed AKYAZI[1], Mehmet Emin KIZILKAYA[2], Hasan ERDEM[3]

Abstract – Bu makale, 36V ila 54V arasındaki değişken giriş gerilimini, 10A maksimum yük akımında (360W) sabit 36V çıkış gerilimine dönüştüren yüksek güçlü bir DC-DC düşürücü dönüştürücünün (buck converter) tasarımını ve analizini sunmaktadır. Yüksek verimlilik (%95 hedef) sağlamak ve standart diyot kullanımındaki kayıpları en aza indirmek amacıyla, 150 kHz anahtarlama frekansında çalışan N-Kanal MOSFET'li senkron bir topoloji tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında, sistemin Sürekli Akım Modunda (CCM) kararlı çalışmasını garanti altına alan görev döngüsü (%66.7 - %100) ve kritik bobin (48 µH) hesaplamaları detaylandırılmıştır. Ayrıca, yüksek RMS akım dalgalanmalarını (girişte 4.71A) ve gerilim streslerini (100V sınıfı) yönetebilmek için MOSFET'ler ile seramik (MLCC) ve polimer kapasitörlerin hibrit kullanımını içeren bileşen seçimi metodolojisi açıklanmıştır. Bu çalışma, teorik hesaplamalara dayanarak geliştirilen tam devre şematiğini ve PCB (Baskı Devre Kartı) tasarımını içermekte ve endüstriyel uygulamalar için eksiksiz bir senkron dönüştürücü tasarım metodolojisi ortaya koymaktadır.

Keywords – MOSFET, Güç elektroniği

GİRİŞ

Güç elektroniği dönüştürücüleri, modern teknolojik sistemlerin verimli ve güvenilir çalışmasında temel bir rol oynamaktadır. Bu sistemler içerisinde, DC-DC dönüştürücüler; DC motor kontrolü, batarya şarj üniteleri, telekomünikasyon güç kaynakları, adaptörler ve LED aydınlatma sistemleri gibi çok geniş bir uygulama yelpazesinde, bir DC gerilim seviyesini farklı bir DC gerilim seviyesine dönüştürmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu topolojiler arasında, düşürücü (buck) dönüştürücü, yüksek bir giriş gerilimini verimli bir şekilde daha düşük ve kararlı (regüleli) bir çıkış gerilimine indirme kabiliyeti nedeniyle öne çıkmaktadır. Ancak, 10A (360W) gibi yüksek çıkış akımı gerektiren uygulamalarda, standart bir buck dönüştürücüde kullanılan diyot üzerindeki iletim kayıpları, sistemin toplam verimliliğini ciddi şekilde düşürmektedir. Bu kayıpları en aza indirmek ve termal yönetimi iyileştirmek için senkron (synchronous) topolojilerin kullanılması bir endüstri standardı haline gelmiştir. Bu makale, 36V ile 54V arasındaki değişken giriş gerilimini, 10A maksimum yük akımında sabit 36V çıkışa dönüştüren yüksek verimli bir senkron DC-DC düşürücü dönüştürücünün tasarımını ve analizini sunmaktadır. %95 verimlilik hedefiyle, 150 kHz anahtarlama frekansında çalışan sistem için görev döngüsü aralığı (%66.7 - %100) ve Sürekli Akım Modu (CCM) çalışmasını garanti altına alan kritik pasif bileşen (bobin ve kapasitör) hesaplamaları detaylandırılmıştır. Makalenin ilerleyen bölümlerinde, dönüştürücünün çalışma prensibi, tasarım metodolojisi, anahtarlama elemanı (MOSFET) seçimi, devre şematiği ve PCB tasarımı sunulmuştur.

MATERIALS AND METHOD

Temel Parametreler:
Giriş gerilimi : 36V - 54V
Çıkış gerilimi : 36V(sabit)
Maksimum çıkış akımı :10A
Çıkış Gücü : 360W
Varsayılan Verim : %95 (Yüksek güçlü senkron tasarım için gerçekçi bir hedeftir.)
Anahtarlama Frekansı: 150k Hz
Not: Bu güç seviyesinde, anahtarlama kayıplarını düşük tutmak için frekans çok yükseltilmemelidir. 150kHz frekans, verimlilik ve bobin boyutu arasında iyi bir dengededir.

Görev Döngüsü (Duty CYCLE, D)

Görev Döngüsü $D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ formülü ile hesaplanır.

Maksimum Görev Döngüsü $(D_{\max})$ En düşük V_{in} değerinde:

$$D_{\max} = \frac{V_{out}}{V_{in,\min}} = \frac{36V}{36V} = 1$$

(Teorik olarak%100)

Minimum Görev Döngüsü $(D_{\min})$ En yüksek V_{in} değerinde:

$$D_{\min} = \frac{V_{out}}{V_{in,\max}} = \frac{36V}{54V} = 0.667(\%66.7)$$

Devremiz teorikte, giriş 54V iken %66.7 Görev Döngüsü ile, giriş değeri 36V'a yaklaştıkça %100'e yaklaşan bir Görev Döngüsü ile çalışacaktır.

Bobin (Inductor, L)

Bobin, devrenin Sürekli Akım Modunda (CCM) çalışmasını sağlamalıdır. Bobin Akım Dalgalanması (ΔI_L) genellikle maksimum çıkış akımının %20 ile %40 arasında seçilir. Bu devrede %30 olarak hedeflenmiştir.

Hedef Akım Dalgalanması (ΔI_L) : $\Delta I_L = I_{out,\max} \times 0.30 = 10A \times 0.30 = 3A$

En yüksek akım dalgalanması, $V_{in,\max}$ durumunda oluşur ($D_{\min}$ değerinde).

$$L = \frac{V_{out} \times (1 - D_{\min})}{f_{sw} \times \Delta I_L} = \frac{36 \times (1 - 0.667)}{150kHz \times 3A} = \frac{11.988}{450k}$$

$$L = 26.64\mu H$$

Seçim: Standart bir değer olan $27\mu H$ veya $33\mu H$ seçilebilir.

$33\mu H$ seçmek dalgalanmayı biraz daha azaltarak daha güvenli bir CCM çalışmasını sağlar.

Bobin Zirve Akımı $(I_{L,peak})$: Bobinin doyuma (saturasyon) girmemesi için bu akımın bilinmesi gerekir.

Bobin Ortalama Akımı $I_{L,avg} = I_{out} = 10A$

$$I_{L,peak} = I_{L,avg} + (\frac{\Delta I_L}{2})$$

Yeni $L = 33\mu H$ ile ΔI_L'yi tekrar hesaplayalım:

$$\Delta I_L = \frac{V_{out} \times (1 - D_{\min})}{f_{sw} \times L} = \frac{11.988}{150kHz \times 33\mu H} = 2.42A$$

$$I_{L,peak} = 10A + (\frac{2.42}{2}) = 11.21A$$

Kritik Bobin Parametreleri:

Endüktans: $L = 33\mu H$

Doyma Akımı (I_{sat}) : $I_{L,peak}$' ten en az %30 yüksek olmalıdır.

$$I_{sat} > [(I_{L,peak} \times 0.30) + I_{L,peak}] \quad I_{sat} > 14.573$$

DC Direnci (DCR): 360W değerinde kayıplar kritiktir. 10A'de ısınmayı $(P = I^2 \times R)$ önlemek için DCR çok düşük olmalıdır (örneğin: DCR< $10m\Omega$).

Anahtarlama Elemanları
Bu senkron bir tasarım olduğu için iki adet N-Kanal MOSFET kullanılmıştır.
Q_1
(High-Side / Üst): Ana anahtar.
Q_2 (Low-Side / Alt): Senkron düzeltici (diyot yerine).
Gerilim Sınıfı (V_{DS}) : Her iki MOSFET de kapalıyken maksimum giriş gerilimini $(V_{in,\max} = 54V)$ görmelidir.
$V_{DS,rating} >= 54V \times 1.3 = 70.2V$
Piyasada bulunan standart 80V veya 100V N-Kanal MOSFET'ler seçilmelidir.
MOSFET RMS Akımları:
Q_1 (High-Side) RMS Akımı: $I_{Q_{1,RMS}} = I_{out} \times \sqrt{D}$ (En kötü durum $D_{\max} \approx 1$,dir.)
$I_{Q_{1,RMS}} \approx 10A \times \sqrt{1} \approx 10A$

Q_2 (Low-Side) RMS Akımı: $I_{Q_{2,RMS}} \approx I_{out} \times \sqrt{1-D}$ (En kötü durum $D_{\min} = 0.667$,dir)
$I_{Q_{2,RMS}} \approx 10A \times \sqrt{1-0.667} = 10A \times \sqrt{0.333} \approx 5.77A$

Kritik MOSFET Parametresi $(R_{DS,(on)})$:

En büyük kayıp iletim kaybıdır. $(P = I_{RMS}{}^2 \times R_{DS,(on)})$ Q_1 daha yüksek RMS akıma maruz kaldığından onun $R_{DS,(on)}$ değeri daha kritiktir. 360W güçte, her iki MOSFET içinde çok düşük $R_{DS,(on)}$ değerleri hedeflenmektedir $(örneğin < 10m\Omega)$. Bu nedenle iyi bir soğutucu (heatsink) gerekecektir.

Giriş Kondansatörü (C_{in})

Giriş kondansatörü, Q_1 MOSFETİ'nin anahtarlama anında çektiği darbeli akımı sağlar. Bu devredeki en yüksek RMS akımına maruz kalan komponentlerden biridir.

Giriş RMS Akımı için $(I_{c_{in,RMS}} \approx I_{out} \times \sqrt{D \times (1-D)})$ en kötü durum D=0.5'te olur. Bizim aralığımız ($D = 0.667$ ila $D = 1.0$) dışındadır. En kötü durumumuz $D = 0.667$ 'te olacaktır.
$I_{c_{in,RMS}} = 10A \times \sqrt{0.667 \times (1-0.6679} = 10A \times \sqrt{0.222} \approx 4.71A$

Seçim: Bu 4.71A'lik RMS akımını kaldırabilen, düşük ESR'li kapasitörler gereklidir. Sadece elektrolitik kapasitörler bu akımda aşırı ısınır.
Seramik(MLCC): 5 adet $4.7\mu F / 100V$ (X7R) (Ana RMS akımını bunlar karşılamalıdır.)
Bulk(polimer/Elektrolitik): 1 adet $100\mu F / 80V$ (düşük frekanslı destek için) Gerilim Sınıfı: $V_{in,\max} = 54V$ için $80V$ veya $100V$ seçilmelidir.

Çıkış Kondansatörü (C_{out})

Çıkış kondansatörü, bobinden gelen 2,42A'lik akım dalgalanmasını filtreler ve yük değişimlerine (transient) yanıt verir.

Hedef Gerilim Dalgalanması (ΔV_{out}) : çıkışta %1'lik bir dalgalanma hedeflenmiştir.

$\Delta V_{out} = 36V \times 0.01 = 0.36V$

$$C_{out,\min} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_{sw} \times \Delta V_{out}} = \frac{2.42A}{8 \times 150kHz \times 0.36V} \approx 5.6\mu F$$

Minimum Kapasitans:

Not: Bu değer yanıltıcı derecede düşüktür. Bu sadece dalgalanmayı karşılar. Asıl işlevi yük değişimlerini (transiet response) karşılamaktır.

ESR (Eşdeğer Seri Direnç) Etkisi: Dalgalanmanın çoğu ESR'den kaynaklanır.

$\Delta V_{out,ESR} = \Delta I_L \times ESR$

$$ESR_{\max} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L} = \frac{0.36V}{2.42A} \approx 148m\Omega$$

Pratik Seçim: 10A'lik bir çıkış için hem yüksek frekanslı gürültüyü (MLCC) hem de ani yük taleplerini (Bulk) karşılayacak bir kombinasyon gerekir.

Seramik(MLCC): 4 adet $10\mu F / 50V$ (X7R) (düşük ESR ve yüksek frekans performansı için).

Bulk(polimer/Elektrolitik): 2adet $330\mu F / 50V$ (düşük ESR'li polimer veya elektrolitik kapasitörler).

Gerilim Sınıfı: $V_{out} = 36V$ için $50V$ veya $63V$ seçilmelidir.

Kontrolcü (Controller IC)

Bu tasarım için, iki harici N-Kanal MOSFET'i sürebilen Senkron Buck Kontrolcüsü gereklidir.

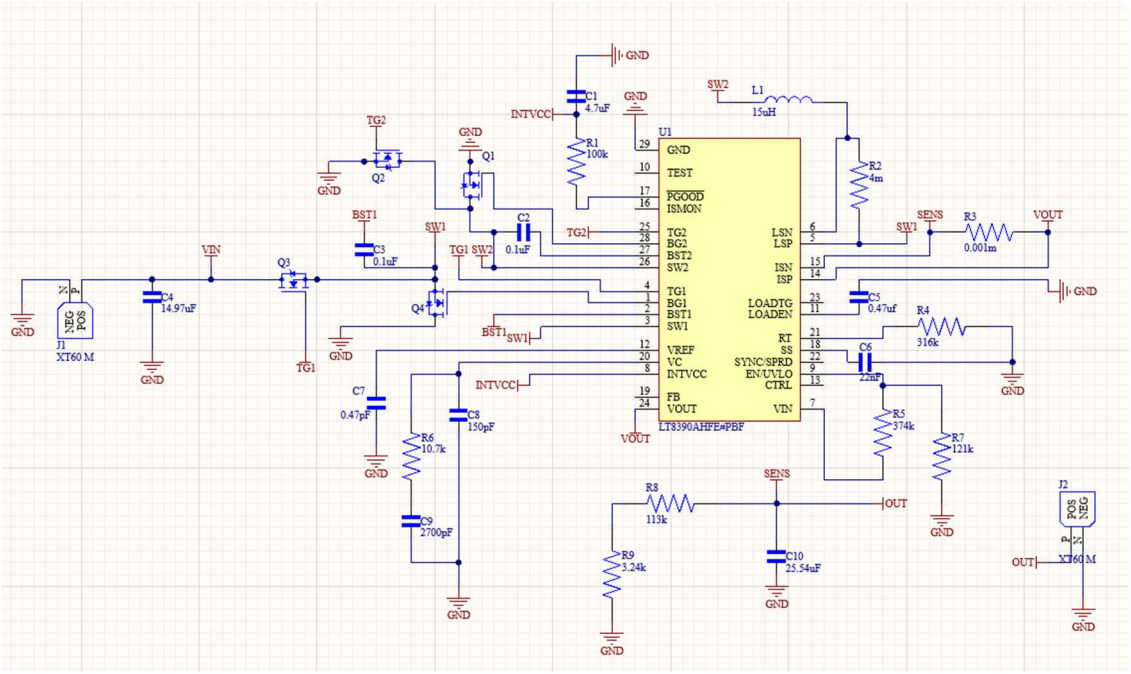
Giriş gerilimi (V_{in}) 54V'u (veya daha fazlasını) desteklemelidir. Senkron (Sync) sürüşü yapabilmelidir.

Harici komponentlerde geri besleme (Feedback) ve akımı algılama (Current Sense) ayarı yapabilmelidir.

Tasarım ve Simülasyon Araçları

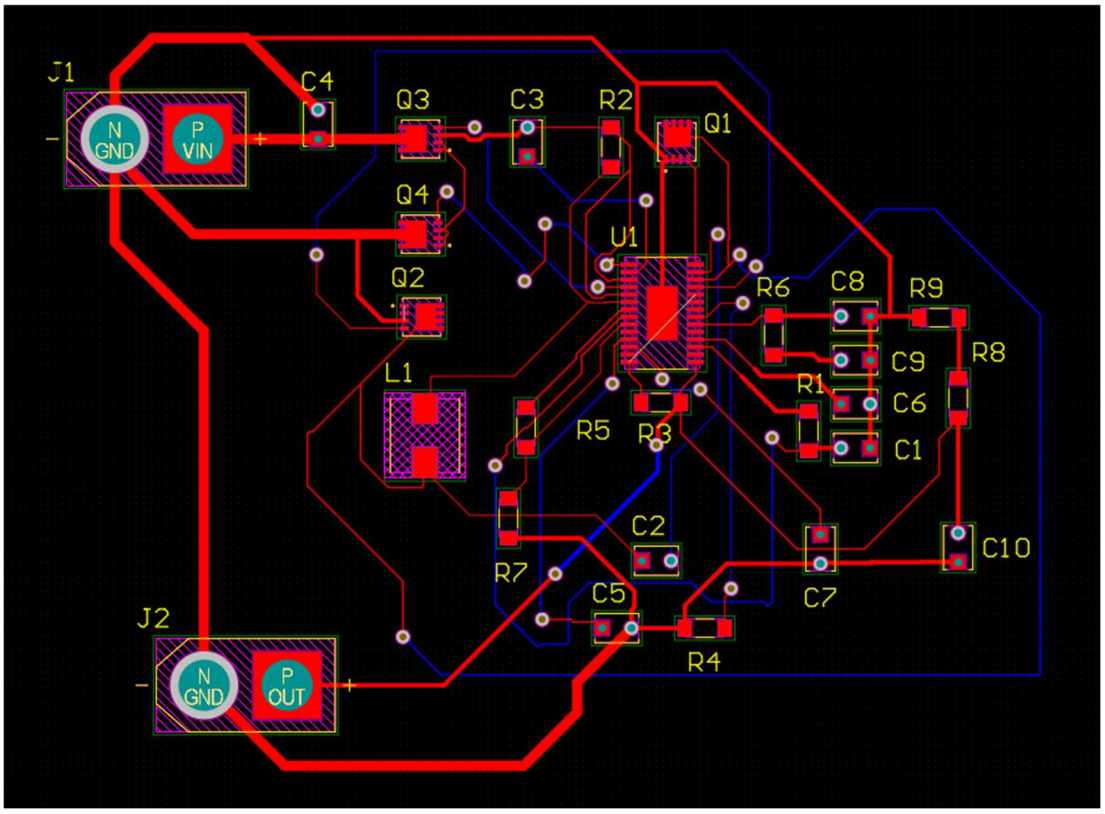
Devre şematiği ve PCB tasarımı Altium Designer programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Devrenin simülasyonu ise LTspice programı üzerinden yapılmıştır. Devrenin şematik tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



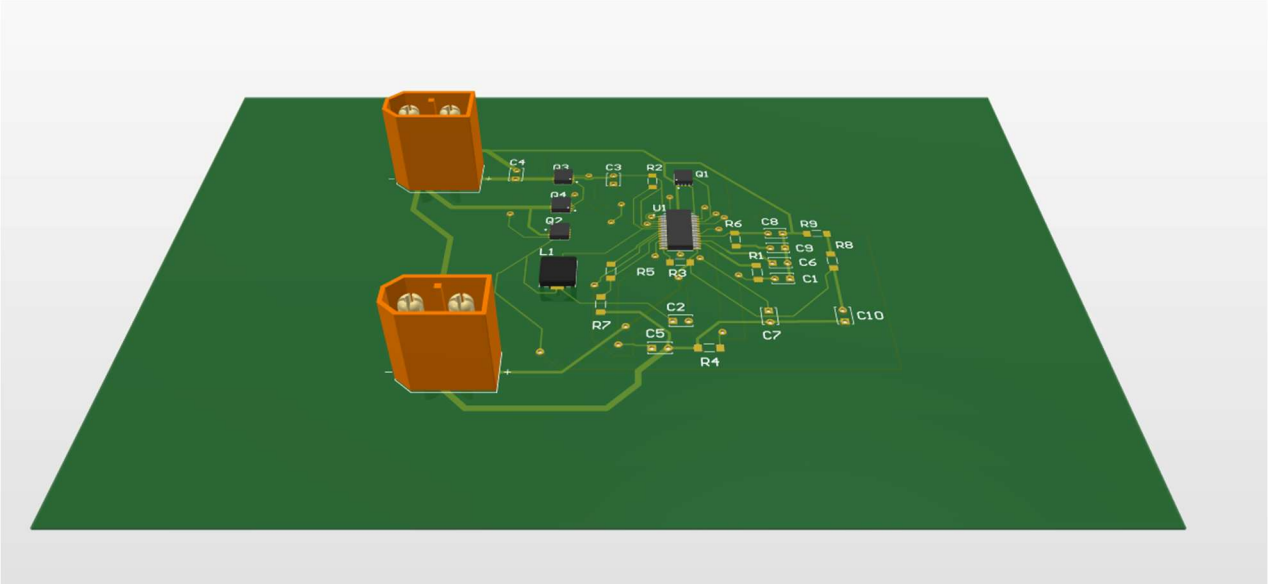
Şekil 1. Devrenin şematik tasarımı

Devrenin PCB tasarımı Şekil 2'de gösterilmiştir.



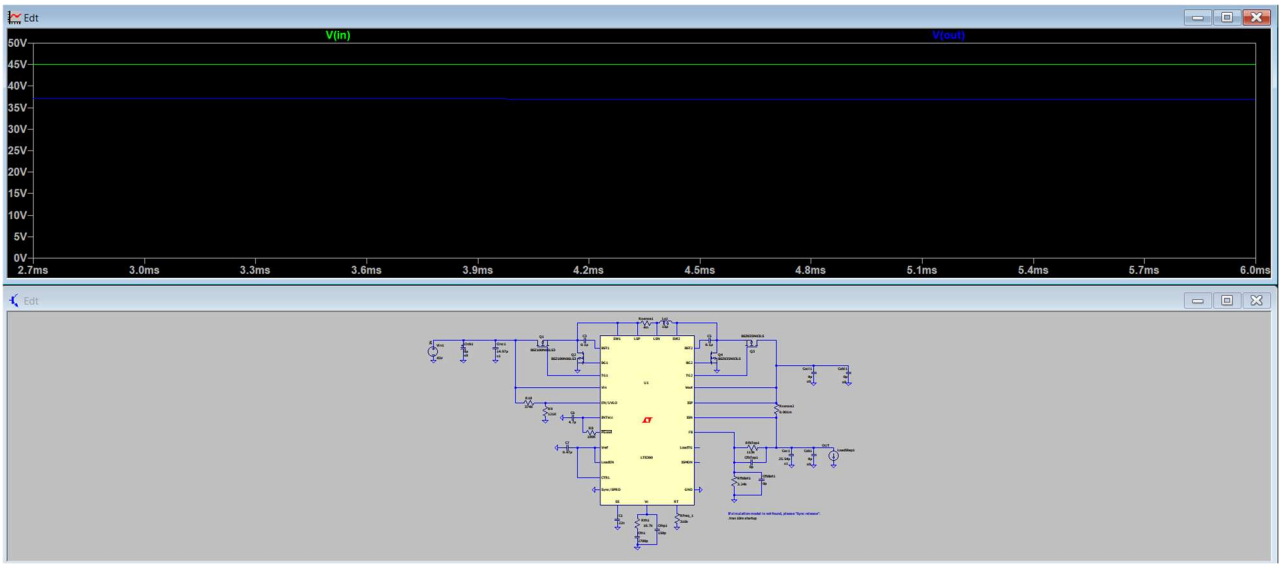
Şekil 2. Devrenin PCB tasarımı

Devrenin 3D modellemesi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Devrenin 3D modellemesi

Devrenin simülasyonu Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Devrenin simülasyon görüntüsü

RESULTS AND DISCUSSIONS

Bu çalışmada tasarlanan 360W senkron düşürücü dönüştürücünün performansı LTspice ortamında yapılan benzetimler ile doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçları, dönüştürücünün 10A tam yük altında hedeflenen 36V sabit çıkış gerilimini başarıyla sağladığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, çıkış geriliminin hedeflenen 36V nominal değere hızla ulaştığını ve kararlı bir şekilde bu seviyede kaldığını (regülasyonu sağladığını) göstermektedir. Bu durum, kontrol döngüsünün ve belirlenen tasarım parametrelerinin beklendiği gibi çalıştığını doğrulamaktadır.Çıkış gerilimi daha detaylı incelendiğinde, gerilim dalgalanmasının (ripple) durumu analiz edilmiştir. Tasarımda %1'lik (360mV) bir dalgalanma hedeflenmişti. Benzetim sonuçları, çıkış dalgalanmasının bu hedeflenen teorik değer ile

yüksek uyum içinde olduğunu ve bu kritik sınırı aşmadığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, seçilen çıkış kapasitörlerinin ESR ve kapasitans değerlerinin, 150 kHz'lik anahtarlama gürültüsünü filtrelemede başarılı olduğunu kanıtlamaktadır.

REFERENCES

[1] G. Dileep and S. N. Singh, "Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 76, no. March, pp. 1230–1247, 2017.

[2] U. S. Ali, "Z-source DC-DC Converter with Fuzzy Logic MPPT Control for Photovoltaic Applications," Energy Procedia, vol. 90, no. December 2015, pp. 163–170, 2016.

[3] M. H. Taghvaee, M. A. M. Radzi, S. M. Moosavain, H. Hizam, and M. Hamiruce Marhaban, "A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 17, pp. 216–227, 2013.

[4] D. G and S. N. Singh, "Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 76, no. August 2016, pp. 1230–1247, 2017.

[5] P. K. Jain, W. Thermal, P. Station, G. State, E. Corporation, and A. Kumar, "Interleaved DC to DC Buck Converter for Low Power Application," pp. 0–4, 2015.

[6] M. S. Ali, S. K. Kamarudin, M. S. Masdar, and A. Mohamed, "An Overview of Power Electronics Applications in Fuel Cell Systems : DC and AC Converters," Sci. World J., vol. 2014, pp. 1–9, 2014.

[7] M. K. Hossain and M. H. Ali, "Transient stability augmentation of PV/DFIG/SG-based hybrid power system by parallel-resonance bridge fault current limiter," Electr. Power Syst. Res., vol. 130, pp. 89–102, 2016.

[8]Binitha, P. M., Sanish Kumar T. G., 2013. Comparison of PWM and One Cycle Control for Switching Converters. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 3(4).

[9] Karaarslan, A., Iskender, I., 2005. Application of sliding control method to an arc welding and comparing its performance with that of conventional PI method. 3th International Conference on Electrical and Electronics Engineering.

[10] Karaarslan A., Iskender I., 2011. The analysis of AC-DC Boost PFC converter based on peak and hysteresis current control techniques. International Journal on TECHNICAL and Physical Problems of Engineering (IJTPE), 3(7), No. 2.

[11] Karaarslan A., 2013. The analysis of average Sliding Control Method Applied on Sheppard-Taylor Power Factor Correction Converter. Electrical Engineering, 95(3), 255-265.

36-54V GİRİŞ ARALIĞINDA SABİT 36V 10A ÇIKIŞ VEREN SENKRON BUCK-BOOST KONVERTÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Hakan TERZİOĞLU[1*], Berat ALTINIŞIK[2], Ömer HAKTANIR[3]

[1*] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[3] *Department of Electric Electronic Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[1*]*(hterzioglu@selcuk.edu.tr)*

[2]*(233302042@ogr.selcuk.edu.tr)*

[3]*(233302045@ogr.selcuk.edu.tr)*

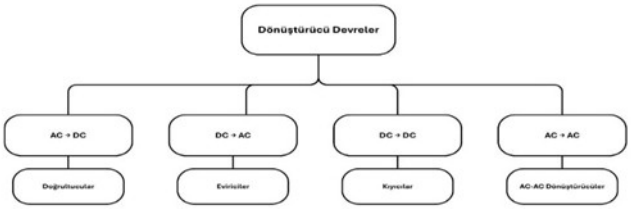
Özet- Bu çalışmada, giriş gerilimi 36V ile 54V arasında değişen endüstriyel sistemler ve güç kaynakları için çıkış gerilimini sabit 36V seviyesinde ve 10A akım kapasitesinde tutabilen bir DC-DC Buck-Boost konvertör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Güç elektroniği uygulamalarında verimliliğin, ısıl kararlılığın ve voltaj regülasyonunun önemi göz önüne alınarak, sistemin kontrol katında geniş giriş voltajı aralığına ve yüksek verimliliğe sahip LT8390 entegresi tercih edilmiştir. Tasarlanan devre, LTSpice ortamında farklı giriş gerilim senaryoları altında simüle edilmiş, sistemin dinamik tepkileri ve kararlılığı analiz edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, tasarlanan topolojinin değişken giriş koşullarında dahi çıkış gerilimini istenilen seviyede regüle edebildiğini ve yüksek akım yüklerinde kararlı çalıştığını göstermektedir. Ayrıca sistemin fiziksel gerçekleşebilirliği açısından PCB tasarımı ve maliyet analizi de çalışma kapsamında sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *DC-DC Konvertör, Buck-Boost, LT8390, Güç Elektroniği, Voltaj Regülasyonu.*

GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel uygulamalardan telekomünikasyon sistemlerine kadar geniş bir yelpazede, enerji kaynaklarından elde edilen gerilimin yükün gereksinimlerine uygun hale getirilmesi kritik bir önem taşımaktadır. Elektrik enerjisinin formunu veya seviyesini değiştiren dönüştürücü devreler, modern güç sistemlerinin verimli, güvenli ve kararlı çalışmasını sağlayan temel yapı taşlarıdır. Özellikle batarya destekli sistemlerde veya yenilenebilir enerji kaynaklarında görülen gerilim dalgalanmaları, yükün zarar görmemesi ve sistemin sürekliliği için hassas bir regülasyon gerektirmektedir. Bu tür değişken kaynaklı sistemlerde, giriş geriliminin istenen çıkış geriliminin altına düşebildiği veya üstüne çıkabildiği durumlar için Buck-Boost (Alçaltıcı-Yükseltici) topolojisi zorunlu hale gelmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, gerilim regülasyonu için çeşitli kontrol entegreleri ve anahtarlama elemanlarının kullanıldığı görülmektedir. Ancak yüksek akım uygulamalarında, anahtarlama kayıplarının minimize edilmesi ve termal yönetimin sağlanması tasarımın en zorlu parametrelerini oluşturmaktadır. Geleneksel diyotlu yapılar yerine senkron düzeltme (synchronous rectification) tekniklerinin kullanılması, verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, 36V-54V aralığındaki değişken bir DC giriş gerilimini, endüstriyel standartlarda sıkça ihtiyaç duyulan sabit 36V ve 10A çıkış değerlerine regüle eden, yüksek verimli ve 4 anahtarlı senkron bir güç katı tasarlamaktır. Şekil 1'de, güç elektroniğinde kullanılan temel dönüştürücü tiplerinin genel sınıflandırması verilmiştir.

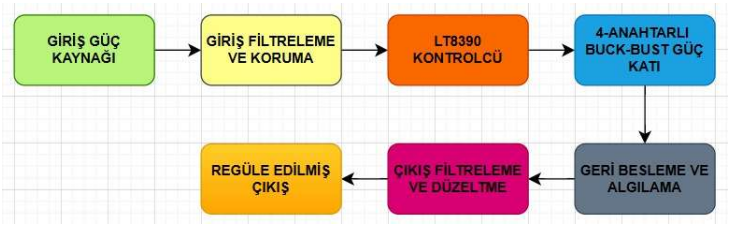


Şekil 1. Dönüştürücü devrelere ait şema

Çalışma kapsamında, Analog Devices tarafından geliştirilen LT8390 kontrolcüsü temel alınarak bir devre mimarisi oluşturulmuştur. İlk aşamada sistemin teorik hesaplamaları ve bileşen seçimleri yapılmış, ardından LTSpice programı kullanılarak devre modellemesi ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise sistemin fiziksel baskı devre kartı (PCB) tasarımı yapılarak maliyet analizi sunulmuştur.

MATERYAL VE YÖNTEM

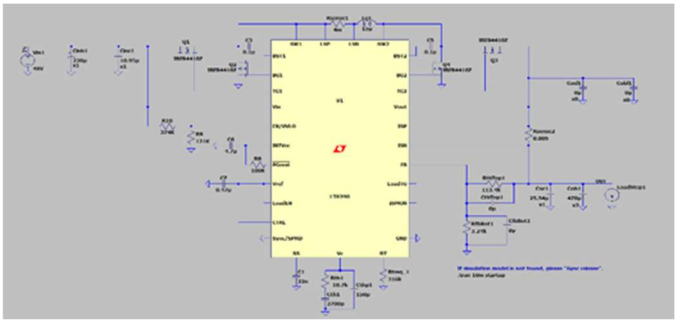
Bu çalışmada tasarlanan güç dönüştürücü sistemi; giriş filtresi, güç anahtarlama katı, kontrol devresi ve çıkış filtresi olmak üzere dört ana fonksiyonel bloktan oluşmaktadır. Sistemin temel işlevi, simülasyon ortamında doğrulandığı üzere, 36-54V aralığındaki girişi regüle ederek 360W gücünde kararlı bir çıkış sağlamaktır. Sistemin genel yapısını gösteren blok diyagram Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Sistemin Blog Diyagramı

Devre tasarımının merkezinde, geniş çalışma aralığı ve yüksek entegrasyon yeteneği nedeniyle LT8390 senkron 4-anahtarlı Buck-Boost kontrolcüsü kullanılmıştır. Bu entegrenin seçilmesindeki temel etkenler; 4V'tan 60V'a kadar uzanan geniş giriş gerilim aralığı, 150kHz ile 650kHz arasında ayarlanabilir anahtarlama frekansı ve hem giriş hem de çıkış akımını izleyebilme yeteneğidir. Entegre, harici MOSFET sürücülerine ihtiyaç duymadan, bünyesindeki bootstrap devreleri sayesinde hem "low-side" hem de "high-side" anahtarlamayı gerçekleştirebilmektedir. Güç katında anahtarlama elemanı olarak IRFB4410Z kodlu N-kanal MOSFET'ler tercih edilmiştir. Bu MOSFET'in seçilmesinde, 100V'luk dren-kaynak gerilim dayanımı (Vdss) ve düşük iletim direnci gibi parametreler etkili olmuştur. Düşük iletim direnci, özellikle 10A gibi yüksek akım değerlerinde oluşacak iletim kayıplarını minimize ederek sistem verimliliğine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Sistemin kararlı çalışması için kritik pasif bileşenlerin değerleri, teorik hesaplamalar ve üretici verileri ışığında belirlenmiştir. Anahtarlama frekansı, sistem verimliliği ve bileşen boyutları arasındaki optimizasyon gözetilerek belirlenmiş ve buna uygun frekans ayar direnci (Rfreq) devreye eklenmiştir. Akım kontrol modu (current-mode control) ile çalışan sistemde, bobin akımını anlık olarak izlemek için 4 mOhm değerinde bir algılama direnci (Rsense1) kullanılırken, çıkış akımını 10A seviyesinde sınırlandırmak için 5 mOhm değerinde ikinci bir algılama direnci (Rsense2) kullanılmıştır. Enerji depolama elemanı olarak ise, hem Buck hem de Boost modlarında oluşacak akım dalgalanmasını kabul edilebilir sınırlar içinde tutacak ve doyuma ulaşmadan 10A üzeri akımları taşıyabilecek 1.5µH değerinde bir güç indüktörü sisteme entegre edilmiştir. Tasarlanan devrenin LTSpice ortamındaki tam şeması Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Devrenin Tam Şeması

Devrenin doğrulanması amacıyla kullanılan LTSpice simülasyon yazılımında, sistemin karşılaşabileceği minimum (36V), nominal (45V) ve maksimum (54V) giriş gerilim değerleri için ayrı ayrı senaryolar oluşturulmuş ve çıkışın geçici hal tepkisi incelenmiştir.

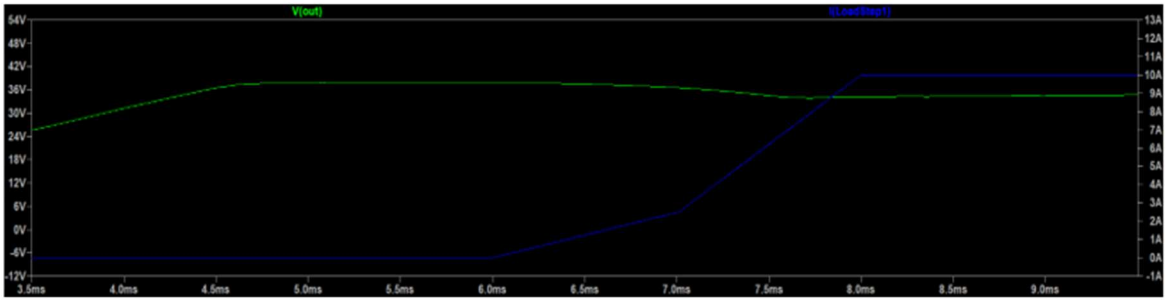
BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarlanan Buck-Boost konvertör devresinin performansı, belirlenen üç farklı giriş gerilim senaryosu altında analiz edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen veriler, devrenin giriş gerilimindeki değişimlere rağmen çıkış gerilimini ve akımını hedeflenen değerlerde tutabildiğini göstermektedir.

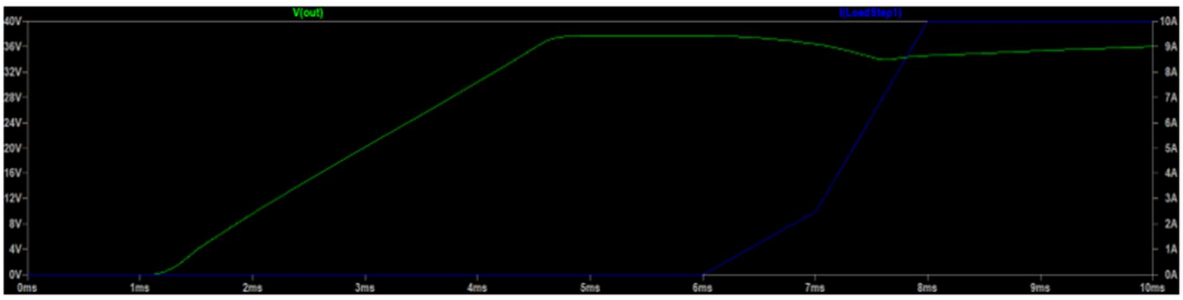
İlk senaryo olan minimum giriş gerilimi (36V) durumunda, giriş ve çıkış gerilimlerinin birbirine eşit veya çok yakın olduğu bir çalışma bölgesi söz konusudur. Bu durumda yapılan analizde, devrenin "Soft-Start" (Yumuşak Başlangıç) özelliği sayesinde açılış anında ani akım çekişlerinin engellendiği gözlemlenmiştir. Simülasyon verileri, çıkış voltajının yaklaşık 8ms süresinde 36V seviyesine oturduğunu ve yük akımının 10A seviyesinde sabitlendiğini göstermektedir. Bu senaryo, devrenin geçiş bölgesindeki (buck-boost transition region) kararlılığını kanıtlamaktadır.

Nominal çalışma gerilimi olan 45V giriş uygulandığında, sistem ağırlıklı olarak Buck (düşürücü) moduna yakın çalışmaktadır. Bu senaryoda çıkış gerilimindeki dalgalanmanın (ripple) minimize olduğu ve sistemin kararlı hale gelme süresinin 7-8ms bandında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Giriş geriliminin maksimum değer olan 54V'a çıkarıldığı son senaryoda ise, kontrolcü görev döngüsünü (duty cycle) otomatik olarak ayarlayarak çıkış gerilimini 36V'ta, çıkış akımını ise 10A'de başarıyla sabitlemiştir. Tüm senaryolarda elde edilen grafikler Şekil 4'te toplu olarak sunulmuştur.

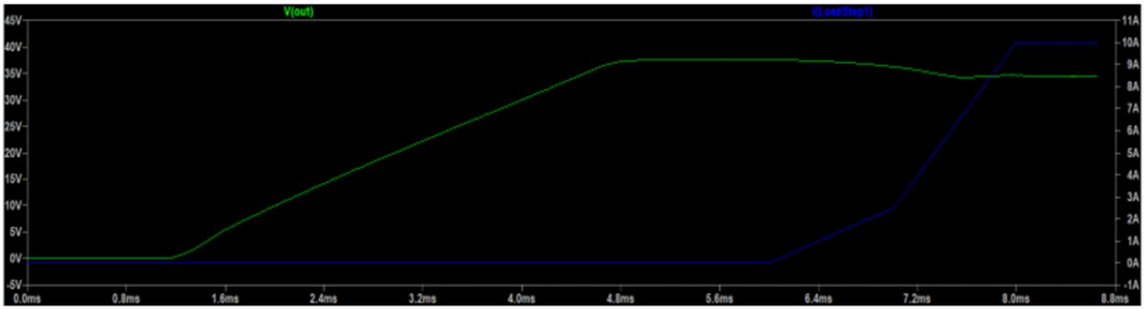
İlk değer olan Vin=36V değeri verildiğinde görülen Vout ve Iout değerleri.

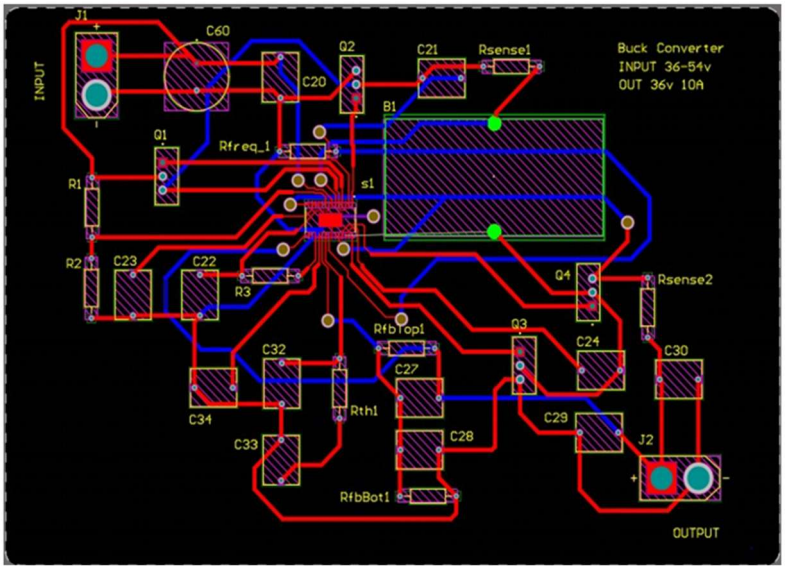


Nominal değer olan Vin= 45V ile görülen Vout ve Iout değerleri.



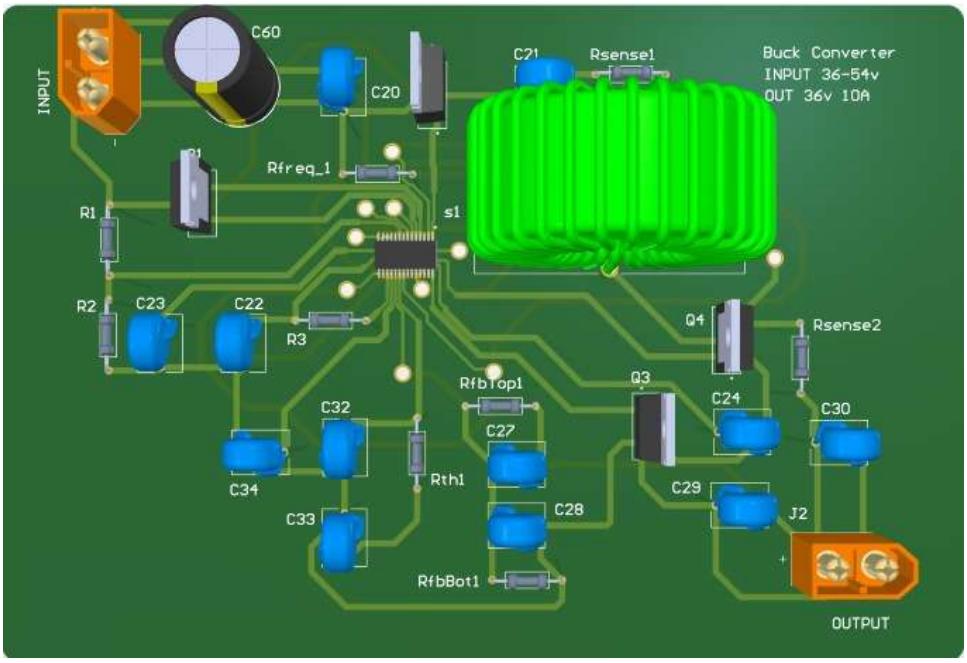
Maksimum giriş gerilim değeri olan Vin= 54V ile görülen Vout ve Iout değerleri





Şekil 4. Devrenin Simülasyon Görüntüleri

Simülasyon doğrulamasının ardından sistemin endüstriyel uygulanabilirliği için Altium Designer programı kullanılarak PCB tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında, yüksek akım taşıyan yolların geniş tutulmasına ve güç bileşenlerinin yerleşiminde termal dağılımın homojen olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan maliyet analizinde, ana kontrolcü entegresi, güç MOSFET'leri ve güç bobininin maliyetin ana kalemlerini oluşturduğu görülmekle birlikte, toplam maliyetin elde edilen 360W'lık güç çıkışı ve performans göz önüne alındığında kabul edilebilir seviyelerde olduğu değerlendirilmiştir. Sistemin fiziksel tasarımı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Devrenin PCB Görüntüleri

SONUÇ

Bu çalışmada, 36-54V aralığındaki değişken DC giriş gerilimini, endüstriyel ve güç elektroniği uygulamalarında ihtiyaç duyulan sabit 36V 10A çıkış değerine dönüştüren bir Buck-Boost konvertör tasarımı, modellemesi ve analizi sunulmuştur. LT8390 kontrolcüsü ve IRFB4410Z güç anahtarları kullanılarak oluşturulan 4 anahtarlı senkron topoloji hem simülasyon ortamında hem de teorik analizlerde hedeflenen regülasyon kararlılığını başarıyla sağlamıştır.

Elde edilen bulgular, giriş geriliminin çıkış gerilimine yakın olduğu, altına düştüğü veya üzerine çıktığı değişken çalışma koşullarında, tasarlanan sistemin yüksek verimlilikle ve kesintisiz bir şekilde çıkış gücünü sağladığını doğrulamaktadır. Sistemin modüler yapısı ve geniş çalışma aralığı, farklı güç gereksinimlerine sahip projelerde de uyarlanarak kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

[1] S. Ekinci, B. Hekimoğlu, A. Demirören ve S. Kaya, "Harris Hawks Optimization Approach for Tuning of FOPID Controller in DC-DC Buck Converter," 2019.

[2] M. Irwanto, L. W. Zhe, B. Ismail ve M. Masri, "DC-DC boost converter circuit," ResearchGate, 2020.

[3] H. O. Ataç, "Buck Converter Nedir, Nasıl Çalışır?," *Mühendis Beyinler*, 4 Ocak 2019.

[4] XLSEMI, "XL4016 180 kHz 8A 36 V step-down DC/DC converter datasheet (Rev. 1.0)," 2016.

[5] Analog Devices, Inc., "LT8390: 60V Synchronous 4-Switch Buck-Boost Controller with Spread Spectrum (Rev. D)," 2021.

[6] Analog Devices, Inc., "LTspice Simulator Design Tools."

[7] Altium, "Altium Designer Installation and Management."

[8] Analog Devices, Inc., "LTpowerCAD Design Tool."

[9] e-komponent.com, "BD9306AFVM-TR Rohm - Entegre Devreler (IC)."

[10] Mouser Electronics, "ADI LT8390 Buck-Boost Controller."

[11] Diagrams.net, "Flowchart Maker & Online Diagram Software."

ELEKTROMANYETİK SİLAH PROJESİ

Ömer Burak KARADAĞ[1], Salih ASLAN[2], Mert AKCURA[3]

1 Elektrik-Elektronik Mühendislik Öğrencisi, Selcuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*
2 Elektrik-Elektronik Mühendislik Öğrencisi, Selcuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*
3 Elektrik-Elektronik Mühendislik Öğrencisi, Selcuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*

**(hterzioglu@selcuk.edu.tr)*

Özet – Elektromanyetik silahlar, modern savaş teknolojilerinde enerjiyi doğrudan kullanma ve elektronik sistemleri fiziksel hasar olmadan etkisiz hale getirme yetenekleriyle öne çıkar. Bu silahların arkasındaki teorik temel, yüklü parçacıkların çevresinde oluşturduğu elektromanyetik alandır. Duran yükler sadece elektrik alan oluştururken , hareket eden yükler hem elektrik hem de manyetik alanın etkilerini yaratır. Elektromanyetik alanın işleyişi; yükler arasındaki kuvveti tanımlayan Coulomb Yasası , akım geçen iletkenin çevresindeki manyetik alanı belirleyen Amper Yasası , manyetik akı değişimi ile elektrik akımı indüklenmesini açıklayan Faraday Yasası , ve hem elektrik hem de manyetik alanın birlikte oluşturduğu kuvveti tanımlayan Lorentz Yasası gibi temel fizik yasalarına dayanır. Manyetik alan yönü Sağ El Kuralı ve iletkene etki eden hareket yönü Sol El Kuralı ile bulunur.

Keywords – Savaş Teknolojileri

GİRİŞ

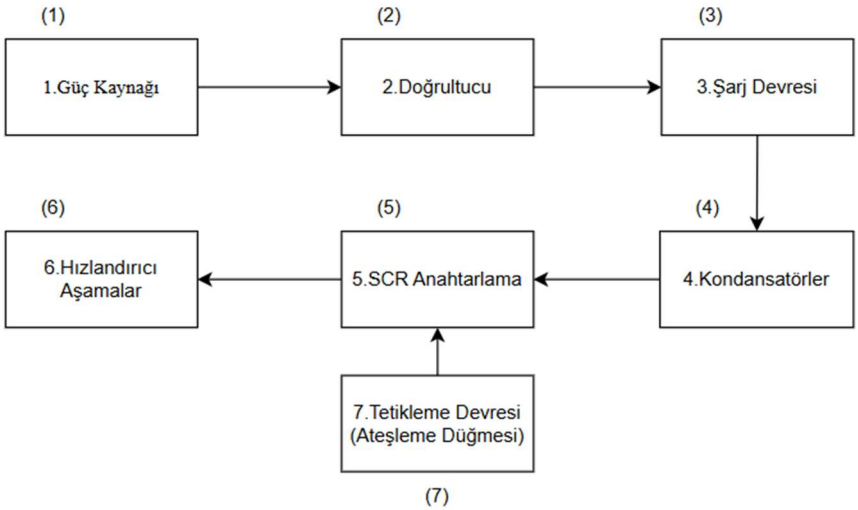
Elektromanyetik silahlar, enerjiyi doğrudan silah olarak kullanabilme ve elektronik sistemleri etkisiz hale getirme yetenekleri sayesinde modern savaş teknolojilerinde büyük önem taşımaktadır. Tarihsel gelişimine bakıldığında, ilk ilkel fırlatıcılardan (mancınıklar), 1918'de Louis Octave'ın lineer motora benzer elektrikli silah projesine kadar uzanır. 2. Dünya Savaşı sırasında Almanya'da uçaksavar olarak tekrar gündeme gelen fikir, Avustralyalı fizikçi Mark Oliphant'ın 1950'de dünyanın en büyük eşkutuplu jeneratörünü inşa etmesiyle teoriden pratiğe dökülmüştür. ABD, 1980'lerden itibaren bu alana ciddi yatırımlar yapmış, özellikle raylı fırlatıcılar üzerinde çalışmış ve 2018 yılında sesten 20 kat daha hızlı mermi atabilen elektromanyetik silah projelerini hedeflemiştir.
Bu silahların temel işleyişi, elektromanyetik alan kavramına dayanır; duran yükler elektrik alan (E) oluştururken, hareket eden yükler hem elektrik hem de manyetik alan (B) oluşturur. Elektromanyetizmanın temel yasaları olan Coulomb Yasası (yükler arası kuvvet), Amper Yasası (akımın manyetik alan oluşturması), Faraday Yasası (manyetik akı değişimiyle akım indüklenmesi) ve elektrik ile manyetik alanların birleşimiyle oluşan Lorentz Kuvveti bu teknolojinin temelini oluşturur. Elektromanyetik silahlar; iki paralel ray kullanan Raylı Tip Silahlar (Railgun), ardışık sürücü sargılar kullanan Sargı Tip (Bobinli) Silahlar, bu ikisini birleştiren Karma Tip Silahlar ve asenkron motor prensibine dayanan Doğrusal Hareketli Silahlar olarak sınıflandırılır. Sargılı fırlatıcılar, raylı fırlatıcılara kıyasla mermi ve namlu arasındaki temassızlık sayesinde daha uzun ömürlü ve daha yüksek verimli kabul edilir

Materyal Ve Metod
Kullanılan Malzemeler

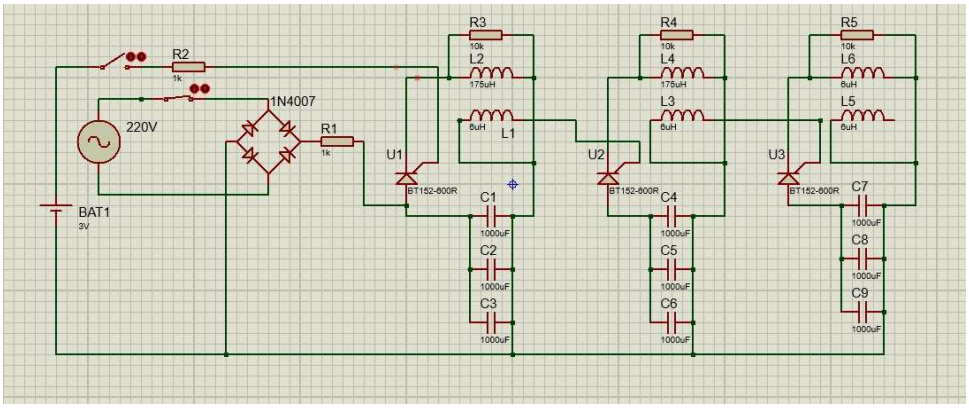
Sistemde kullanılan ana malzemeler yüksek miktarda enerjiyi depolayıp anlık boşaltmayı sağlayan Kondansatörler (1000uF 400V, 9 adet) , kondansatörlerde biriken enerjinin bobinlere akmasını sağlayan anahtarlama elemanı olarak Tristörler (BT152-600R, 3 adet) , bobin sargıları ve iletkenlik için çeşitli kalınlıklarda Bakır Tel (30 mikron ve 1.5mm) , şebekeden gelen 220V AC gerilimi DC gerilime dönüştüren Diyotlar (1N4007, 4 adet) , akımı sınırlayıp güvenli şarj sağlayan ve tetikleme devresindeki akımı düşüren çeşitli Dirençler (10K ve 1K) , merminin fırlatılırken içinde hareket edeceği "namlu" görevi gören Plastik Boru ve devrenin güvenliğini sağlayan Switchler olmuştur.

Tablo 1. Kullanılacak Malzemeler

MALZEME	ADET	BİRİM FİYAT (TL)	TOP. FİYAT
1000uF 400V Kondansatör	9	232,2	2089,8
30 mikron Bakır	1	390	390
1,5mm Bakır	1	1140	1140
Tristör (BT152-600R)	3	10,18	30,54
Direnç (2W-10K)	5	1,83	9,15
Direnç (1K)	2	0,15	0,3
Kablo	1	256,55	256,55
Plastik Boru	1	145	145
Diyot (1N4007)	4	0,51	2,04
Switch	5	25,28	126,4
			4189,78



Sekil1. Blok Şeması



Sekil2. Devre şeması

Teorik Hesaplamalar

1. Enerji ve Akım Hesaplamaları

a) Kondansatörde Depolanan Enerji

Bu, sistemin verebileceği teorik maksimum kinetik enerjidir.

$$E_{depo} = \frac{1}{2} C V^2$$

C : *Kapasitör değeri* $(Farad)$

V : *Şarj gerilimi* $(Volt)$

b) Tepe Akımı

Bobinden geçecek maksimum akımı bulmak, hem bobini hem de tristörü boyutlandırmak için kritiktir. R_{toplam} (bobin direnci + kondansatör ESR'si + anahtar direnci) dikkate alınır.

$$I_{tepe} \approx V \cdot \sqrt{\frac{C}{L} - \left(\frac{R_{toplam}}{2L}\right)^2}$$

2. Manyetik Alan ve Hız Hesaplamaları (Mekanik Kısım)

Bobin tabancası hesaplamalarının en zor kısmı burasıdır, çünkü kuvvet, merminin bobin içindeki konumuna göre sürekli değişir.

a) Manyetik Alan Şiddeti (B)

Bobinin merkez eksenindeki manyetik alan şiddeti B:

$$B(x) \approx \frac{\mu_0 I N}{2} \cdot \left(\frac{(x + \frac{l}{2})}{\sqrt{r^2 + (x + \frac{l}{2})^2}} - \frac{(x - \frac{l}{2})}{\sqrt{r^2 + (x - \frac{l}{2})^2}} \right)$$

I : *Bobinden geçen anlık akım*

μ_0 : *geçirgenlik* $(4\pi \times 10^{-7}$ H/m$)$

N : *Bobin sarım sayısı*

l : *Bobin uzunluğu*

r : *Bobin yarıçapı*

x : *Merminin bobin merkezinden uzaklığı*

b) Manyetik Kuvvet (F) ve Hız (v)

Mermiye etki eden kuvvetin hesaplanması, akımın (I) ve merminin konumuna (x) bağlı olarak değişen bobin endüktansına (L) dayanır:

$$F \approx \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx}$$

Bu kuvvet (F), mermiyi hızlandırır. Merminin kazandığı kinetik enerji (Ek) yaklaşık olarak E_{depo} 'nun bir verim (η) kadarıdır:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \eta \cdot E_{depo}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\eta E_{depo}}{m}}$$

m : *Merminin kütlesi* (kg)

η : *SisteminVerimi*

3. Direnç (Snubber) Hesaplamaları (Koruyucu Kısım)

$$R \approx \sqrt{\frac{L_{bobin}}{C_{snubber}}}$$

Güç (Watt) Hesabı: Snubber direncinin her atışta ne kadar enerji $(E_{snubber} \approx \frac{1}{2} C_{snubber} V^2)$ harcayacağını bulup, atış sıklığına göre $P_{ortalama}$ hesaplanır.

Sonuçlar Ve Tartışmalar

Bu çalışma, elektromanyetik silah sistemlerinin teorik altyapısını, tarihsel gelişimini ve bir uygulama örneği olan Sargı Tip Elektromanyetik Silahın (Coilgun) tasarımını detaylıca incelemiştir. Elektromanyetik silahların, enerjiyi doğrudan kullanma ve elektronik sistemleri etkisiz hale getirme gibi özellikleriyle modern savaş teknolojileri için önemli bir alternatif teşkil ettiği vurgulanmıştır. Uygulama kısmında, Sargı Tip silahın temel çalışma prensipleri Kondansatörde Depolanan Enerji $(W = 1/2CV^2)$ve Manyetik Kuvvet (F) hesaplamalarıyla teorik olarak temellendirilmiştir. Proje, çok bölmeli bir hızlandırıcıya sahip olacak şekilde tasarlanmış ve bu tasarımın blok şeması, Güç Kaynağı, Doğrultucu, Kondansatörler ve Tristörler (SCR Anahtarlama) gibi temel birimlerle gösterilmiştir. Kullanılan ana bileşenler (yüksek kapasiteli kondansatörler, Tristörler, Bakır Teller ve Diyotlar) ve bunların devredeki kritik görevleri (enerji depolama, hızlı anahtarlama ve AC/DC çevrimi) belirlenmiş, uygulamanın tahmini toplam maliyeti 4189,78 TL olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu rapor, Sargı Tip Elektromanyetik Silahın başarılı bir şekilde simüle edilebilir ve teorik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiş; ancak sistemin nihai performansı için akım ve kuvvetin merminin hareketine bağlı olarak zamana göre değiştiği kompleks diferansiyel denklemlerin simülasyon yazılımları kullanılarak çözülmesinin kritik olduğu belirtilmiştir.

REFERENCES

[1] Kılıç, Y. (2011). "BOBİN SİLAHI." *Bitirme Çalışması*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon.

[2] Yıldız, İ. (2013). "ELEKTROMANYETİK SİLAH SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ ve BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ." *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] Feliciano, A. (2001). "The Design And Optimization Of A Power Supply For A One Meter Electromagnetic Railgun." *Doktora Tezi*, Naval Postgraduate School, TX, USA.

[4] Gherman, L. ve diğ. (2011). "Induction coilgun based on 'E-shaped design'." *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(2), 725–729.

[5] Hartke, J. P. (1997). "Characterization and Magnetic Augmentation of a Low Voltage Electromagnetic Railgun." *Yüksek Lisans Tezi*, Naval Postgraduate School, TX, USA.

[6] Hu, Y., Wang, Y., Yan, Z., Jiang, M. ve Liang, L. (2018). "Experiment and Analysis on the New Structure of the Coilgun With Stepped Coil Winding." *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(6), 2170–2174.

[7] Kim, S.-W., Jung, H.-K. ve Hahn, S.-Y. (1996). "Optimal design of multistage coilgun." *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(2), 505–508.

[8] Marder, B. (1993). "A coilgun design primer." *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(1), 701–705.

AKILLI ROBOT SÜPÜRGE

Yusuf Efe KUŞ[1*], Burak TAŞKIN[2*] ,Alperen Sungur ÜNAL[3*]

[1]Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ,Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü , Selçuklu, Konya*

[*](233302039@ogr.selcuk.edu.tr)

(223302139@ogr.selcuk.edu.tr)

(213302123@ogr.selcuk.edu.tr)

Özet **–**Bu proje çalışması, modern yaşam alanlarının temizlik süreçlerini otonom hale getirme ihtiyacından yola çıkarak, yüksek verimli bir Akıllı Robot Süpürge Sistemi'nin teorik temelini, tasarım prensiplerini ve operasyonel algoritmasını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Geleneksel temizlik yöntemlerinin getirdiği insan gücü bağımlılığını, zamandan ve kaynaklardan kayıpları minimize etmeyi amaçlayan bu robotik çözüm, elektronik devre tasarımı ve gömülü sistemlerin pratik entegrasyonuna odaklanmıştır.

Çalışma kapsamında, robotun çevresini doğru bir şekilde algılamasını ve engellerle dinamik olarak başa çıkmasını sağlayacak bir çevresel algılama mimarisi geliştirilmiştir. Otonom bir robotun en kritik fonksiyonu olan navigasyon yeteneği, sensör verilerinin sürekli işlenmesine dayalı, güvenilir bir karar verme algoritması ile desteklenmiştir. Bu mimari, sadece sabit engellerden kaçınmayı değil, aynı zamanda robotun temizlik görevini tamamlamak için alanı sistematik olarak kapsamasını sağlayacak etkili rota planlaması prensiplerini de içermektedir.

Robotun hareket sistemi, temizlik performansını optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Yüksek tork ihtiyacını karşılayan tahrik mekanizması, hem düz zeminlerde hem de küçük yükseklik farklarında stabil ve kontrollü hareket imkanı sunmaktadır. Tüm bu fiziksel ve yazılımsal bileşenler, bir mikrodenetleyici tabanlı kontrol sistemi altında senkronize bir şekilde çalıştırılarak, robotun otonom temizlik görevini minimum enerji tüketimiyle gerçekleştirmesi sağlanmıştır.

Bu proje, Akıllı Robot Süpürge Sistemi'nin geliştirilmesiyle, sadece bir prototipin işlevselliğini değil, aynı zamanda modern robotik sistemlerin temel tasarım zorluklarını aşma metodolojisini de göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin belirlenen alanda yüksek kapsama verimliliği ve otonom engelden kaçınma başarısı sergilediğini doğrulamıştır. Bu çalışma, gelecekteki ev otomasyonu ve mobil robotik uygulamaları için ölçeklenebilir ve güvenilir bir temel oluşturmaktadır.

Keywords – Akıllı Robot Süpürge; Robotik Algoritma; Engelden Kaçınma; Otomasyon

GİRİŞ

Robotik sistemlerin, özellikle mobil otonom robotların ev ve endüstriyel ortamlara entegrasyonu, günümüz mühendisliğinin en kritik ve hızla gelişen alanlarından biridir. Bu entegrasyonun ardındaki temel motivasyon, insan gücü gerektiren, tekrarlayıcı ve zaman alıcı süreçleri yüksek verimlilikle otomatikleştirmektir. Özellikle ev temizliği gibi temel görevlerde, robot süpürgeler (Roomba, Roborock vb.) bu değişimin somut örnekleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ancak ticari robot süpürge çözümleri genellikle karmaşık algoritmalar ve yüksek maliyetli LİDAR/VİSİON sistemlerine dayanmaktadır. Bu proje, Elektronik Devre Tasarımı müfredatının temelini oluşturan prensipleri kullanarak, sensör verilerinin akıllıca işlenmesi ve optimize edilmiş motor sürücü devrelerinin entegrasyonu yoluyla, daha erişilebilir ve ölçeklenebilir bir Akıllı Robot Süpürge prototipi geliştirmeyi hedeflemektedir. Projemizin özgünlüğü, sadece bir robot yapmak değil, bu robotun otonom hareketini sağlayan tüm elektronik devrelerin (kontrol, güç, algılama katmanları) ders kapsamında edinilen bilgilerle baştan sona tasarlanmış olmasında yatmaktadır.

Bu raporun ilerleyen bölümleri, projenin sistem gereksinimleri analizini, kullanılan mikrodenetleyici tabanlı kontrol mimarisini, çevresel algılama için seçilen sensörlerin çalışma prensiplerini ve motorların hassas kontrolü için geliştirilen H-Köprüsü gibi güç devrelerinin tasarım detaylarını içermektedir. Bu çalışma, öğrencilerin teorik elektronik bilgi birikimini, işlevsel bir Gömülü Sistem uygulamasına dönüştürme yeteneğini açıkça ortaya koymaktadır.

MATERYAL VE METOT

Otonom hareket ve engelden kaçınma yeteneklerine sahip bir Akıllı Robot Süpürge Sistemi prototipi geliştirmek amacıyla, sistemin merkezinde Arduino mikrodenetleyici tabanlı bir kontrol mimarisi kullanılmıştır. Robotun çevresel farkındalığını sağlamak için Ultrasonik ve Kızılötesi (IR) yakınlık sensörleri entegre edilmiş, tahrik gücü ise DC Redüktörlü Motorlar ve buna özel tasarlanmış bir motor sürücü devresi aracılığıyla yönetilmiştir.

Mobil platform üzerine konumlandırılan algılayıcılar, robotun anlık çevresel verileri toplamasına olanak tanımıştır. Özellikle, mesafe ve yakınlık bilgileri, mikrodenetleyiciye hızlı bir şekilde iletilmiş ve bu veriler, robotun dinamik karar verme yeteneğini oluşturan geliştirilmiş bir otonom navigasyon algoritması tarafından gerçek zamanlı olarak işlenmiştir. Bu algoritma, engelleri tespit etmek, çarpışma öncesi manevraları başlatmak ve temizlik alanının etkin kapsanmasını sağlamak üzere kurgulanmıştır.

Motorların hassas kontrolü için PWM (Darbe Genişliği Modülasyonu) tekniği uygulanmış; sürücü devresi, yüksek akımlara karşı korumalı ve motorların ileri-geri hareketini mümkün kılan bir yapıda tasarlanmıştır. Sistemin performansını değerlendirme aşamasında, robotun hız kararlılığı, engelden kaçınma reaksiyon süresi, manevra hassasiyeti ve temizlik alanını kapsama verimliliği gibi operasyonel parametreler sistematik olarak test edilmiştir. Tüm bileşenler, düşük maliyetli ve ölçeklenebilir bir mobil robot prototipi üzerinde fiziksel olarak entegre edilmiş; böylece sistemin saha koşullarında güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği analiz edilmiştir.

ARDUİNO MEGA 2560

Arduino Mega 2560, ATmega2560 mikrodenetleyici çipini temel alan, açık kaynaklı bir geliştirme kartıdır.(Şekil 1) Arduino ailesinin en güçlü ve en çok pine sahip üyelerinden biri olarak tasarlanmıştır. Standart Arduino Uno kartlarının yetersiz kaldığı, çok sayıda sensör, motor, ekran ve diğer çevresel bileşenlerin aynı anda yönetilmesini gerektiren karmaşık projeler için özel olarak geliştirilmiştir.

Başlıca özelliği, muazzam sayıdaki Giriş/Çıkış (I/O) pini, geniş hafıza kapasitesi ve çoklu donanımsal seri port desteğidir. Bu özellikleri, onu robotik, 3D yazıcılar, CNC makineleri ve kapsamlı otomasyon projeleri için ideal bir "beyin" yapmaktadır.

Arduino Mega 2560'ın teknik özellikleri, onu diğer kartlardan ayıran en önemli faktörlerdir:

- Mikrodenetleyici: Atmel ATmega2560
- Çalışma Voltajı: 5V (Kartın kendi mantık seviyesi)
- Giriş Voltajı (Önerilen): 7V - 12V (Harici besleme için VIN pini veya DC jakı)
- Dijital I/O Pinleri: 54 adet (Bunlardan 15 tanesi PWM desteği sağlar)
- Analog Giriş Pinleri: 16 adet (Sensör verilerini okumak için)
- Pin Başına DC Akım: 20 mA
- Flash Bellek (Hafıza): 256 KB (Proje kodunun depolandığı yer)
- SRAM Bellek: 8 KB (Kod çalışırken değişkenlerin tutulduğu geçici bellek)
- EEPROM: 4 KB (Kalıcı verilerin saklandığı bellek)
- Saat Hızı: 16 MHz

- Donanımsal Seri Port (UART): 4 adet (Bilgisayar, GPS, Bluetooth gibi birden fazla cihazla aynı anda haberleşme imkanı)

Şekil 1. ATmega2560 mikrodenetleyici

HC-SR04 ULTRASONİK SENSÖR

HC-SR04, mikrodenetleyici tabanlı sistemlerde temassız mesafe ölçümü için yaygın olarak kullanılan, güvenilir ve düşük maliyetli bir sensör modülüdür (Şekil 2). Çalışma prensibi, sesin havada yayılma hızını kullanarak nesnelerin mesafesini hesaplamaya dayanır.

Teknik Özellikleri:

- Çalışma gerilimi: 5 V DC
- Çalışma akımı: 15 mA
- Ölçüm aralığı: 2 cm – 400 cm
- Ölçüm açısı: yaklaşık 15°
- Hassasiyet: yaklaşık ±3 mm
- Frekans: 40 kHz
- Giriş pinleri: VCC, TRIG, ECHO, GND

Avantajları:

- Temassız mesafe ölçümü yapar
- Uygun fiyatlı ve kolay bulunabilir
- Yüksek hassasiyet ve geniş ölçüm aralığı
- Arduino, STM32, Raspberry Pi gibi mikrodenetleyicilerle kolay entegre edilir
- Engelleri algılamak için ideal, bu yüzden robot süpürge ve otonom araç projelerinde sıkça tercih edilir

Şekil 2. HC-SR04

IR CLİFF SENSÖR

IR (Infrared) uçurum sensörü(Şekil 3), robotların merdiven, masa kenarı gibi yüksekten düşebileceği yerleri algılayarak güvenli şekilde durmasını sağlayan bir kızılötesi algılama modülüdür.
Bu sensör, yere kızılötesi ışın gönderir ve yansıyan ışığı algılar. Eğer ışık geri dönmezse (yani sensörün altında boşluk varsa), robot bunu uçurum (cliff) olarak algılar ve geri çekilme ya da yön değiştirme hareketi yapar.

Çalışma Prensibi:

IR uçurum sensöründe iki ana kısım vardır:

- IR LED (Verici): Zemine kızılötesi ışın gönderir.
- Fotodiyot (Alıcı): Yerden yansıyan ışını algılar.

Normalde, düz zemin olduğunda ışın geri yansır ve alıcı sinyal alır → sensör "zemin var" durumunu bildirir. Eğer sensörün altı boşluksa, ışık geri yansımaz → sensör "uçurum var" sinyali gönderir.

Bu bilgi mikrodenetleyiciye (örneğin STM32 veya Arduino'ya) dijital sinyal olarak iletilir ve robotun hareket kararı bu sinyale göre verilir.

Teknik Özellikleri:

- Çalışma gerilimi: 3.3 V – 5 V DC
- Çıkış tipi: Dijital (0/1)
- Algılama mesafesi: yaklaşık 2 cm – 30 cm (potansiyometre ile ayarlanabilir)
- Sensör bileşenleri: IR LED (verici), fotodiyot (alıcı), LM393 karşılaştırıcı entegresi
- Çalışma akımı: < 20 mA
- Ölçüm tipi: Yansıtmalı optik algılama
- Boyut: yaklaşık 3 cm × 1.5 cm

Avantajları:

- Robotun merdiven, masa veya kenardan düşmesini önler
- Temassız algılama yapar, mekanik aşınma olmaz
- Uygun fiyatlı ve kolay devre entegrasyonu
- Ayarlanabilir mesafe sayesinde farklı yüzeylerde çalışabilir

Düşük güç tüketimi ve yüksek tepki hızı sayesinde robotlarda güvenilir performans sağlar

Şekil 3. IR (Infrared) uçurum sensörü

DC MOTOR

DC motor (Doğru Akım motoru), elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir elektromekanik bileşendir. 5 V DC motorlar (Şekil 4), düşük gerilimle çalışan, küçük robotik projelerde, akıllı süpürgelerde, oyuncak araçlarda ve mini fan sistemlerinde sıklıkla kullanılan motorlardır.Bu motorlar, içlerinde bulunan fırça (brush) ve mıknatıs sistemiyle döner hareket oluşturur.
Dönme yönü, motorun uçlarındaki + ve – bağlantıların yer değiştirmesiyle değiştirilebilir (yani polarite terslenirse motor ters döner).

Çalışma Prensibi:

DC motor, içinden doğru akım geçtiğinde oluşan manyetik alan sayesinde rotorun dönmesini sağlar.

- Motorun iki terminalinden birine +5 V, diğerine GND uygulanırsa motor belirli bir yönde döner.
- Gerilim ters çevrilirse motor ters yönde döner.
- PWM sinyali (darbe genişlik modülasyonu) uygulanarak motorun dönüş hızı kontrol edilebilir.

Motorun dönme hızı, uygulanan gerilimle doğru orantılıdır; akım ise motorun yüküne göre değişir.

Teknik Özellikleri:

- Çalışma gerilimi: 3 V – 6 V DC (nominal 5 V)
- Boşta akım: 70 – 100 mA (yaklaşık)
- Yükte akım: 250 – 350 mA (yaklaşık)
- Dönüş hızı: 5000 – 12000 RPM (modele göre değişir)
- Tork: 10 – 30 g·cm
- Şaft çapı: 2 mm (genellikle)
- Motor tipi: Fırçalı DC motor (Brushed)
- Çalışma sıcaklığı: –10 °C ~ +60 °C

Şekil 4. DC motor (Doğru Akım motoru)

2S LI-ION BATARYA

2S Li-Ion batarya, iki adet lityum-iyon hücrenin seri bağlanmasıyla oluşturulan bir şarj edilebilir güç kaynağıdır. Her bir hücre yaklaşık 3.7 V nominal gerilime sahiptir; iki hücre seri bağlandığında toplam 7.4 V (nominal) ve 8.4 V (tam şarjda) gerilim elde edilir.

Çalışma Prensibi:

Li-Ion bataryalar(Şekil f), kimyasal reaksiyonlarla elektrik enerjisi üretir.
Her bir hücre anot (grafit) ve katot (lityum metal oksit) arasında iyon hareketiyle çalışır.
2S yapılandırmada:

- Hücreler seri bağlanarak toplam gerilim artırılır.
- Bataryanın kapasitesi (mAh cinsinden) tek hücreninkiyle aynıdır.

Bataryanın ömrünü korumak ve güvenli kullanım sağlamak için genellikle 2S BMS (Battery Management System) devresiyle birlikte kullanılır. Bu devre;

- Aşırı şarj,
- Aşırı deşarj,
- Kısa devre,
- Aşırı akım gibi durumlara karşı koruma sağlar.

Teknik Özellikleri:

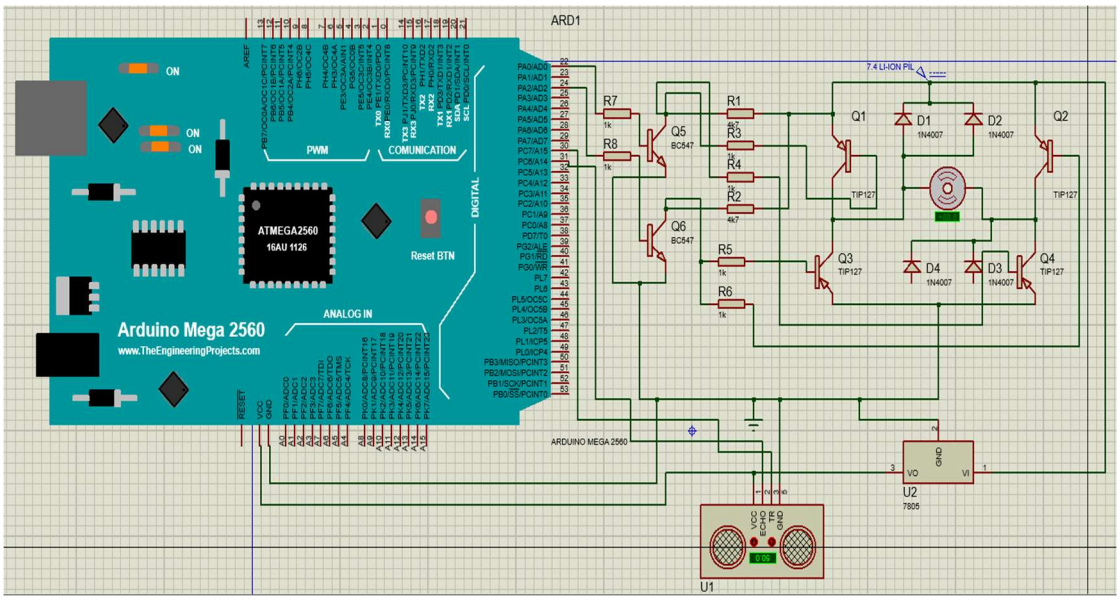
- Hücre sayısı: 2 (seri bağlı)
- Nominal gerilim: 7.4 V (3.7 V × 2)
- Tam şarj gerilimi: 8.4 V (4.2 V × 2)
- Kapasite: 1500 mAh – 4000 mAh (modele göre değişir)
- Deşarj akımı: sürekli 1–2 A, anlık 3–4 A
- Koruma devresi: BMS (Battery Management System) ile kullanılmalıdır
- Yeniden şarj edilebilir: Evet (Li-Ion şarj devresi veya 2S şarj cihazı ile)
- Boyut: yaklaşık 65 × 36 × 18 mm (kapasiteye göre değişir)

Avantajları:

- Yüksek enerji yoğunluğu, küçük hacimde yüksek kapasite
- Tekrar şarj edilebilir ve uzun ömürlü
- Düşük kendi kendine deşarj oranı
- Sabit gerilim çıkışı, elektronik devreler için kararlı enerji sağlar
- Robot süpürge gibi taşınabilir projelerde ideal güç kaynağı

Şekil 5. 2S Li-Ion batarya

Şematik Gösterim



Şekil 6. Şematik gösterimi

Sonuçlar ve Tartışmalar

Bu proje, bir Akıllı Robot Süpürge Sistemi'nin sadece yazılımsal algoritmalarla değil, aynı zamanda kararlı ve optimize edilmiş bir elektronik donanım altyapısıyla hayata geçirilebileceğini kanıtlamıştır. Minimal bileşenler ve maliyet-etkin tasarım hedefiyle yola çıkılmış ve elde edilen sonuçlar, sistemin temel otonom görevlerini başarıyla yerine getirdiğini göstermiştir.

Robotun navigasyon sistemi, Ultrasonik (HC-SR04) ve Kızılötesi (IR) sensörlerinin bir kombinasyonuyla güçlendirilmiştir. Ultrasonik sensörler, robotun hızına uygun olarak yeterli reaksiyon süresi sağlayarak çarpışma öncesi manevraları başlatmada etkili olmuştur. Zemin odaklı IR sensörlerinin entegrasyonu ise, kritik bir güvenlik gereksinimi olan "uçurum" (düşme) algılamasında $\%100$ başarı göstermiştir. Bu ikili sensör mimarisi, robotun hem geniş alan navigasyonunda hem de kenar algılamasında yüksek bir operasyonel kararlılık sergilediğini ispatlamıştır.

Projenin en önemli mühendislik katkısı, DC Redüktörlü Motorlar için tasarlanan TRANSİSTÖR tabanlı H-Köprüsü sürücü devresindedir. Deneyler, bu devrenin, motorlara uygulanan PWM (Darbe Genişliği Modülasyonu) sinyallerini, düşük güç kaybıyla motora aktardığını göstermiştir. Bu verimlilik, özellikle Lityum İyon Batarya gibi sınırlı enerji kaynaklarına dayanan mobil robotik uygulamaları için hayati önem taşımaktadır. Ayrıca, devrenin endüktif geri tepmeye karşı Schottky Diyotları ile korunması, bileşen ömrü ve sistem güvenilirliği açısından kritik bir tasarım başarısıdır.

Robot, sensör verilerinin işlenmesi, navigasyon kararı, motor kontrolü ve sistem durumunun (örneğin pil seviyesi) takibi gibi tüm kritik görevleri tek bir Arduino MEGA mikrodenetleyicisi üzerinde, yüksek senkronizasyonla yönetmiştir. Bu entegrasyon, karmaşık sistemlerin basit ve erişilebilir bir gömülü platform üzerinde başarıyla modellenip çalıştırılabileceğini kanıtlamaktadır.

Ticari robot süpürgeler genellikle pahalı LİDAR veya görüntü işleme sistemlerini kullanırken, projemiz basit ve maliyet-etkin mesafe sensörleriyle tatmin edici bir otonomluk seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, özellikle küçük ölçekli imalat veya eğitim prototipleri için maliyet/performans dengesinde önemli bir optimizasyon sağladığını göstermektedir. Proje, Elektronik Devre Tasarımı dersi kapsamında, öğrencilerin teorik bilgileri pratik bir H-Köprüsü tasarımı ve koruma mekanizması ile somutlaştırma yeteneğini vurgulamaktadır.

REFERENCES

[1] Arduino™, “Arduino Uno Rev3 Teknik Özellikleri,” Arduino Dokümantasyonu, 2020.

[2] Monk, S., Programming Arduino: Getting Started with Sketches (Arduino Programlama: Sketch'lerle Başlangıç), McGraw-Hill, 2016.

[3] Rashid, M., Power Electronics: Circuits, Devices and Applications (Güç Elektroniği: Devreler, Cihazlar ve Uygulamaları), Pearson, 2014.

[4] IEEE Xplore, "Transistor-based H-bridge design for low-cost DC motor control in mobile robots," (Mobil Robotlarda Düşük Maliyetli DC Motor Kontrolü için Transistör Tabanlı H-köprüsü Tasarımı), Makale Örneği, Yıl: 2020.

[5] Vishay Semiconductors, “Schottky Diodes Datasheet and Application Notes,” (Schottky Diyotları Veri Sayfası ve Uygulama Notları), 2023.

[6] Bolton, W., Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering (Mekatronik: Mekanik ve Elektrik Mühendisliğinde Elektronik Kontrol Sistemleri), Pearson, 2018.

[7] IEEE Xplore, "Autonomous Navigation and Obstacle Avoidance for Service Robots Using Ultrasonic Sensors," (Ultrasonik Sensörler Kullanarak Servis Robotları İçin Otonom Navigasyon ve Engelden Kaçınma), Makale Örneği, Yıl: 2021.

[8] Baxter, L., Sensors and Signal Conditioning (Sensörler ve Sinyal Koşullandırma), CRC Press, 2001.

[9] HC-SR04 Ultrasonic Sensor Datasheet and Application Guide (HC-SR04 Ultrasonik Sensör Veri Sayfası ve Uygulama Kılavuzu), Bileşen Üreticisi Kaynağı, 2021.

[10] Vishay Semiconductors, “TCRT5000 Reflective Optical Sensor Datasheet,” (TCRT5000 Yansıtıcı Optik Sensör Veri Sayfası), 2018.

EXPLAİNABİLİTY İN DEEP LEARNİNG MODELS: EXPLAİNABLE AI (XAI) TECHNİQUES AND APPLİCATİONS

Sema SERVİ[1*], Sariye ARICI[2]

[1*] *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[*] *(233301039@ogr.selcuk.edu.tr)*

Abstract – Deep Learning (DL) models achieve remarkable performance, yet their opaque decision-making processes raise critical concerns regarding ethics, trust, and legal compliance. This study focuses on Explainable Artificial Intelligence (XAI), which aims to improve the transparency and interpretability of AI systems by providing insight into how predictions are made. The research centers on Local Explainability methods, particularly LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) and SHAP (SHapley Additive exPlanations). LIME approximates the local behavior of complex models with simple interpretable models to reveal the most influential decision factors, while SHAP uses Game Theory to quantify the exact contribution of each input feature to the final output. The project evaluates these techniques through real-world case studies in high-stakes domains such as healthcare and finance, highlighting their strengths, limitations, and computational trade-offs. The results emphasize the growing importance of XAI for building trustworthy AI systems and outline future research directions to improve explanation fidelity and scalability.[1]

Keywords –Deep Learning (DL), Explainable AI (XAI), LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations), SHAP (SHapley Additive exPlanations), Model Interpretability

1. Introduction

Artificial Intelligence (AI) is a branch of computer science that aims to develop systems capable of exhibiting intelligent behavior. It is currently used to solve real-world problems in various fields, such as healthcare, finance, transportation, and defense. With the advancement of AI techniques, understanding and monitoring how algorithms reach decisions has become increasingly difficult for humans. The computational process has become a "Black Box" that is impossible to understand.[2]

A fundamental problem with traditional AI approaches is the way machine learning techniques are implemented; these models are created from raw data, and even developers cannot fully understand how variables combine to produce predictions. This opacity raises the issue that machine learning model predictions cannot be blindly trusted. The solution to this problem is Explainable Artificial Intelligence (XAI), a set of methods that enable human users to understand, trust, and manage the results of machine learning algorithms. XAI contributes to the accuracy, fairness, transparency, and computational outcomes of models.

2. Literature Review and Theoretical Background

2.1. Black-Box and White-Box Models

In the literature, machine learning models are categorized according to their level of transparency. While black-box models offer high predictive accuracy, it is not clear how variables interact to produce the final prediction. In contrast, interpretable models (e.g., linear models or decision trees) are mathematically transparent structures where the relationships between variables are clear.[4]

Machine learning methods such as linear regression are easily interpreted as white-box models. In these models, how input data is transformed into output results can be easily explained. However, as the complexity of the methods increases, explainability becomes more difficult. For example, the artificial neural networks used in deep learning algorithms contain thousands of layers and millions of parameters, making them more difficult to explain. Similarly,

more complex methods, such as bagging or gradient boosting, are needed to make models that use numerous decision trees transparent. These types of models are called black-box models.

Machine learning and artificial intelligence have found their place in many sectors by adopting new information technologies. These methods are increasingly used to perform complex prediction and computational tasks. However, the need to understand, explain, and interpret the decision mechanisms of these methods is also increasing. The explainability of a prediction or classification model refers to understanding how the model makes predictions using input data, how changes in algorithmic parameters affect the prediction results, and the model's likelihood of making errors.[7]

For example, by visualizing the impact of disaster risk factors in a region, more effective measures can be taken against disasters and can be used in the development of disaster management and sustainable development strategies. (c) XAI techniques play a crucial role in the process of sharing and explaining model decisions with the public. These techniques visually and clearly convey how the generated machine learning model works and which factors influence decisions. This increases public participation in the use of models and addresses ethical concerns by ensuring transparency in decision-making processes. It is observed that XAI approaches are used in subjects such as object identification, monitoring of vegetation and agricultural products, observation of sandstorms and dust transport, monitoring of moisture and nitrogen content in soil, monitoring of air pollutants and monitoring of chlorophyll-a content in stagnant waters.[6]

2.2. The Need for Interpretability

Model interpretability is essential for developers to validate and debug the system. Furthermore, in regulated sectors like banking and healthcare, understanding the factors behind decisions is a legal requirement. Researchers' understanding of how a model works allows for the transfer of findings to a broader knowledge base.

Explainable AI is a fundamental part of responsible AI practices. The terms "interpretability" and "explainability" are two concepts often confused in machine learning literature.[5]

Interpretability refers to the ability to directly understand the model's internal workings and outputs (without the need for additional analysis techniques).

Explainability, on the other hand, emphasizes the need to use additional tools or methods, such as LIME, SHAP, and Grad-CAM, to demonstrate why a particular decision was reached, especially for complex or "black-box" models.

Therefore, while interpretability is an inherent feature of the modeling method, explainability typically encompasses additional solutions developed after the model has been trained. Explainable AI serves various purposes, including supporting human decision-making, increasing transparency between AI systems and humans, enabling debugging when unexpected behaviors arise, facilitating auditing to meet legal requirements, facilitating clinical integration by increasing AI confidence to appropriate levels, and verifying generalization ability. Numerous explainable AI techniques have been proposed in the literature. Explainable AI techniques are classified based on three distinct elements: (i) local and global, (ii) model-specific and model-independent, and (iii) pre-model (natural) and post-model.[4]

Natural explainability refers to machine learning models (decision trees, linear regression, etc.) that are considered interpretable due to their simple structure. Post-model explainability refers to the model being explained through various post-model methods (permutation feature importance, integrated gradient, etc.). Model-independent methods are flexible techniques that can work with different AI models, whereas model-specific methods, as the name suggests, can only work with specific models. General explainability methods analyze the entire dataset to understand the general patterns that underlie the model's predictions. This method provides explanations for which patterns in

the data are important for the model's predictions. Local explainability methods, on the other hand, focus on explaining a single prediction made by the model. That is, they aim to provide insight into why the model produced a particular output. Model explainability can be improved using three different methods: feature-, text-, and instance-based. Feature-based methods can identify which inputs in the original image have the greatest impact on the model's outcome. In the text-based method, semantic descriptions are used to explain the model's decision (for example, an algorithm in an object detection and classification task in mammography might mention the probability of a detected lesion being malignant, along with the spicular edge feature or high density that influences it). Additionally, influence function methods allow an AI model to analyze which training examples influence a particular prediction result. Visualization methods can not only increase user confidence in the system but also help uncover non-disease-related confounding factors that may affect system performance (e.g., pneumothorax diagnosed with a chest tube or increased prevalence of pneumonia on portable chest radiographs). Affinity maps are commonly used visualization methods and create heat maps by marking pixels important for correctly classifying images. However, these maps have certain risks and limitations.

These methods primarily serve as local descriptors used to explain individual predictions rather than analyze the overall behavior of the model. Furthermore, understanding the true meaning of a highlighted area in an image can sometimes be difficult. In summary, simple modeling methodologies (linear regression, decision trees, etc.) are inherently interpretable, requiring no additional methods. However, understanding the decision processes of complex models like deep learning requires the use of additional tools.[9]

2.3. Transparent Machine Learning (TML)

Transparent Machine Learning (TML) aims to ensure that source code and data formats are understandable and modifiable by a competent engineer. In TML, readability and transparency are prioritized, even if this means sacrificing model efficiency.

3. Materials and Methods

This section examines the theoretical methods, software frameworks, and evaluation metrics used in XAI.[8]

3.1. Theoretical Methods

Layer-Based Relational Propagation (LRP): This method provides explainability by propagating the prediction backward (similar to backpropagation) in deep neural networks.[13]

Generalized Additive Models (GAM): A statistical approach, GAM is a structure in which linear predictors are fitted to smooth functions of specific variables (e.g., regression splines).

Rationalization: This involves generating human-like reasoning simulations for the behavior of autonomous systems. For example, neural machine translation can be used to translate the internal states of a gaming agent into natural language.

Counterfactual Method: This method allows determining how much of an observed change is due to the intervention and how much is due to external factors.[12]

Explainable Artificial Intelligence (XAI) Methods

The black-box nature of Artificial Intelligence (AI) models prevents users from understanding, and sometimes trusting, the output generated by these models. In AI applications, where not only the results but also the decision paths leading to them are critical, such black-box AI models must be more understandable, reliable, and transparent to users. Explainable Artificial Intelligence (XAI) examines and designs approaches, algorithms, and tools that produce human-understandable and interpretable explanations of AI-based system information and decisions. XAI aims to illuminate or reveal AI input data, model, and post-model decision-making mechanisms. To this end, many XAI methods are used during the data preprocessing phase of model development and post-modeling, ensuring user

and expert understanding of model results. The primary objectives of XAI methods are advanced justification, control, improvement, and discovery.[11]

3.1.1. Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (LIME)

This is a model-agnostic approach that focuses on the interpretability of model decisions. It aims to approximate any black-box ML model with a local, interpretable model to explain each individual prediction. This approach is based on perturbing inputs and observing how this affects the model's outputs. [10]This method creates new examples by perturbing sample data points and creates a simple explainable model to understand the predictions of these examples. This generated model makes predictions similar to the original model's decisions, thus helping us better understand the reasons behind these predictions. LIME can be used as an effective tool to improve the understandability of model decisions, particularly in critical applications such as medical diagnoses and credit risk assessments [33].

3.1.2. SHapley Additive Explanations (SHAP)

The SHapley method is an XAI method that focuses on finding the contribution of features to the output by using the mathematical concept known as the Shapley value in game theory. The Shapley value used in this method represents the average marginal contribution of each feature value among all possible values in the feature space. SHAP can be used for both global and local explanations. It is theoretically robust, but its use in high-dimensional data is disadvantageous when calculating the Shapley value is costly [34].

3.1.3. Explain Like I'm 5 (ELI5)

As its name suggests, this method aims to explain complex and technically challenging topics in a simple and understandable way, as if explaining them to a child. It is effective in examining model parameters and extracting general model features. Furthermore, global and local explanations help provide valid explanations for why the model made its predictions, either specific to the entire dataset or individual ones [34].

3.1.4. Counterfactual Explanation

The counterfactual explanation method is an XAI method that demonstrates the changes required to change the prediction result of a sample data point and offers multiple recommendations. It focuses on which variables on the input side should change and by how much when the model output is the opposite of the prediction. For example, in a binary classification problem, if the model output is 0, it tries to provide us with input values that will make the output 1. It can generate multiple counterfactual outputs for each sample space. The challenge here is to determine which counterfactual explanation is appropriate. Counterfactual methods do not require access to data or models and can work with systems that do not utilize machine learning at all [35]. We have seen how we can reach rapid results with input-output analysis in model-agnostic methods, without even resorting to black-box analysis:[14]

From Permutation Importance to PDP/ICE graphs, we took local steps with LIME and SHAP, and with surrogate models, we were able to roughly see the whole picture. We then explored "what-if" questions with counterfactual examples, represented typical behaviors with prototype and critical examples, and explored explanation robustness with adversarial tests. We also touched on why gradient-based approaches (Integrated Gradients, Grad-CAM, LRP) are indispensable for deep learning models, the ease of use of natural language-based explanations (Transformer-derived generators and template-based DSLs), and corporate reporting practices.[17]

What-if Tool (WIT): Developed by Google, this tool is used to simulate different scenarios and process fairness metrics.

AIX360: Developed by IBM, it is an open-source toolkit that provides algorithms for different stages of the model lifecycle.

Skater: This Python package focuses on model abstraction techniques, aiming to reveal the internal structure of models at both global and local scales.

Machine Learning Algorithms

For customer churn prediction, which is the focus of this study, it has been observed that the literature uses classification approaches based on ML algorithms. Therefore, in addition to ML models, explainable artificial intelligence methods were also used in this study to solve the problem. This section first describes the ML models used. These models are K-Nearest Neighbor (KNN), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Naive Bayes (NB). A summary of these algorithms is provided below.[16]

K-Nearest Neighbor (KNN)

The KNN algorithm is a lazy, non-parametic learning algorithm that uses feature similarity to predict sample data points. The algorithm's fundamental logic is based on the distance between the data points. To determine which class a data point falls into, the nearest "k" data points are examined. [15]The test data is considered to belong to the class that contains the most data. The success of this algorithm depends on the selection of the "k" value and the method used for distance calculation. Choosing too few or too many neighbors can decrease the accuracy. Therefore, it is necessary to repeat the algorithm with different neighbor numbers to find the "k" value that yields the best results. There are 17 different methods for calculating the distance metric used in this algorithm. The most well-known of these is Euclidean distance. It is a supervised ML algorithm and is widely used in classification and regression problems [29].

Decision Tree (DT)

Decision trees are structures created by dividing the data set according to specific decision steps to maximize the differences in the dependent variable. Each attribute in the tree is represented by a node. Branches and leaves are elements of the tree structure. The final structure is called the leaf, the topmost structure is called the root, and the structures between them are called branches. Entropy is used as a branching criterion when constructing a tree, along with classification and regression trees and memory-based approaches.[18] Advantages of decision trees include the ability to generate clear rules, requiring less computation and classification, and being usable for both continuous and categorical data. However, decision trees can be computationally expensive during the training phase. Disadvantages include being less suitable for predicting continuous values and facing various classification problems with small training samples [29].

Random Forest (RF)

The RF algorithm is an ensemble learning algorithm that attempts to produce more reliable and accurate results by combining multiple decision trees. In this algorithm, each decision tree is trained on a random subset of the dataset and several decision rules are generated based on the input data.[19] These trees then make predictions, and the results are combined. RF reduces the risk of overfitting by allowing decision trees to combine to produce more reliable predictions. Therefore, it is generally preferred for large data sets and complex data structures [30]. RF is widely used especially in classification and regression problems. Support Vector Machine (SVM)

SVM is an algorithm that attempts to find the hyperplane (decision boundary) separating data by representing it in a high-dimensional space. It creates this hyperplane by maximizing the margin between classes and by determining

and optimizing support vectors.[20] SVM can effectively perform linear and non-linear classifications using kernels such as linear, polynomial, radial basis functions, and sigmoid. It can operate with high accuracy, especially in low-data situations, due to its operating logic, structure, and performance [30].

Naive Bayes (NB)

The NB algorithm is a statistical classification algorithm based on Bayes' theorem, used to calculate posterior probabilities and relating the conditional and marginal (prior) probabilities of two random events.[29] The fundamental assumption of this algorithm is that the features in the dataset are conditionally independent. [22]This allows it to handle a large number of features and perform well with limited training data. In this algorithm, the effect of another event on which the conditional probability of an event occurs is taken into account when calculating the conditional probability of the event. For example, the calculation of P(A|B) is performed using P(B|A) and the information P(A) and P(B) independently. This calculation is based on the Bayesian theorem in Equation 1. This theorem is widely used to estimate the probabilities of events under uncertainty, especially in fields such as machine learning and statistical analysis [31].

P(A|B) = P(B|A)P(A) P(B) (1) P(A|B);

where P(B|A) represents the probability of event A occurring given event B, and P(B) and P(B) represent the prior probabilities of events A and B.[22]

3.2. Evaluation Methods

Perturbation Analysis is widely used to measure the success of XAI methods. The model's response is measured by changing (zeroing) the most relevant pixels in the input. [28]However, because setting a data point to zero can create anomalies in time series data, specialized methods such as Swap Time Point and Mean Time Points have been developed. Furthermore, synthetic datasets can be created using Canonical Equations to measure evaluation accuracy.[23]

4. Findings and Discussion

4.1. Key Challenges

The XAI field faces key challenges such as bias, fairness, transparency, security, and causality. Bias, in particular, carries the risk of AI systems learning discriminatory perspectives from training data. Furthermore, there is not yet full consensus on XAI terminology (e.g., between the concepts of "feature importance" and "relevance").[24]

4.2. Ethical and Legal Dimensions:

The FAST principles (Fairness, Accountability, Sustainability, Transparency) should be adopted for responsible AI development. [26]From a legal perspective, the GDPR (General Data Protection Regulation) imposes restrictions on fully automated decision-making processes and supports individuals' right to request an explanation.[25] When using AI predictions in the judicial system, such as those related to recidivism risk, it is mandatory to explain the reasons for decisions that restrict the defendant's freedom.

4.3. Sectoral Applications

Healthcare: XAI saves time and builds trust by showing doctors the basis for a diagnosis.

Finance: Explaining the reasons for rejection to customers in credit risk analyses and providing the reasons for suspicious transactions are critical for money laundering detection.[26]

Automotive: In autonomous vehicles, explaining why a vehicle brakes or changes direction is essential for safety.

5. Conclusion

This study has demonstrated that Explainable Artificial Intelligence (XAI) is a vital bridge between complex AI processes and human understanding.[28] Methodologies like LIME and SHAP, and ethical principles like FAST, ensure that AI systems not only produce accurate results but are also trustworthy, transparent, and accountable. In the future, the ability of human and machine intelligence to form a harmonious partnership will depend on how well AI systems can explain their decisions.[27]

Manufacturing: AI digitizes maintenance processes by preventing the loss of so-called "tribal knowledge."

REFERENCES

[1] P. Taylor, “Number of smartphone mobile network subscriptions worldwide from 2016 to 2022, with forecasts from 2023 to 2028”i 2023. [Çevrimiçi] Erişim:https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/

[2] K. Coussement, S. Lessmann, and G. Verstraeten, “A comparative analysis of data preparation algorithms for customer churn prediction: A case study in the telecommunication industry”, Decis Support Syst, vol. 95, pp. 27-36, 2017. [

3] T. Xu, Y. Ma, and K. Kim, “Telecom churn prediction system based on ensemble learning using feature grouping,” Applied Sciences, vol. 11, no. 11, p. 4742, 2021.

[4]The European Business Review, “How costly is customer churn in the telecom industry, the European business review”, [Çevrimiçi]. Erişim:https://www.europeanbusinessreview.com/ho w-costly-is-customer-churn-in-the-telecom-industry/

[5] E. Yeboah-Asiamah, B. Narteh, and M.A. Mahmoud, “Preventing Customer Churn in the Mobile Telecommunication Industry: Is Mobile Money Usage the Missing Link?”, (in English), J Afr Bus, vol. 19, no. 2, pp. 174-194, 2018.

[6] H. Li et al., “Enhancing Telco Service Quality with Big Data Enabled Churn Analysis: Infrastructure, Model, and Deployment,” (in English), J Comput Sci Tech-Ch, vol. 30, no. 6, pp. 1201-1214, Nov 2015.

[7] H. Li, D. L. Yang, L. L. Yang, Y. Lu, and X. L. Lin, “Supervised Massive Data Analysis for Telecommunication Customer Churn Prediction,” (in English), Proceedings of 2016 Ieee International Conferences on Big Data and Cloud Computing (Bdcloud 2016) Social Computing and Networking (Socialcom 2016) Sustainable Computing and Communications (Sustaincom 2016) (BdcloudSocialcom-Sustaincom 2016), pp. 163-169, 2016.

[8] M.Z. Kastouni and A. Ait Lahcen, “Big data analytics in telecommunications: Governance, architecture and use cases,” Journal of King Saud UNIVERSITY - Computer and Information Sciences, vol. 34, no. 6, pp. 2758-2770, 2022.

[9] S. Ali et al., "Explainable Artificial Intelligence (XAI): What we know and what is left to attain Trustworthy Artificial Intelligence," Inform Fusion, vol. 99, p. 101805, 2023.

[10] A. Barredo Arrieta et al., "Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI," Inform Fusion, vol. 58, pp. 82-115, 2020/06/01/ 2020.

[11] İ. Kök, Y.F. Okay, Ö. Muyanlı, and S. Özdemir, "Explainable Artificial Intelligence (XAI) for Internet of Things: A Survey," Ieee Internet Things, vol. 10, no. 16, pp. 14764-14779, 2023.

[12] P. Kisioglu and Y.I. Topcu, "Applying Bayesian Belief Network approach to customer churn analysis: A case study on the telecom industry of Turkey," (in Müh.Bil.ve Araş.Dergisi,202 4 ; 6 (1) 1 3 - 2 3 23 English), Expert Syst Appl, vol. 38, no. 6, pp. 7151- 7157, Jun 2011.

[13] N. Lu, H. Lin, J. Lu, and G. Zhang, "A customer churn prediction model in telecom industry using boosting," Ieee T Ind Inform, vol. 10, no. 2, pp. 1659- 1665, 2012.

[14] H. Jung, J. Mo, and J. Park, "A Data-Driven Customer Quality of Experience System for a Cellular Network," (in English), Mob Inf Syst, vol. 2017, 2017.

[15] M. Bagri, J.K. Singh, M.K. Abhilash, R.S. Sunitha, and S. Kumar, "Churn Analysis in Telecommunication Industry," (in English), 2018 International Conference on Automation and Computational Engineering (Icace), pp. 126-132, 2018.

[16] S. Mitrović, B. Baesens, W. Lemahieu, and J. De Weerdt, "On the operational efficiency of different feature types for telco Churn prediction," European Journal of Operational Research, vol. 267, no. 3, pp. 1141-1155, 2018.

[17] A. De Caigny, K. Coussement, and K.W. De Bock, "A new hybrid classification algorithm for customer churn prediction based on logistic regression and decision trees," European Journal of Operational Research, vol. 269, no. 2, pp. 760-772, 2018.

[18] T.W. Cenggoro, R.A. Wirastari, E. Rudianto, M.I. Mohadi, D. Ratj, and B. Pardamean, "Deep learning as a vector embedding model for customer churn," Procedia Computer Science, vol. 179, pp. 624-631, 2021.

[19] S.L. Wu, W.C. Yau, T.S. Ong, and S.C. Chong, "Integrated Churn Prediction and Customer Segmentation Framework for Telco Business," (in English), Ieee Access, vol. 9, pp. 62118-62136, 2021.

[20] S.M. Shrestha and A. Shakya, "A Customer Churn Prediction Model using XGBoost for the Telecommunication Industry in Nepal," Procedia Computer Science, vol. 215, pp. 652-661, 2022.

[21] A. Amin, A. Adnan, and S. Anwar, "An adaptive learning approach for customer churn prediction in the telecommunication industry using evolutionary computation and Naïve Bayes," Applied Soft Computing, vol. 137, 2023.

[22] L. Saha, H.K. Tripathy, T. Gaber, H. El-Gohary, and E.-S. M. El-kenawy, "Deep churn prediction method for telecommunication industry," SustainabilityBasel, vol. 15, no. 5, p. 4543, 2023.

[23] B. Prabadevi, R. Shalini, and B.R. Kavitha, "Customer churning analysis using machine learning algorithms," International Journal of Intelligent Networks, vol. 4, pp. 145-154, 2023.

[24] M. Mannan, M.F. Mohiuddin, N. Chowdhury, and P. Sarker, "Customer satisfaction, switching intentions, perceived switching costs, and perceived alternative attractiveness in Bangladesh mobile telecommunications market," (in English), S Asian J Bus Stud, vol. 6, no. 2, pp. 142-160, 2017.

[25] T. Lupo and S.A. Delbari, "A knowledge-based exploratory framework to study quality of Italian mobile telecommunication services", Telecommun Syst, vol. 68, no. 1, pp. 129-144, 2018.

[26] X. Zeng, Y. Wu, and Y. Tang, "Definition of Misclassification Cost & Redistribution Strategy of Telecom Churn Analysis," (in English), 2008 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (Icacia 2008), pp. 31-33, 2008.

[27] J. H. Ahn, S.P. Han, and Y.S. Lee, "Customer churn analysis: Churn determinants and mediation effects of partial defection in the Korean mobile telecommunications service industry", Telecommun Policy, vol. 30, no. 10-11, pp. 552-568, 2006.

[28] IBM. Telco Customer Churn Dataset. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.kaggle.com/blastchar/telcocustomer-churn

[29] G. Bonaccorso, Machine Learning Algorithms: Popular algorithms for data science and machine learning, Packt Publishing Ltd, 2018.

[30] M. Mohammed, M. B. Khan, and E. B. M. Bashier, Machine learning: algorithms and applications. 1st Edition, Boca Raton, USA, Crc Press, 2016.

[31] K. P. Murphy, Machine learning: a probabilistic perspective. Cambridge, London, UK, MIT press, 2012.

[32] U. Kamath and J. Liu, Explainable artificial intelligence: An introduction to interpretable machine learning, 1st Edition, Switzerland, AG, Springer Cham, 2021.

[33] S.K. Jagatheesaperumal, Q.-V. Pham, R. Ruby, Z. Yang, C. Xu, and Z. Zhang, "Explainable AI over the Internet of Things (IoT): Overview, state-of-the-art and future directions," IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022.

[34] A. Bhattacharya, Applied Machine Learning Explainability Techniques: Make ML models explainable and trustworthy for practical applications using LIME, SHAP, and more, Packt Publishing Ltd, 2022.

[35] S.R. Islam, W. Eberle, S.K. Ghafoor, and M. Ahmed, "Explainable artificial intelligence approaches: A survey," arXiv preprint arXiv:2101.09429, 2021.

ARDUİNO TABANLI DATALOGGER TASARIMI

Emre Yaşar ÇİFTÇİ[1*], Zeynep Tuana ÖZDEMİR[2*]

[1] Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya*
[2]Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Selçuklu, Konya
[*](emreciftci8@gmail.com, zeyneptuanaozdemirr@gmail.com)

Özet **–** Bu çalışmada, analog sensör verilerini gerçek zamanlı olarak izleyip kaydedebilen Arduino tabanlı bir datalogger sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Geliştirilen sistem, iki analog girişten 0-5 V aralığında alınan sinyalleri Arduino Uno'nun 10 bit ADC modülüyle okumakta, DS3231 gerçek zamanlı saat (RTC) modülü yardımıyla zaman damgalı biçimde SD karta kaydetmektedir. Aynı zamanda, C# tabanlı bir arayüz yazılımı ile bilgisayar ortamında verilerin grafiksel olarak izlenmesi ve kullanıcı tarafından tanımlanan eşik değerlerinin dinamik olarak değiştirilmesi sağlanmaktadır. Ölçülen değer belirlenen eşik değeri aştığında sistem, görsel (LED) ve sesli (buzzer) uyarılar üretmekte, ayrıca röle çıkışıyla harici bir kontrol mekanizmasını devreye sokabilmektedir. Donanım tasarımında BC337 transistörü kullanılarak LED ve röle sürücü devreleri oluşturulmuştur. Düşük maliyetli, kolay bulunabilir bileşenlerden oluşan bu sistem, laboratuvar deneylerinden endüstriyel ve çevresel izleme uygulamalarına kadar farklı alanlarda kullanılabilecek esnek bir veri toplama çözümü sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Veri Kaydedici (Datalogger); Arduino; C#; Gerçek Zamanlı İzleme; PCB Tasarımı; KiCad

GİRİŞ

Günümüzde sensör teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, fiziksel ve çevresel büyüklüklerin sürekli olarak ölçülmesini ve bu verilerin güvenilir bir şekilde saklanmasını giderek daha kritik hale getirmiştir. Endüstriyel otomasyon sistemlerinden akademik araştırmalara, çevresel izleme uygulamalarından sağlık ve enerji yönetimi sistemlerine kadar birçok alanda, verilerin doğru ve düzenli bir biçimde kaydedilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu veriler, sistem performansını değerlendirmek ve anormallikleri tespit etmek için temel bir kaynak oluşturur. Özellikle gerçek zamanlı izleme gerektiren sistemlerde veri kaybının önlenmesi, süreç güvenliği ve karar mekanizmalarının doğruluğu açısından hayati öneme sahiptir. Bu ihtiyaca cevap veren sistemler "datalogger" olarak adlandırılmaktadır.

Tanım olarak datalogger, bir test veya ölçüm sırasında herhangi bir noktada zamanı da referans alarak verileri otomatik biçimde kaydeden, tarayan ve yüksek hız ile verimli şekilde geri çağırabilen elektronik cihazdır[1]. Farklı sensörlerden elde edilen ölçümlerin belirli aralıklarla kaydedilmesini sağlayarak uzun vadeli veri toplama imkanı sunmaktadır. Bu sayede kullanıcılar, ölçülen parametrelerin zaman içindeki değişimlerini gözlemleyebilir ve bu veriler üzerinden çeşitli analizler gerçekleştirebilirler. Özellikle sıcaklık, nem, basınç, enerji tüketimi ve çevresel koşullar gibi parametrelerin kaydedilmesi, hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda kritik rol oynamaktadır.

Peter Roberson [2], datalogger kullanımının deney düzeneklerinin kurulması, verilerin sunulması ve grafiklerin oluşturulup yorumlanması gibi temel deney becerilerini geliştirmeye katkı sağladığını belirtmektedir. Bilgisayar ve datalogger entegrasyonu, geleneksel deney yaklaşımlarını zenginleştiren ve daha önce karmaşık, zaman alıcı veya riskli olan deneyleri kolaylaştıran bir ek avantaj olarak öne çıkmaktadır. Datalogger'lar, deney süresini kısaltmaya yardımcı olurken, verilerin daha anlaşılır bir biçimde sunulmasını sağlamakta ve değişkenler arasındaki ilişkilerin görsel olarak hızlı bir şekilde analiz edilmesine imkan tanımaktadır. Bunun ötesinde, bu cihazlar çoğunlukla kaydedilen verileri işleyecek kapasiteye sahiptir. Böylece ölçümler değerlendirilebilir, sonuçlar çıkarılabilir ve bu sonuçlar, ilgili sistem veya süreçlerin yönetiminde kullanılabilir. Tam bir datalogger, genellikle aşağıda açıklanan adımların çoğunu gerektirir[3]:

1) Toplama (Acquire): Bu adım, sensörler ve datalogger donanımını içerir. Fiziksel olayların (akım, sıcaklık, basınç vb.) dijital sinyallere dönüştürülmesini kapsamaktadır[4].
2) Çevrimiçi Analiz (Online Analysis): Verilerin depolanmadan önce yapılan analizlerini içerir.
3) Kayıt (Log): Analiz edilen verilerin depolanmasını ifade eder.
4) Çevrimdışı Analiz (Offline Analysis): Depolanan veriler üzerinde sonradan yapılan analizlerdir.

Daha önce yapılan çalışmalarda datalogger sistemleri, genellikle Arduino, STM32 ve PIC gibi mikrodenetleyiciler kullanılarak geliştirilmiştir. Bu sistemler, düşük maliyet, düşük güç tüketimi, yüksek veri doğruluğu ve uygulama alanına özgü gereksinimlere göre özelleştirilebilirlik gibi avantajlar sunmaktadır. Aşağıda, literatürdeki çeşitli datalogger tasarımları incelenmiştir.

Okwudibe ve Akinloye'nin çalışmasında, sıcaklık ölçümleri için düşük maliyetli bir datalogger sisteminin tasarımı PIC18F452 mikrodenetleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma, Proteus simülasyon yazılımıyla doğrulanmıştır. LM35 sıcaklık sensöründen gelen analog verileri ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) ile işler. Veriler gerçek zamanlı olarak bir LCD ekranda görüntülenir ve uzun süreli depolama için bir bellek modülüne kaydedilir. Tasarım, düşük maliyet ve basitlik odaklıdır; Özellikle eğitimsel uygulamalar ve temel çevresel izleme için uygundur [1].

Andrew J. Thompson, John L. Bahr ve Neil R. Thomson, düşük maliyetli ve çok düşük enerji tüketimi ile uzun süre bağımsız çalışabilen bir dijital datalogger tasarlamışlardır. Sistem esas olarak sıcaklık ölçümleri (0,1 °C çözünürlük) için geliştirilmiş olsa da, 0-5 V aralığındaki herhangi bir voltaj değerini ölçebilme kapasitesine sahiptir. Cihaz, eşzamanlı olarak 8 kanal üzerinden 10-bit veri kaydedebilir ve bu bilgileri 512 KByte'lık dahili belleğinde depolar. Tasarımda maliyetin düşük olması ve enerji verimliliği öncelikli hedef olarak belirlenmiş olup, özellikle uzun süreli çevresel gözlem ve veri toplama uygulamaları için uygun bir çözüm sunmaktadır [5].

Rajesh Luharuka, Robert X. Gao ve Sundar Krishnamurty, fizyolojik ölçümler için PIC17C73B tabanlı taşınabilir bir GSR (Galvanik Cilt Tepkisi) datalogger'ını ele almışlardır. Cihaz, ticari bir GSR cihazından cilt iletkenliği verilerini alacak şekilde yapılandırılmış, verileri dahili belleğinde depolamakta ve RS-232 seri portu üzerinden bir bilgisayara aktarabilmektedir. Tasarımın önceliği, taşınabilirlik ve pil ile çalışan mobil uygulamalarda düşük güç tüketimidir. Fizyolojik ölçümler için yeterince küçük boyutlardadır [6].

Gazal, Sangeeta Kamboj, STM32F407 Discovery kartını kullanarak çok kanallı bir datalogger tasarımını ele almıştır. Bu sistem, FreeRTOS işletim sistemi altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. ADC'den gelen veriler, USART üzerinden yazılım terminaline gönderilmektedir. 16 kanaldan elde edilen verileri eşzamanlı olarak hem IC24c02 EEPROM'a hem de kullanılan GSM modülü sayesinde bulut içerisine kaydetmektedir [7].

Patricia Beddows ve Edward Mallon, zorlu çevre koşullarında uzun süreli izleme için Arduino tabanlı bir datalogger sistemi geliştirmiştir. Tasarımda düşük maliyet, enerji verimliliği ve modülerlik ön planda tutulmuştur. Sistem; Arduino Pro Mini, RTC (Gerçek Zamanlı Saat) modülü ve SD kart depolama birimi gibi temel bileşenlerden oluşmakta ve üç adet AA pil ile bir yıldan daha uzun süre çalışabilmektedir. Dayanıklı ve su geçirmez yapısı sayesinde özellikle mağara, su altı ve diğer zorlu çevre koşullarında güvenilir veri kaydı yapılabilmektedir. Farklı sensörlerin eklenmesine olanak tanıyan esnek yapısı sayesinde sıcaklık, iletkenlik ve nem gibi birçok çevresel parametrenin kaydedilmesi mümkündür [8].

Muhammad Irfan Jambak ve arkadaşları, Arduino Uno kullanarak sıcaklık, nem, AEF (Atmosferik Elektrik Alan) büyüklüğü ve konum koordinatlarını kaydetmek için düşük maliyetli bir mobil veri toplama cihazının geliştirilmesini ele almışlardır. Çevreden sıcaklık verilerini gözlemlemek ve toplamak için NTC termistör tabanlı bir sıcaklık modülü kullanılmıştır. Nem değişimlerini gözlemlemek için ise HR202 nem sensörü bulunan bir nem sensörü modülü kullanılmıştır. Ayrıca, toplanan verilerin konumunu belirlemek için bir SKM53 GPS Modülü kullanılmıştır. Tasarımda temel amaç, konum bilgisinin sensör verileriyle birlikte kaydedilerek hareketli uygulamalarda kullanılabilir bir sistem ortaya koymaktır. Cihaz, sensörlerden elde edilen verileri Arduino üzerinden işleyerek hem yerel hafızaya kaydetmekte hem de GPS modülü sayesinde konum bilgisi ile ilişkilendirmektedir. Bu yaklaşım,

özellikle taşınabilirlik, düşük maliyet ve mobil uygulamalarda gerçek zamanlı veri takibi açısından önemli bir katkı sunmaktadır [9].

Akingbade, Alimi ve Oni, biyomedikal sinyallerin (EKG ve sıcaklık) toplanması ve depolanması için düşük maliyetli, batarya ile çalışan bir veri toplama sistemi tasarlamışlardır. Sistem, analog sinyalleri mikrodenetleyicinin analog-dijital dönüştürücüsü aracılığıyla işler ve verileri bir SanDisk SD karta kaydeder. Verilerin, bilgisayarda grafik olarak görüntülenmesi için Visual Basic ile bir kullanıcı arayüzü (GUI) geliştirilmiştir. Tasarım, harici ADC bileşenine ihtiyaç duymamaktadır ve DAC için basit bir alçak geçiren filtre kullanmaktadır, böylece sistem boyutu ve maliyeti azaltılmıştır. Bu veri toplama cihazı, taşınabilirlik, düşük güç tüketimi ve yüksek bellek kapasitesi ile biyomedikal uygulamalar için uygundur, özellikle gelişmekte olan ülkelerde hasta teşhisini kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır [10].

Sri Murti, Prisma Megantoro, Gabriel De Brito Silva ve Andino Maseleno, Arduino Uno ile rüzgar türbinlerinin kontrol sistemlerinde kullanılmak üzere bir DC gerilim-akım datalogger cihazı tasarlamışlardır. Sistem, türbinlerden elde edilen elektriksel parametrelerin izlenmesi ve kaydedilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen datalogger, gerilim sensörü ve akım sensöründen gelen değerleri hem gerçek zamanlı olarak 16x2 LCD ekran aracılığıyla kullanıcıya sunmakta hem de analiz için depolamaktadır. Tasarım, özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde performans takibi ve verimlilik analizi için önemli bir katkı sağlamaktadır [11].

Contreras Contreras ve çalışma arkadaşları, Sensör verilerini kaydetmek ve analiz etmek için Arduino tabanlı bir datalogger ile yapay sinir ağı (ANN) entegrasyonu tasarlamışlardır. Sistem, sensörlerden elde edilen verileri Arduino aracılığıyla toplamakta ve kaydetmekte, ardından bu veriler yapay sinir ağları kullanılarak işlenmektedir. Çalışma, özellikle veri toplama ve analiz süreçlerinin entegre edilmesine odaklanmış olup, düşük maliyetli donanım ile ileri seviye yazılım yöntemlerinin bir arada kullanılabileceğini göstermektedir [12].

Arthur Hawkins, farelerin hareket aktivitelerinin izlenmesi amacıyla bir datalogger sistemi kullanmıştır. Tasarlanan cihaz, deneysel ortamlarda hayvanların davranışlarını sürekli olarak kaydedebilmekte ve bu veriler daha sonra analiz edilerek biyolojik ve davranışsal araştırmalara katkı sağlamaktadır. Çalışma, datalogger teknolojisinin yalnızca mühendislik uygulamalarıyla sınırlı olmadığını, aynı zamanda biyoloji ve sağlık bilimleri gibi farklı disiplinlerde de etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir [13].

Lam Kheng Yik, Atmega32 sistem kartı ile sera ortamlarının izlenmesine yönelik çok sensörlü bir datalogger sistemi geliştirmiştir. Tasarlanan sistem, sıcaklık, nem ve benzeri çevresel parametreleri eşzamanlı olarak ölçerek kaydetmekte ve kablosuz olarak uzaktan bir merkeze aktarabilmektedir. Çalışma, tarım ve seracılıkta verimliliği artırmaya yönelik pratik bir çözüm sunmakta, özellikle hassas tarım uygulamalarında çevresel koşulların sürekli takibini mümkün kılmaktadır [14].

Spinelli, Gottesman ve Deenik, sulama suyu kullanımını izlemek ve CropManage adlı çevrimiçi karar destek sistemine erişim sağlamak için düşük maliyetli, Arduino tabanlı bir veri toplama sistemi tasarlamışlardır. Sistem, çevresel sensörlerden (örneğin, toprak nemi, su akışı) gelen verileri toplar ve bir hücresel modem aracılığıyla FTP protokolü kullanılarak uzaktan bir sunucuya aktarır. Arduino MEGA 2560 Rev3 kartı, düşük maliyetli bileşenler ve açık kaynak yazılım ile geliştirilmiş olup, SD kartta yerel veri depolama özelliğine sahiptir. Tasarım, tarımsal sulama yönetiminde gerçek zamanlı veri izleme ve analiz için optimize edilmiştir. Sistem, CropManage gibi tarım odaklı yazılımlarla entegrasyon sağlayarak sulama verimliliğini artırır ve çiftçilere düşük maliyetli bir çözüm sunar [15].

Akpan, Osakwe ve Ekong, web tabanlı bir hava durumu istasyonu ve dinamik veri toplama sistemi önermişlerdir. Çalışmada, farklı meteorolojik parametrelerin kaydedilmesi ve bu verilerin internet tabanlı bir platform aracılığıyla dinamik olarak izlenebilmesi amaçlanmıştır. Sistem, kullanıcıların gerçek zamanlı verilere uzaktan erişebilmesini sağlamakta ve böylece hem araştırma hem de uygulama alanlarında kullanılabilecek modern bir çözüm sunmaktadır [16].

Danilenko ve diğerleri, uyku/uyanıklık araştırmaları için giyilebilir ışık ve hareket veri toplama cihazlarını inceleyen bir derleme çalışması sunmuşlardır. Bu sistemler, ışık yoğunluğu ve hareket (aktigrafi) verilerini toplayarak uyku düzeni, sirkadiyen ritimler ve fizyolojik davranış analizlerini destekler. Cihazlar, düşük güç tüketimli mikrodenetleyiciler ve sensörler (örneğin, ışık sensörleri, ivmeölçerler) kullanarak verileri yerel olarak depolar veya kablosuz olarak bir cihaza aktarır. Çalışma, farklı giyilebilir veri toplama cihazlarının tasarımlarını, doğruluklarını ve uygulama alanlarını karşılaştırır. Düşük maliyet, taşınabilirlik ve uzun süreli veri toplama kapasitesi, bu cihazları klinik ve araştırma ortamlarında ideal kılar. Derleme, biyomedikal araştırmalarda veri toplama teknolojilerinin mevcut durumunu ve gelecekteki potansiyelini vurgular [17].

Abbott, Rehm ve Uzun, Diamond Light Source'da yüksek hızlı veri toplama ve görselleştirme için FA Archiver adlı bir datalogger sistemi geliştirmişlerdir. Sistem, fizik deneyleri ve senkrotron ışın hatları gibi yüksek veri hacmi gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Mikrodenetleyici tabanlı bir platform kullanarak, çok kanallı sensör verilerini hızlı bir şekilde toplamakta ve yerel veya merkezi bir veritabanında depolamaktadır. Ayrıca gerçek zamanlı veri görselleştirme ve analiz için kullanıcı dostu bir arayüz sunmaktadır. Tasarım, yüksek hız, güvenilirlik ve büyük ölçekli veri işleme kapasitesine odaklanarak, bilimsel araştırma ortamlarında veri toplama süreçlerini optimize etmektedir [18].

Saad ve çalışma arkadaşları, araç performans testleri için çok yönlü bir datalogger tasarlamış ve geliştirmiştir. Sistem, araç hızı, motor devri, sıcaklık ve yakıt tüketimi gibi birden fazla parametreyi ölçmek ve kaydetmek için mikrodenetleyici tabanlı bir platform kullanmışlardır. Sensörlerden gelen analog ve dijital veriler işlenmekte ve SD kart gibi bir depolama birimine kaydedilmektedir. Tasarım, düşük maliyet, taşınabilirlik ve farklı araç türlerine uyarlanabilirlik üzerine odaklanmıştır. Sistem, gerçek zamanlı veri izleme ve çevrimdışı analiz için PC'ye veri aktarımı sağlamaktadır. Otomotiv mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere optimize edilen bu veri toplama cihazı, araç performansının değerlendirilmesi ve optimizasyonu için uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır [19].

Juwariyah, Prayitno, Krisnawati ve Sulasminingsih, Arduino Mega 2560 ve ESP8266 ile IoT tabanlı bir yangın tespit sistemi tasarlamışlardır. Sistem, duman ve ısı sensörlerinden alınan verileri işleyerek hem gerçek zamanlı uyarı vermekte hem de verileri datalogger aracılığıyla depolamaktadır. IoT entegrasyonu sayesinde kullanıcılar yangın durumunu uzaktan izleyebilmekte ve veri geçmişine erişebilmektedir. Çalışma, özellikle ev güvenliği ve erken uyarı sistemlerinde düşük maliyetli ve etkili bir çözüm sunmaktadır [20].

Seefeldner ve arkadaşları, meteorolojik ve çevresel ölçümler için iki eksenli bir izleme sistemi ve buna entegre bir datalogger cihazı tasarlamışlardır. Sistem, güneş ışınımı veya diğer çevresel parametreleri izlemek için sensörleri iki eksenli bir mekanizma ile konumlandırır. Cihazın elektronik donanımı programlanabilir mantık denetleyicisi (PLC) tabanlıdır. Veriler, yerel bir depolama biriminde kaydedilir. Tasarım, yüksek doğruluklu konumlandırma ve düşük güç tüketimi üzerine odaklanmıştır, bu da onu uzun süreli meteorolojik gözlemler ve çevresel izleme uygulamaları için uygun hale getirir. Sistem, özellikle araştırma ortamlarında hassas veri toplama ve analiz için optimize edilmiştir [21].

Umsup, Tammark ve Thanpattranon, akıllı tarım traktörleri için düşük maliyetli bir veri toplama modülünün performansını değerlendirmiştir. Sistem, tarım arazilerinde traktörün konum, hız ve hareket rotasını kaydetmek için GPS modülü ile Arduino MEGA2560 tabanlı bir platform kullanır. Veriler, SD kart içerisine kaydedilir ve tarım operasyonlarının optimizasyonu için analiz edilir. Tasarım, düşük maliyet, taşınabilirlik ve kolay entegrasyon üzerine odaklanmıştır. Sistem, akıllı tarım uygulamalarında hassas tarımı desteklemek için geliştirilmiş olup, traktör hareketlerinin izlenmesi ve verimliliğin artırılması için uygun maliyetli bir çözüm sunar. Performans testleri, modülün yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu göstermiştir [22].

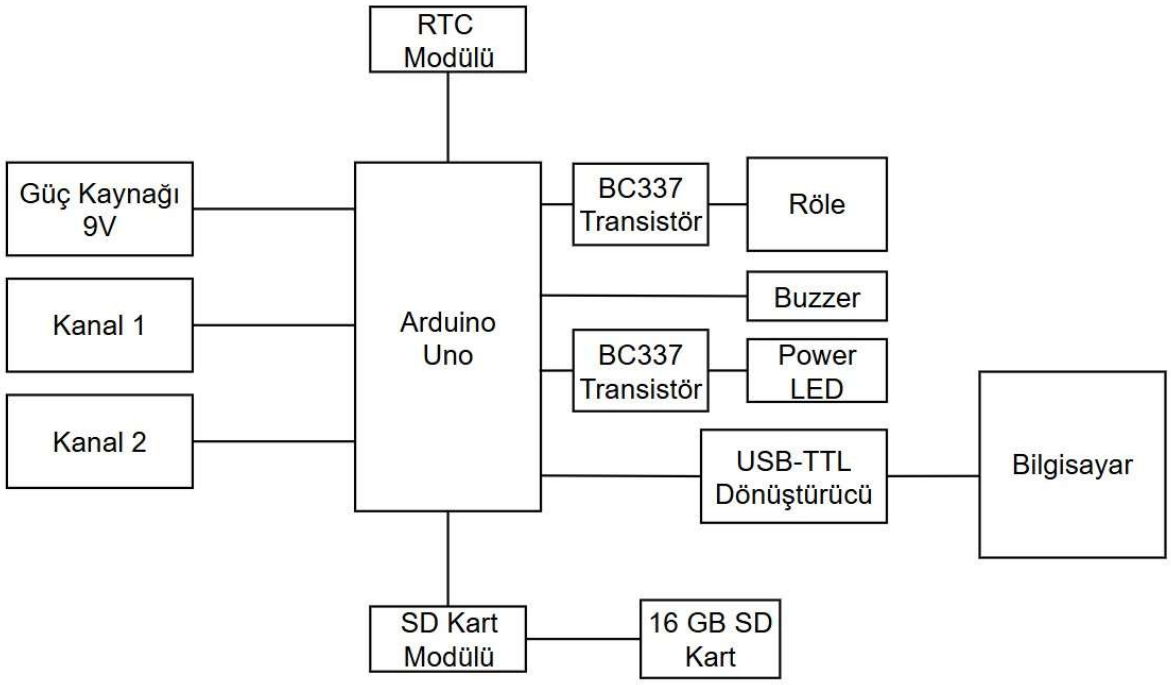
Lu, Tan, Phung, Khawaja ve Blackburn, elektrik sistemlerinde yalıtım testleri için geri kazanım gerilimi (recovery voltage) ölçümleri yapmak üzere bilgisayar tabanlı bir veri toplama sistemi geliştirmişlerdir. Sistem, yalıtım malzemelerinin dielektrik özelliklerini değerlendirmek için yüksek hassasiyetli gerilim ölçümleri gerçekleştirir ve verileri bir mikrodenetleyici veya bilgisayar tabanlı platform üzerinden toplar. Ölçümler, yerel bir depolama birimine

kaydedilir ve çevrimdışı analiz için bir bilgisayara aktarılır. Tasarım, düşük maliyet, yüksek doğruluk ve veri işleme esnekliği üzerine odaklanmıştır. Sistem, elektrik mühendisliği uygulamalarında, özellikle transformatör ve kablo yalıtım testlerinde kullanılmak üzere optimize edilmiştir, böylece yalıtım arızalarının erken teşhisi ve sistem güvenilirliği artırılmıştır [23].

Bu çalışmada, iki analog girişten gelen verilerin izlenmesi ve kaydedilmesi amacıyla Arduino Uno tabanlı bir datalogger sisteminin tasarımı ele alınmaktadır. Sistemde, 0-5 V aralığında sinyal üreten herhangi bir kaynaktan elde edilen veriler, Arduino'nun 10 bit çözünürlüklü ADC modülü tarafından okunmakta ve hem gerçek zamanlı görüntüleme hem de veri kaydı işlemleri gerçekleştirilmektedir. Elde edilen veriler, USB-TTL dönüştürücü aracılığıyla bilgisayara aktarılmakta ve C# programlama dili kullanılarak geliştirilen bir arayüz üzerinden grafiksel olarak görüntülenmektedir.

Ayrıca, sistemde SD kart modülü kullanılarak ölçülen veriler zaman damgalı biçimde kaydedilmektedir. Belirlenen bir eşik değerinin üzerinde bir ölçüm tespit edilmesi durumunda, buzzer ve LED devreye girerek kullanıcıya sesli ve görsel uyarı sağlamakta, aynı zamanda röle çıkışı aktif hale gelmektedir. Bu sayede, hem veri izleme hem de kontrol işlevlerini yerine getiren, düşük maliyetli ve çeşitli sensörlerle uyumlu bir sistem olmaktadır.

MATERYAL VE METOD Devrenin Blok Şeması



Şekil 1. Devrenin blok şeması

Şekil 1'de datalogger devresinin blok şeması görülmektedir. Mikrodenetleyici olarak açık kaynaklı yapısı, geniş kütüphane desteği ve 10-bit ADC ile 0-5V analog sinyalleri doğrudan okuyabilmesi nedeniyle Arduino Uno (Atmega328p) seçilmiştir. Düşük güç tüketimi (~50mA) ve kolay programlama (Arduino IDE ile C/C++ desteği) ile prototip geliştirme sürecini hızlandırmaktadır.

SD karta veri yazmak için yaygın bulunabilirliğinden ötürü Catalex MicroSD Kart modülü seçilmiştir. Arduino ile SPI protokolüyle haberleşerek Kanal 1 ve Kanal 2'den gelen verilerin SD karta kaydedilmesini sağlayacaktır.

Sistemde yüksek görünürlükte görsel uyarı vermek amacıyla 1W kırmızı Power LED seçilmiştir. Bu sayede sistem eşik değer aşıldığında kullanıcıyı etkili biçimde uyarabilir. Ancak 1W Power LED yaklaşık 350 mA akım çekeceği

ve Arduino'nun dijital pinleri 20-40 mA arasında bir akım sağlayabildiği için, LED'in bir sürücü devre aracılığıyla çalıştırılması gerekmektedir. Bu amaçla, 350 mA'lik LED akımını güvenle anahtarlayacak yeterli kapasiteye (>800 mA) sahip olması, yaygın bulunabilirliği ve Arduino ile kolayca sürülebilmesi nedeniyle BC337 transistör tercih edilmiştir.

Sesli uyarı için, Arduino'nun dijital pininden doğrudan tetiklenebilmesi ve 85-100 dB ses seviyesi ile etkili alarm vermesi nedeniyle 5V piezo buzzer seçilmiştir.

Sistem, bir uyarı durumu tespit edildiğinde görsel ve sesli ikaz vermenin yanı sıra, sistemin güvenliğini simüle etmek amacıyla bir 5V tek kanal röleyi de tetikleyecektir. Bu röle fiziksel olarak herhangi bir yüke bağlı olmamasına rağmen, sistemin tehlike anında otomatik koruma veya güç kesme mekanizmalarını devreye sokma yeteneğini temsil etmektedir. Röle olarak HLS T78 DC5V tek kanal röle kullanılacaktır. Ayrıca rölenin kontrolü, Arduino'nun doğrudan sağlayamayacağı akımı yönetmek üzere BC337 NPN BJT transistörü kullanılarak gerçekleştirilecektir. Röle bobininin enerjisi kesildiğinde, bobin üzerinde yüksek voltajlı ve ters yönlü bir geri elektromotor kuvvet (EMF) voltajı indüklenir. Bu ani voltaj yükselmesi transistöre zarar verebilir. 1N4001 diyodu ile bu ters voltajı kısa devre ederek transistörün korunması sağlanacaktır.

Ölçülen verilerin zaman bilgisiyle birlikte kaydedilmesini sağlamak amacıyla RTC (Gerçek Zamanlı Saat) modülü kullanılacaktır. RTC modülü, Arduino'nun kendi zaman sayacıyla kıyaslandığında çok daha yüksek doğruluk ve kararlılık sunar; böylece uzun süreli veri kaydında saat ve tarih bilgilerinin doğruluğu garanti edilir. Bu projede DS3231 modeli tercih edilmiştir. DS3231, yüksek hassasiyeti ve dahili sıcaklık kompanzasyonu sayesinde zaman sapmalarını minimuma indirir ve I2C iletişim protokolü ile Arduino'ya kolayca entegre edilebilir. Modül, ölçülen verilerin zaman damgalı olarak SD karta kaydedilmesi için önemli bir rol üstlenmektedir.

Bilgisayar ve Arduino ile iletişimi sağlayabilmek amacıyla PL2303 USB-TTL Dönüştürücü modülü kullanılacaktır. Bu modül Arduino ve bilgisayar arasında seri haberleşmeyi sağlayacak ve iletişimin kurulmasına imkan tanıyacaktır.

Projemizin bilgisayar tarafındaki veri görselleştirme ve izleme işlemleri için C# programlama dili kullanılacaktır.

C# dilinin veri işleme ile seri iletişim alanında sahip olduğu kapsamlı kütüphane desteği, bu tercihin temel nedenidir. Arduino ile seri haberleşme, C#'ın yerleşik System.IO.Ports.SerialPort sınıfı aracılığıyla doğrudan sağlanacaktır. Bu sayede, Arduino'dan ölçülen veriler gerçek zamanlı ve kesintisiz olarak güvenilir bir şekilde bilgisayara aktarılabilecektir.

Verilerin grafiksel olarak gösterimi için C# .NET ekosistemindeki Chart özelliği kullanılacaktır. Bu araç, veri görselleştirme konusunda gereken esnekliği sunmakta ve ölçüm sonuçlarının anlaşılır, okunabilir ve profesyonel grafikler halinde sunulmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, kullanıcıların verileri hem gerçek zamanlı izleyebilmesini hem de analiz edebilmesini mümkün kılmaktadır.

Projenin Adımları

İlk adım olarak malzeme seçimleri yapılmıştır. Tasarlanacak sistemin gereksinimleri ve mevcut kısıtlar dikkate alınarak Arduino Uno, Catalex MicroSD Kart Modülü, 16 GB SanDisk MicroSD Kart, 1W Kırmızı Power Led, BC337 Transistör, 1N4001 diyot, DS3231 RTC Modülü, 5V Piezo Buzzer donanımları tercih edilmiştir.

Malzeme seçiminin ardından datalogger sisteminde kullanılacak yazılımların geliştirilmesine geçilecektir. Yazılım geliştirme adımı, sistemin donanım bileşenlerini entegre etmek ve işlevsel hale getirmek amacıyla Arduino Uno tarafında gömülü yazılım ve bilgisayar tarafında kullanıcı arayüzü olmak üzere iki ana katmanda gerçekleştirilecektir. Arduino yazılımı, giriş verilerinin okunması, eşik kontrolü, uyarı mekanizmalarının tetiklenmesi, SD karta zaman damgalı veri kaydı ve bilgisayar ile seri iletişim için C/C++ tabanlı olarak Arduino IDE kullanılarak geliştirilecektir. Bu yazılımda RTC modülü için RTClib, SD kart modülü için SD ve SPI gibi açık

kaynak kütüphaneler kullanılacaktır. Arayüz, C# programlama dili ile oluşturulacaktır. Arduino ile bilgisayar arasındaki iletişim, USBTTL dönüştürücü aracılığıyla sağlanacak olup, seri haberleşme protokolü üzerinden veri iletimi gerçekleştirilecektir.

Projenin bir sonraki adımı, elektronik bileşenlerin fiziksel düzenlemesini ve bağlantılarını tanımlayan Devre

Şeması Çizimi ve ardından Baskı Devre Kartı (PCB) Tasarımı sürecidir. Bu süreç, açık kaynaklı EDA yazılımı olan KiCad kullanılarak gerçekleştirilecektir. Aynı yazılım üzerinden devrenin PCB tasarımı ve 3D modeli de üretilecektir.

Son olarak tasarım aşaması gerçekleştirilen proje devresi, gerçek donanım üzerinde kurulacaktır. Bu aşamada, Arduino Uno mikrodenetleyici, SD kart modülü, USB-TTL dönüştürücü, röle, transistörler, 1W Power LED ve buzzer gibi tüm bileşenlerin fiziksel olarak bağlantıları yapılacak ve devre kartı üzerine monte edilecektir.

Devre Hesaplamaları *Örnekleme Hızı* Arduino tarafında, her veri gönderme işleminden sonra yazılım 10 milisaniye bekleme durumuna geçmektedir. 1

$$f_{örnekleme} = \frac{}{0.01} = 100\ Hz \qquad (1)$$

Bu durum, Eşitlik (1)'de görüldüğü gibi sistemin saniyede 100 örnek alıyor olduğu anlamına gelmektedir. İletişim 9600 baud rate hızı ile sağlanmaktadır. Arduino, iki analog pinden gelen veriler için veri başına ortalama 3 karakter, verileri arayüz tarafında ayırt edebilmek için 1 karakter virgül ifadesi ve 1 karakter satır sonu ifadesi olmak üzere toplam 8 karakterlik veri göndermektedir. Her karakterin 1 byte, dolayısıyla 8 bit olmasından ötürü 56 bit veri gönderilmektedir. Saniyede 100 örnek için ne kadar veri gönderileceği Eşitlik (2) ile hesaplanabilir.

$$100 \times 56 = 5600 \frac{bit}{saniye} \qquad (2)$$

Eşitlik (2)'de gösterildiği gibi en kötü durumda saniyede 5600 bit veri gönderilmektedir. Dolayısıyla 9600 baud rate değeri sistem için yeterli bir iletişim hızıdır.

Power LED İçin Hesaplamalar

Devrede kullanılan 1W Power LED, 350mA akım çekebilmektedir. Bu yüzden bir transistör aracılığıyla çalıştırılması gerekmektedir. Bu devrede BC337 transistörü kullanılacaktır. Power LED, transistörün kollektörüne 9V besleme ve 20 ohm direnç ile bağlıdır. LED'in ortalama olarak 3V gerilim alacağını varsayarsak, transistörün kollektör ayağından geçen akım Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_C = \frac{V_{besleme} - V_{LED} - V_{CE}}{R_C} \quad \frac{9 - 3 - 0.7}{20} == 265\ mA \qquad (3)$$

Burada 20 ohm direncin 1.5 Watt değerinden daha az bir güç değerine sahip olmaması gerektiğini unutmamak önemlidir.

Transistörün base ayağına 330 ohm ile birlikte Arduino'nun dijital pini bağlıdır. Arduino'nun dijital pinleri 5V gerilim verebilmektedir. Bu durumda base akımı Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_B = \frac{V_{pin} - V_{BE}}{R_B} \quad \frac{5 - 1.2}{330} == 11.5\ mA \qquad (4)$$

Arduino 20 mA değerine kadar akım verebildiği için 330 ohm direncin 220 ohm değerine kadar düşürülmesi transistörün tam doyuma ulaşabilmesi açısından daha iyi olabilir.

Transistörün bu değerlere dayanıp dayanamayacağını anlamak için üzerinde harcanacak gücü hesaplamamız gerekmektedir.

$$P = V_{CE} \times I_C = 0.7 \times 265\ mA = 185.5\ mW \qquad (5)$$

Eşitlik (5)'de gösterildiği gibi transistör üzerinde harcanan güç, transistörün datasheet'inde belirtilen 625 mW değerinden yeterince yüksektir. Elde edilen değerler BC337 transistörün dayanabileceği sınırlar dahilinde olduğundan bu transistörün kullanılmasına karar verilmiştir.

Röle İçin Hesaplamalar

Röle olarak HLS T78 DC5V tek kanal DC röle kullanılmıştır. Rölenin yaklaşık direnci 50 Ω olarak belirtilmiştir. Dolayısıyla rölenin çalışacağı akım değeri (0.6 W için) Eşitlik (6) ile hesaplanabilir.

$$I_{bobin} = \frac{P}{V} = \frac{0.6}{5} = 120\ mA \qquad (6)$$

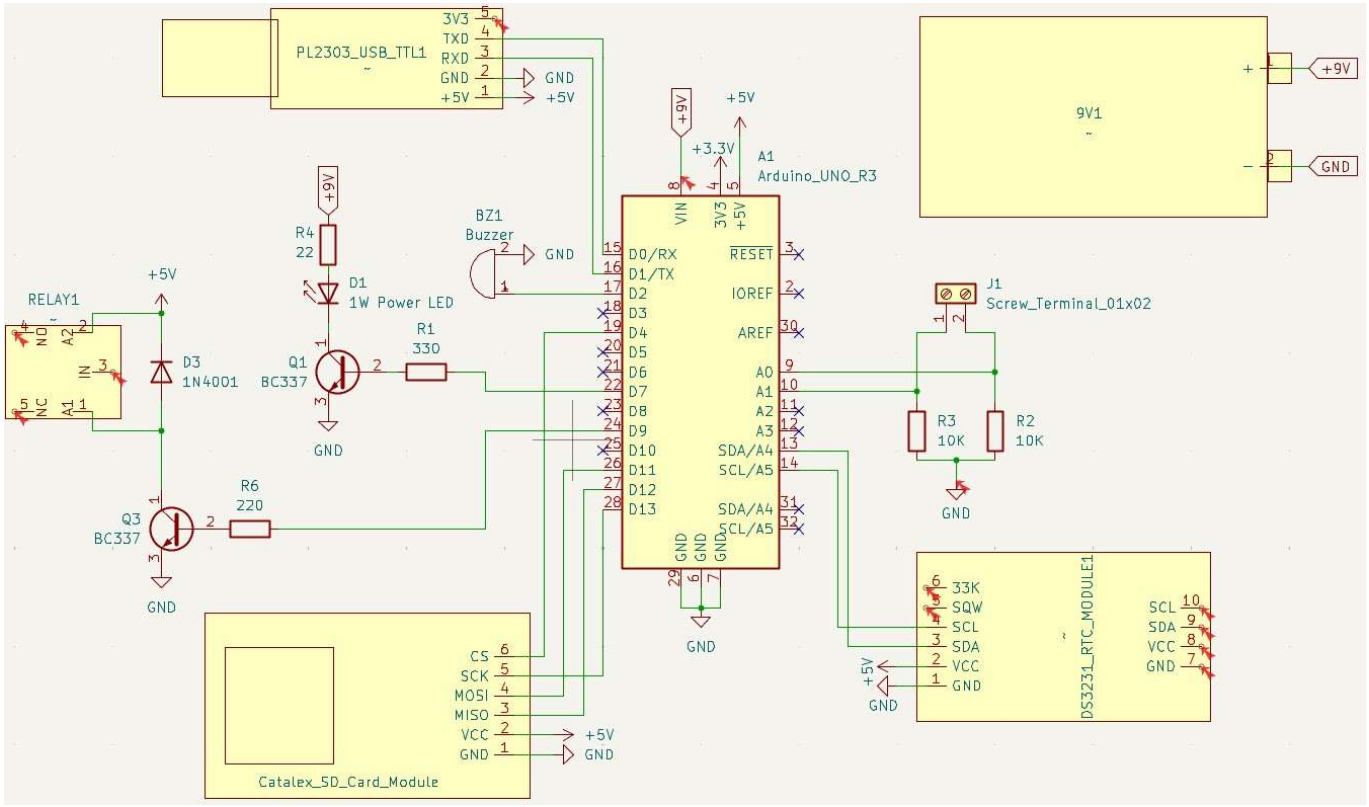
Eşitlik (6)'da elde edilen rölenin akım değeri, aynı zamanda kollektör akımıdır. Anahtarlamayı sağlayan base ayağının akım hesabı Eşitlik (7) kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_{base} = \frac{V_{pin} - V_{BE}}{220} \quad \frac{5 - 0.7}{220} == 19.5\ mA \qquad (7)$$

Eşitlik (7)'de elde edilen değer rölenin hızlı ve tam doyuma ulaşarak sorunsuz bir şekilde tetiklenmesini garanti eder.

Devre Tasarımı ve Yazılımı

Sistemin donanımsal yapısı KiCad yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Devre, sensör girişleri, Arduino mikrodenetleyicisi, transistör tabanlı LED sürücü ve güç dağıtım hatlarını içermektedir. Tasarım aşamasında her bileşenin görevine uygun bağlantılar sağlanmış, giriş-çıkış pinleri açıkça belirtilmiş ve sistemin modüler olarak genişletilebilir olması gözetilmiştir.

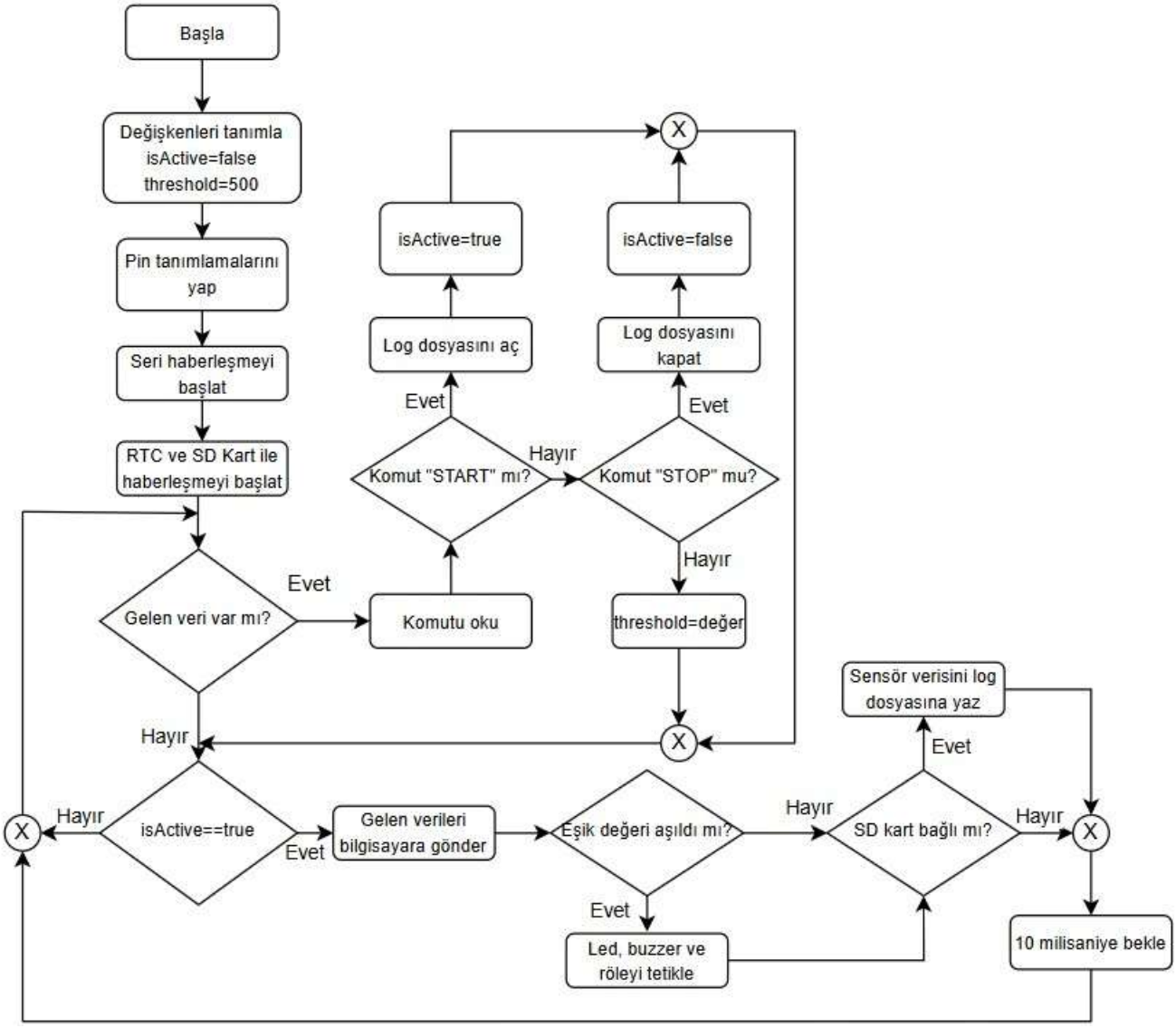


Şekil 2. Devrenin şematik tasarımı

Arduino tarafında geliştirilen yazılım, bilgisayar üzerinden gönderilen komutlara bağlı olarak sensör verilerini okumakta ve belirlenen eşik değerine göre dijital çıkışları kontrol etmektedir.

Sistem, iki adet analog giriş (A0 ve A1) üzerinden verileri okumakta ve bu değerleri seri port aracılığıyla bilgisayara iletmektedir. Yazılım, bilgisayar tarafından gönderilen komutları dinler ve “START” komutu alındığında veri toplama işlemini başlatır, “STOP” komutu alındığında ise durdurur.

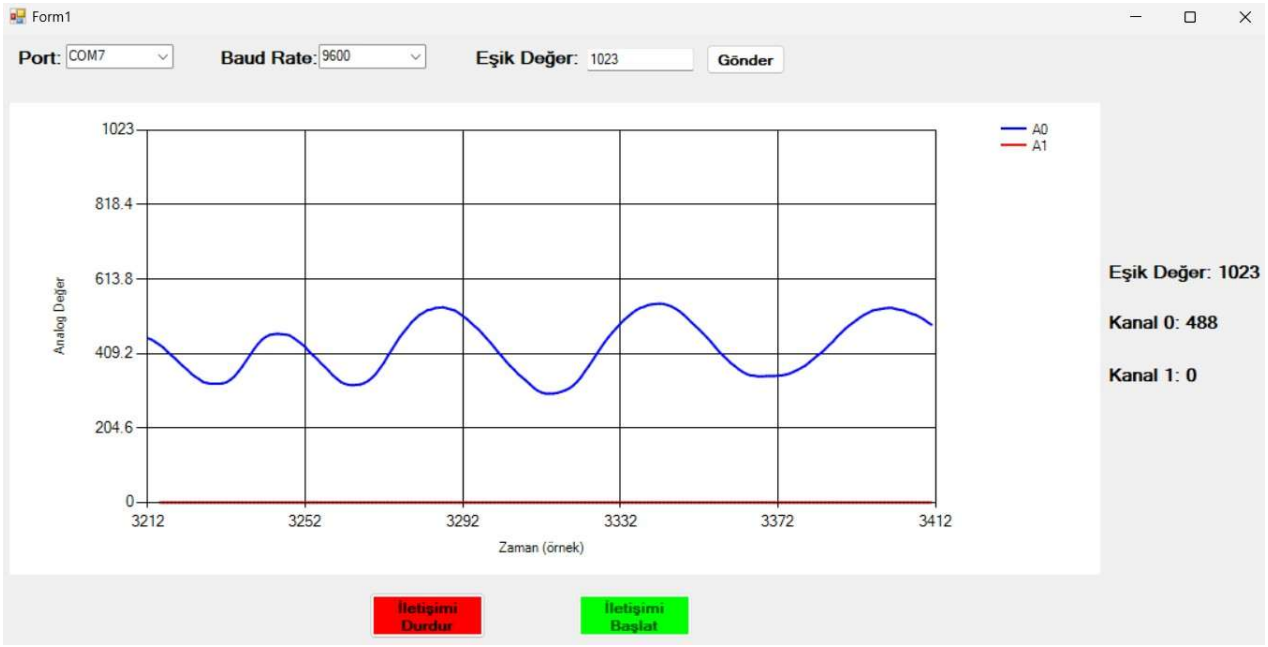
Bunun dışında, bilgisayardan sayısal bir değer gönderilirse bu değer eşik değeri (threshold) olarak algılanır ve sistem, bu yeni değerle çalışmaya devam eder. Ölçülen herhangi bir analog giriş değeri eşik değeri aştığında, led, buzzer ve röleye bağlı dijital pinler aktif hale getirilir. Böylece sistem, sensör verilerinin belirlenen sınırları aşıp aşmadığını hem görsel hem de sesli olarak bildirir. Bu yapı sayesinde, sistem hem otomatik hem de uzaktan kontrol edilebilir bir işleve sahip olmaktadır.



Şekil 3. Arduino akış diyagramı

Arayüz Yazılımı

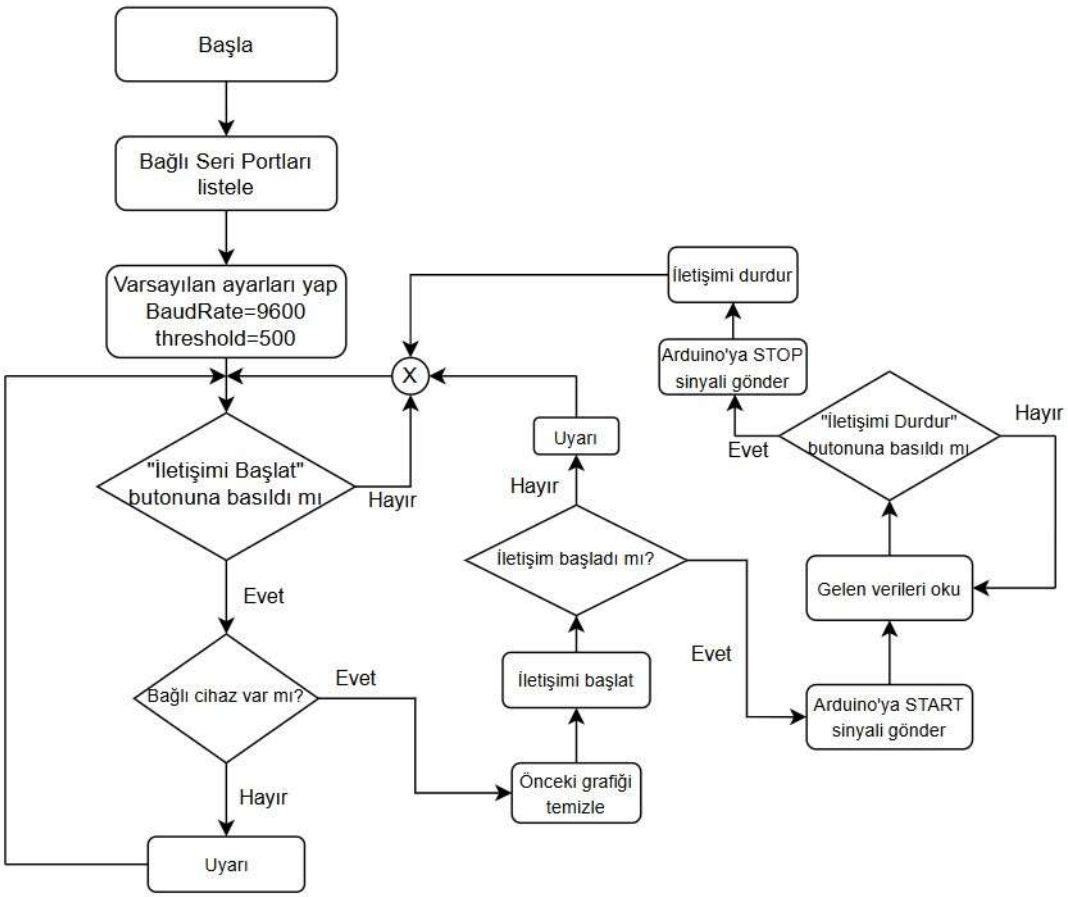
Bu projede geliştirilen bilgisayar arayüz yazılımı, C# programlama dili kullanılarak Windows Forms platformu üzerinde tasarlanmıştır. Arayüzün temel amacı, Arduino tabanlı datalogger sisteminden seri haberleşme aracılığıyla gelen verilerin gerçek zamanlı izlenmesini, grafiksel olarak gösterilmesini ve eşik değer kontrolü gibi kullanıcı etkileşimlerinin sağlanmasını mümkün kılmaktır.



Şekil 4. Bilgisayar arayüzü

Şekil 4'te bilgisayar tarafında çalışacak yazılımın arayüz tasarımı görülmektedir. Uygulama başlatıldığında, bilgisayara bağlı herhangi bir cihaz olup olmadığı kontrol edilmekte ve mevcut bağlantılar "Port" kısmında listelenmektedir. İletişim hızı ve eşik değeri varsayılan olarak önceden belirlenmiştir, ancak kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Eşik değerinin değiştirilmesi istenirse, yeni değer girilerek "Gönder" butonuna basılır. Sistem bilgisayara bağlı durumdaysa, belirlenen yeni eşik değeri cihaza iletilir. Bu özellik, eşik değerinin bilgisayar üzerinden dinamik olarak değiştirilebilmesini sağlar.

"İletişimi Başlat" butonuna basıldığında, yazılım Arduino'nun bağlı olduğu port üzerinden iletişim başlatarak Arduino'ya veri gönderimi için bir başlangıç sinyali yollar. Arduino bu sinyali aldıktan sonra iki analog pininden okuduğu verileri bilgisayara göndermeye başlar. Bilgisayara aktarılan bu veriler arayüz üzerinde grafiksel olarak gösterilmektedir.



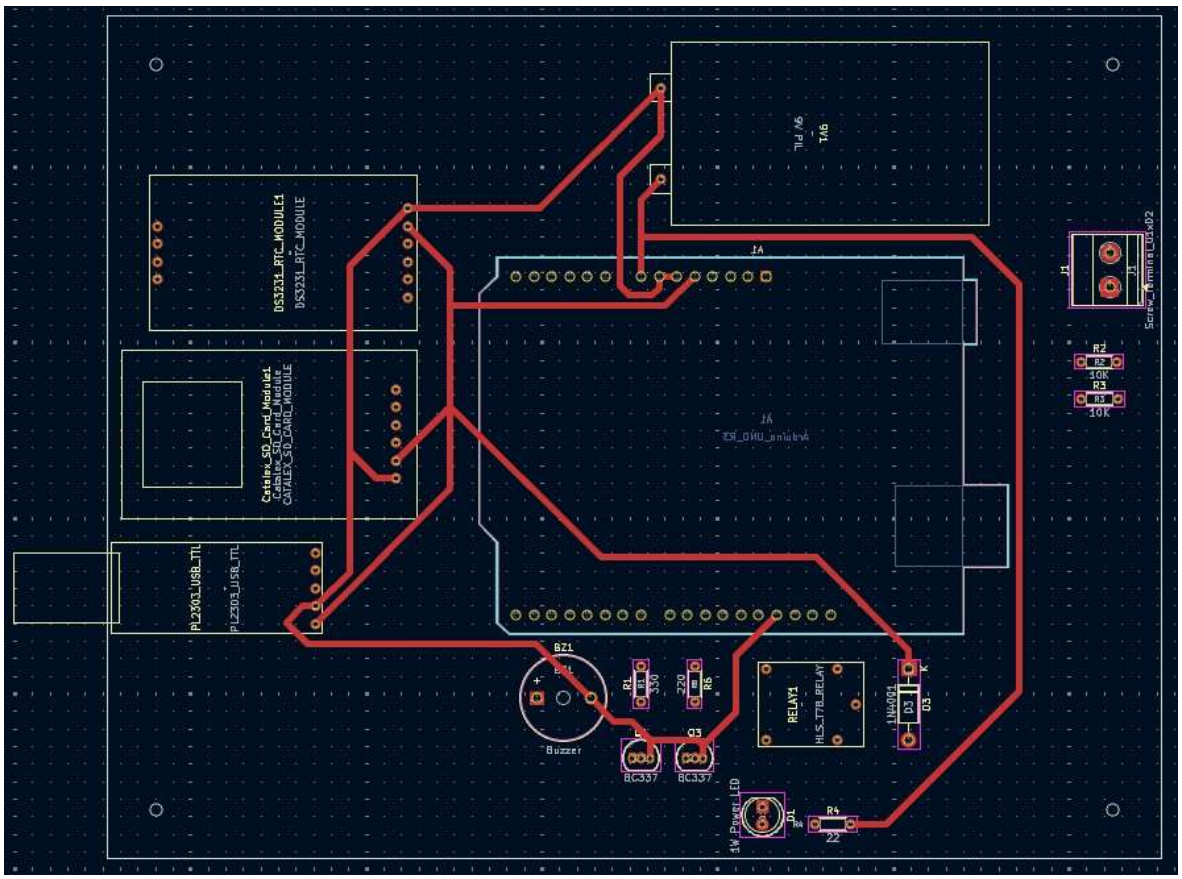
Şekil 5. Arayüz akış diyagramı

PCB Tasarımı

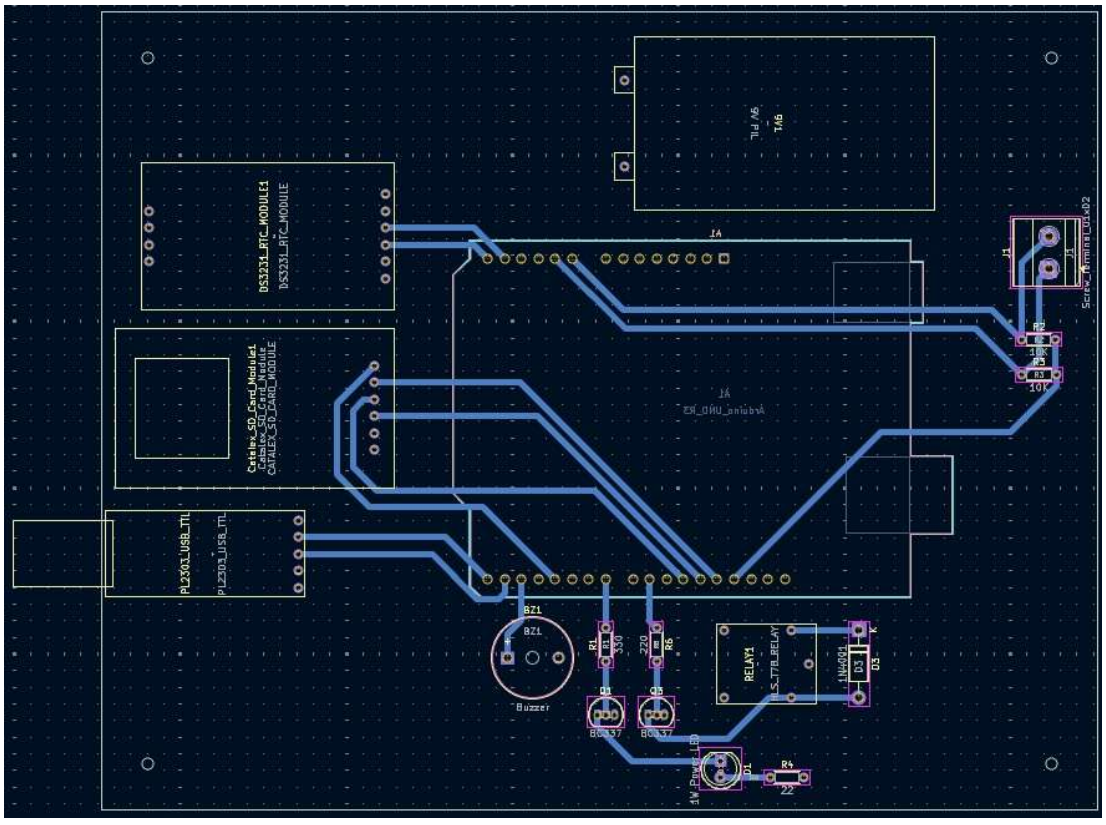
Devrenin şematik tasarımının ardından, fiziksel bileşenlerin yerleşimi ve bağlantı yollarının düzenlenmesi amacıyla PCB (Printed Circuit Board) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreci, KiCad PCB Editor kullanılarak yürütülmüştür.

Tasarım iki katmanlı olarak yapılmıştır. Üst katman ağırlıklı olarak 5V ve GND hatları için ayrılmış, bu sayede güç dağıtımı daha kararlı ve düşük dirençli bir şekilde sağlanmıştır. Alt katman ise sinyal hatları ve diğer bağlantılar için kullanılmıştır.

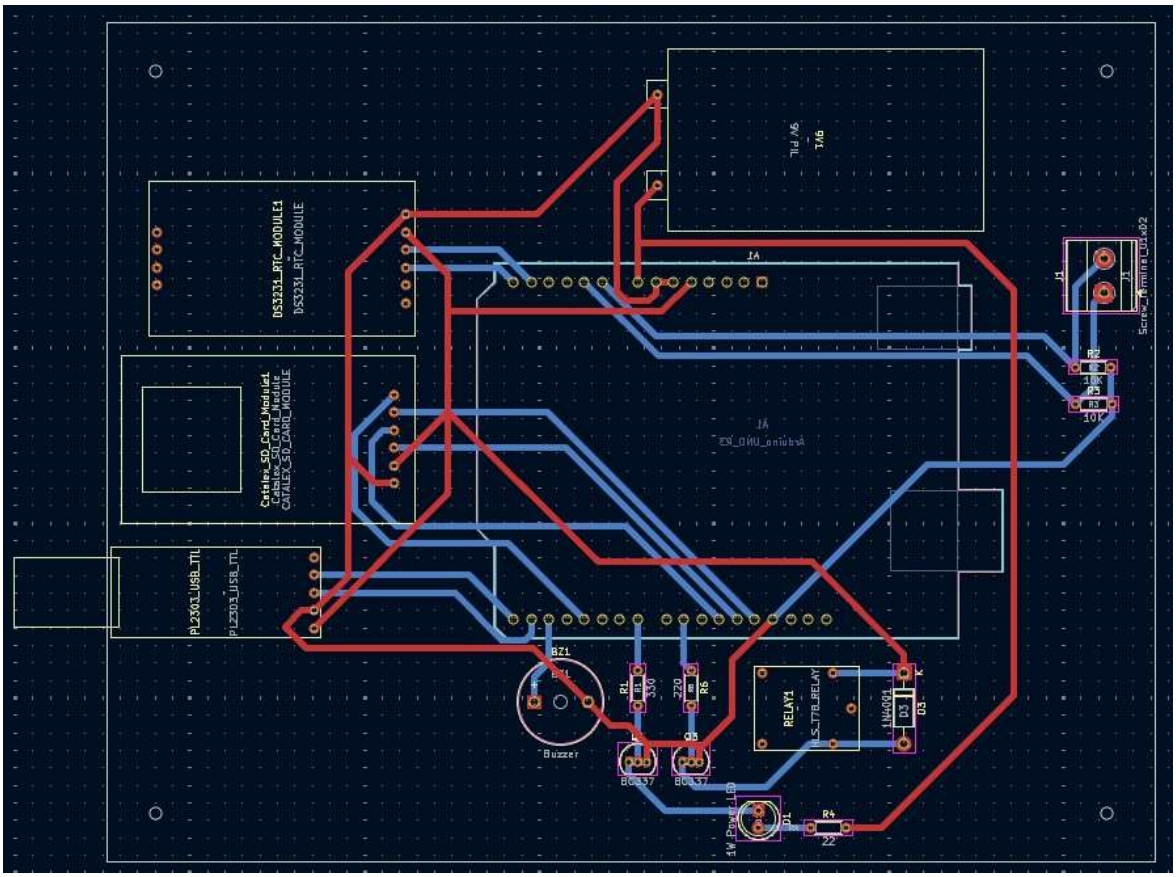
Şematik tasarımdan aktarılan bileşenler, kart üzerinde sinyal yollarının kısa ve düzenli olacak şekilde yerleştirilmiştir. Devre yolları, kolay çizilebilirlikleri göz önünde bulundurularak daha geniş hat kalınlıklarıyla çizilmiş; analog ve dijital hatlar arasında parazit etkilerini azaltmak için uygun mesafeler korunmaya çalışılmıştır. Ayrıca, katmanlar arasında yönlendirmeler yapılırken sinyal bütünlüğünü korumaya özen gösterilmiştir.



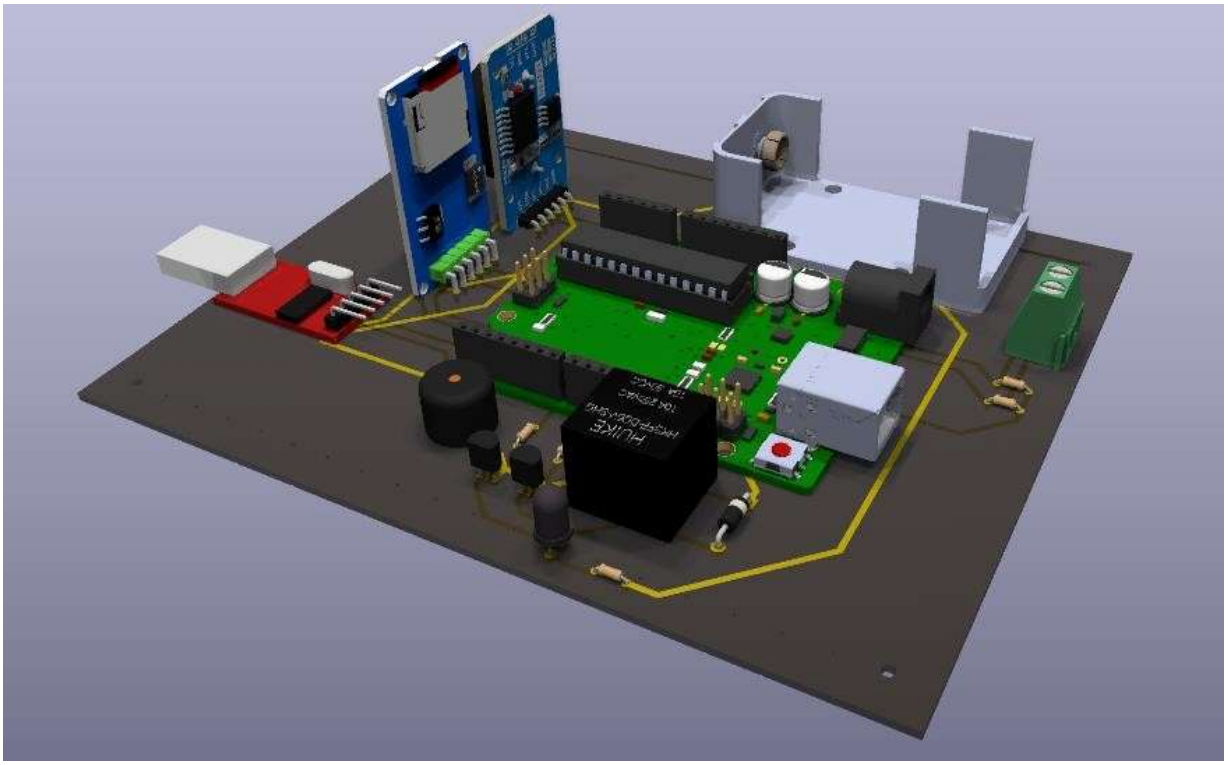
Şekil 6. PCB üst katman bağlantıları



Şekil 7. PCB alt katman bağlantıları



Şekil 8. PCB tüm bağlantıları



Şekil 9. Devrenin 3 boyutlu modeli

Şekil 9'da ise aynı kartın üç boyutlu görünümü verilmiştir. Bu model, devre bileşenlerinin gerçek boyutları ve konumlarıyla görselleştirilmesini sağlayarak üretim öncesi kontrollerin yapılmasına olanak tanımaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, analog sensör verilerini eş zamanlı okuyarak hem yerel bir depolama birimine (SD Kart) kaydedebilen hem de bilgisayar arayüzüne aktarıp görselleştirebilen bir datalogger sisteminin temel mimarisi ve yazılım altyapısı ele alınmıştır.

Arduino tabanlı donanım ve C# tabanlı kullanıcı arayüzü yazılımının entegrasyonuyla, sistemin hem veri toplama hem de gerçek zamanlı görselleştirme aşamalarında verimli, kararlı ve kullanıcı dostu bir biçimde çalışması hedeflenmiştir. Donanım kısmında sensörlerden alınan analog verilerin BC337 transistörlü sürücü devresi aracılığıyla kontrol edilmesi ve kritik koşullarda röle/LED'in güvenle tetiklenmesi mekanizması oluşturulmuştur. Yazılım tarafında ise, bilgisayar ile mikrodenetleyici arasındaki seri haberleşme protokolü (UART) üzerinden güvenilir ve kesintisiz veri iletişimi sağlanmıştır. Tasarım sürecinde düşük maliyetli, kolay bulunabilir bileşenlerin tercih edilmesi, sistemin ekonomik olarak uygulanabilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırmıştır.

Bu projenin temel çıktısı, sensör verilerinin gerçek zamanlı olarak anlık izlenebilmesi ve tanımlanan eşik değerlerine göre sistemin otomatik ve hızlı tepki verebilme yeteneğinin kazandırılmasıdır. Elde edilen bu temel veri toplama altyapısı, yalnızca laboratuvar ortamlarında değil; endüstriyel proses izleme, çevresel parametre takibi veya enerji yönetimi gibi birçok farklı alanda uygulanabilecek sağlam bir temel oluşturmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu tasarımın potansiyelini en üst düzeye çıkarmayı hedeflemektedir.

Öncelikli olarak, tasarlanan devrenin fiziksel olarak prototiplenmesi ve gerçek saha koşullarında ölçüm doğruluğunun ve güvenilirliğinin deneysel olarak test edilmesi planlanmaktadır.

REFERANSLAR

[1] Okwudibe, C. D., & Akinloye, B. O. (2017). *Design and simulation of temperature data logger.* American Journal of Engineering Research (AJER), 6(12), 14-19.

[2] Roberson, P. (2004). *Using data loggers.* Science Teachers' Workshop, North Sydney.

[3] Perez, S. J., Calva, M. A., & Castaneda, R. (1997). *A microcontroller-based data logging system.* Instrumentation and Development, Journal of the Mexican Society of Instrumentation, 3(8).

[4] Steiner, C. (1997-2005). *Introduction to LCD programming tutorial.* Vault Information Services LLC. http://8052.com/tutlcd.phtml

[5] Thompson, A. J., Bahr, J. L., & Thomson, N. R. (n.d.). *Low power data logger.* Proceedings of the Department of Physics, UNIVERSITY of Otago, Dunedin.

[6] Luharuka, R., et al. (n.d.). *A microcontroller-based portable GSR data logger for physiological sensing.* Proceedings of the Department of Mechanical and Industrial Engineering, UNIVERSITY of Massachusetts, Amherst.

[7] Gazal, S. K. (n.d.). Designing and implementation of FreeRTOS multichannel data logger using microcontroller.

[8] Beddows, P. A., & Mallon, E. K. (2018). Cave Pearl data logger: A flexible Arduino-based logging platform for long-term monitoring in harsh environments. Sensors, 18(2), 530.

[9] Sidik, M. A. B., Rusli, M. Q. A., Adzis, Z., Buntat, Z., Arief, Y. Z., Shahroom, H., ... & Jambak, M. I. (2015). *ArduinoUno based mobile data logger with GPS feature.* Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), 13(1), 250-259.

[10] Akingbade, K. F., Alimi, I. A., & Oni, T. (2015). *Design of a data logger for biomedical signals.* International Journal of Electronics and Electrical Engineering (IJEEE), 3(2), 149-152.

[11] Murti, S., Megantoro, P., Silva, G. D. B., & Maseleno, A. (2020). *The design and analysis of DC electrical voltage-current datalogger device implemented on wind turbine control system.* Journal of Robotics and Control (JRC), 1(3), 75-80.

[12] Contreras, G. C., Dulcé-Moreno, H. J., & Melo, R. A. (2019, November). *Arduino data-logger and artificial neural network to data analysis.* In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1386, No. 1, p. 012070). IOP Publishing.

[13] Hawkins, A. E. (1966). *The use of a data logger for monitoring rat activity.* Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen, 14(1), 72-77.

[14] Yik, L. K. (2012). *Remote data logger with multi-sensor for greenhouse.* Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Malaysia Pahang.

[15] Spinelli, G. M., Gottesman, Z. L., & Deenik, J. (2019). A low-cost Arduino-based datalogger with cellular modem and FTP communication for irrigation water use monitoring to enable access to CropManage. HardwareX, 6, e00066.

[16] Akpan, V., Osakwe, R., & Ekong, S. A. (2016). A hypothetical database-driven web-based meteorological weather station with dynamic datalogger system. Atmosphere, 6(1).

[17] Danilenko, K. V., Stefani, O., Voronin, K. A., Mezhakova, M. S., Petrov, I. M., Borisenkov, M. F., ... & Gubin, D. G. (2022). *Wearable light-and-motion dataloggers for sleep/wake research: A review.* Applied Sciences, 12(22), 11794.

[18] Abbott, M. G., Rehm, G., & Uzun, I. S. (2011). *A new fast data logger and viewer at Diamond: The FA Archiver.* Proceedings of ICALEPCS2011, Grenoble, France, 1244-1246.

[19] Saad, Z., Norma, N. H., Md Saad, A. E., Osman, F. N., & Ahmad, K. A. (2009). *Design and development of universal data logger for testing vehicle performance.* Scientific Research Journal, 6(2), 45-54.

[20] Juwariyah, T., Prayitno, S., Krisnawati, L., & Sulasminingsih, S. (2021, May). Design of IoT-based home fire detection system equipped with a data logger. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1125, No. 1, p. 012079). IOP Publishing.

[21] Seefeldner, M., Oppenrieder, A., Rabus, D., Reuder, J., Schreier, M., Hoeppe, P., & Koepke, P. (2004). *A two-axis tracking system with datalogger.* Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21(6), 975-979.

[22] Umsup, K., Tammark, K., & Thanpattranon, P. (2019, August). Performance evaluation of low-cost GPS-data logger module for smart-farm tractor. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 301, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.

[23] Lu, Y. H., Tan, C. K., Phung, B. T., Khawaja, R. H., & Blackburn, T. R. (2002, October). Development of a computerbased data logger for recovery voltage measurements. In Conference Record of The Australasian Universities Power Engineering Conference, Monash UNIVERSITY, Melbourne.

Selçuk University 4th International Technology and Innovation Student Symposium

November 27-30, 2025 Konya, Turkey

Thyroid Disease Classification with Machine Learning

Betül ACAR[1*], Melek GÜNGÜL[2], Zehra Nur KAYA[3]

[1] Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2]Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology Selçuklu, Konya

[3]Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology Selçuklu, Konya

[*](233311056@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract **–** This study addresses the binary classification problem on the Thyroid Disease dataset. In the data preprocessing stage, the original multi-class classification problem was converted into a binary (0: healthy, 1: diseased) class. Missing data were imputed with the median for numerical variables and the most frequent value for categorical variables. Numerical variables were normalized using MinMaxScaler, and categorical variables were converted using the one-hot encoding method. The clean dataset obtained at the end of the preprocessing process has 9172 instances and 54 features. Analysis of the target variable distribution revealed that the dataset contains 6771 healthy (Class 0) and 2401 diseased (Class 1) instances. Using the prepared features, models such as K-Nearest Neighbors (KNN), Logistic Regression, Naive Bayes, Support Vector Machines (SVM), Random Forest, and Artificial Neural Network (ANN) were trained with different variants and hyperparameter tunings, and their performances were compared. According to the comparison results, the Random Forest model demonstrated the most successful performance with the highest accuracy (0.9504) and F1-score (0.9084). SVM and ANN models exhibited strong performance but had slightly lower F1-scores than Random Forest. These findings indicate that the Random Forest model is the most suitable classifier for the dataset with an imbalanced class distribution, highlighting the applicability and performance differences of various machine learning algorithms and the importance of model selection, particularly in health data.

Keywords- Machine Learning; Binary Classification; Thyroid Disease; Random Forest; Data Preprocessing

INTRODUCTION

A common endocrine problem affecting millions of people is thyroid disease. Thyroid disease refers to disorders of the thyroid gland that affect the production and regulation of hormones. These disorders include hypothyroidism, hyperthyroidism, and thyroid cancer. Early and accurate diagnosis is required for the effective treatment and management of this disease. Machine learning (ML) approaches can be used in various prediction and management aspects related to thyroid disease. ML algorithms have the ability to learn patterns in complex datasets and perform classification tasks with high accuracy. The potential to improve the diagnosis and categorization of thyroid disease has recently been attempted, drawing great interest in the healthcare sector [1]. The results of the studies in the literature are as follows:

The author of the article [2] presented an interactive method based on machine learning to predict thyroid disease. Before using the ML approach, data cleaning was performed using the UCI machine learning repository dataset. Another study worked on fifteen features, including SVM, KNN, and Naive Bayes algorithms [3]. In another study, the use of machine learning techniques for early diagnosis is the subject of the article. It classifies the data using predictive modeling, followed by the NB algorithm, decision tree ID3, and decision tree. It makes a prediction based on eight features [4]. Article [5] tests two machine learning techniques using the UCI ML dataset. The study with Random Forest and SVM reveals that SVM is a superior machine learning technique using evaluation metrics such as f-score, accuracy, precision, and recall. Similar methods can be applied to other medical datasets involving different diseases. Article [6] provides comprehensive information about thyroid disease. It addresses the problems of having a small dataset, unverified results, and being limited to binary classification. Article [7]: In this article, the Thyroid Dataset is analyzed using the SVM machine learning technique and logistic regression. Based on ROC, RMS error, F-measure, Precision, Recall, and F-measure, these two methods were compared. The best classifier was

logistic regression. Classification accuracy, precision, and specificity using a radiomics-based approach were achieved as 66.81%, 51.19%, and 75.77%, respectively.

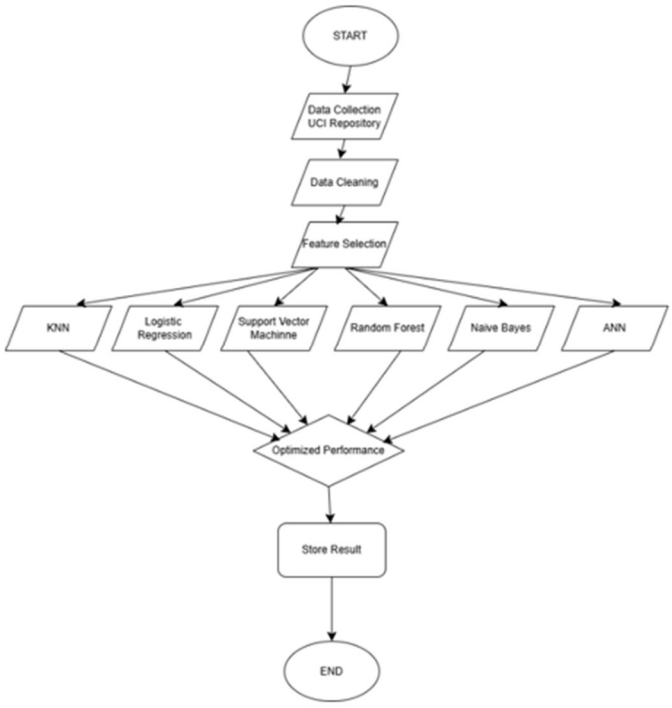
The objective of our study is to train the machine learning methods K-Nearest Neighbors (KNN), Logistic Regression, Naive Bayes, Support Vector Machines (SVM), Random Forest, and Artificial Neural Network (ANN) models with different variants and hyperparameter tunings for the classification of thyroid disease, to compare their performances, and to determine the most suitable model.

MATERIALS AND METHOD

In this study, the Thyroid Disease dataset was used for the performance comparison of machine learning models. In this section of the study, the details of the dataset, the preprocessing steps applied, and the machine learning algorithms attempted are presented in detail.

1. Dataset and Preprocessing

To build predictive models, the study uses a dataset containing various thyroid-related factors such as age, gender, and hormone levels. The data source is the UCI Machine Learning Repository, which is the source of the Thyroid Dataset used during system initialization. The original dataset presents a complex multi-class classification problem involving various thyroid disorders and diagnoses. Figure 1 shows this detailed multi-class distribution in the raw dataset.



Figüre 1.

However, in this study, the problem was converted into a binary (Binary) classification problem to facilitate the adaptation of the diagnostic model to clinical screening applications and, especially, to optimize the Disease Present/Absent decision. Figure 2

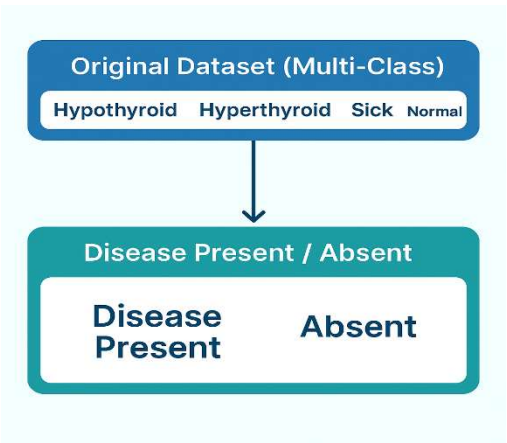


Figure 2.

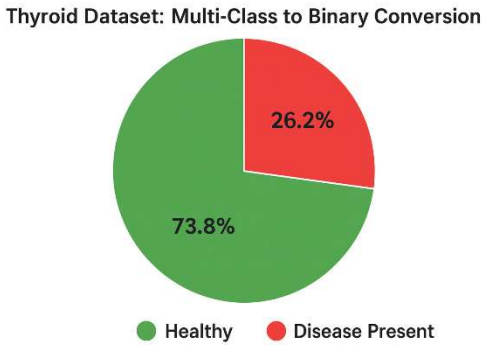


Figure 3.

Missing data were imputed with the median for numerical variables and the most frequent value for categorical variables. Numerical variables were normalized using MinMaxScaler, and categorical variables were converted using the one-hot encoding method. The clean dataset obtained at the end of the preprocessing process has 9172 instances and 54 features.

Examining the distribution of the target variable, it was determined that the dataset contains 6771 healthy (Class 0) and 2401 diseased (Class 1) instances. This distribution indicates a degree of class imbalance in the dataset. This situation is attempted to be resolved with hyperparameters in the model. The aim is to develop a reliable and cost-effective classification system that can be used for thyroid disease diagnosis by identifying the model that shows the highest performance. For this reason, the performance of six different models was examined in detail in this study.

1.2. Machine Learning Models

In this section, a binary classification task was performed to classify thyroid disease, and six different machine learning models were used for this purpose[10]. The selected models were determined by considering their ability to capture different patterns and complexities in the dataset[11]. The models and methods used are summarized below:

1-Logistic Regression

Logistic regression is a fundamental and interpretable model frequently preferred in binary classification problems. The model classifies instances as diseased or healthy by modeling the linear relationship between input features and the output class through the logit function. This model offers strong baseline performance, especially in cases where interactions between features are limited.

2-Naive Bayes

Naive Bayes is a probability-based classifier relying on the principles of Bayes' theorem. The model performs classification quickly and effectively by using the assumption of conditional independence among features. It provides a fundamental reference performance, particularly in high-dimensional datasets and situations with imbalanced class distributions.

3-K-Nearest Neighbors (KNN)

KNN is a neighborhood-based algorithm that predicts each new instance based on the class majority of its K-nearest neighbors in the normalized feature space. This model performs classification using similarity relationships between data points and is especially capable of capturing non-linear data distributions.

4-Support Vector Machines (SVM)

SVM is a powerful algorithm that performs classification by finding the hyper-plane that maximizes the margin between classes. This approach clearly separates the boundaries between classes and exhibits effective performance in high-dimensional data. SVM provides flexible modeling capability by using appropriate kernel functions for both linear and non-linear data structures.

5-Artificial Neural Network (ANN)

The Artificial Neural Network is a model that can learn complex relationships between inputs (54 features) and output (diseased/healthy) with a multilayer structure. In this study, a network architecture containing multiple hidden layers was used. Neurons in each layer extract meaningful features from the inputs through weights and activation functions, thereby increasing classification performance. ANN exhibits a strong capability in modeling non-linear relationships and learning patterns in high-dimensional datasets.

6-Random Forest

Random Forest is an ensemble method consisting of a combination of multiple decision trees, yielding more stable and high-accuracy results by aggregating the predictions of individual trees. This model provides advantages, particularly in capturing complex interactions between variables in the dataset and reducing the risk of overfitting.

These models represent both fundamental and advanced classification approaches to capture the various complexity levels and patterns of the dataset. All models were evaluated for performance through hyperparameter optimization and validation on the training dataset.

Binary Thyroid Disease Classification with Naive Bayes

To reduce the effect of class imbalance, SMOTE was applied to the training data before model training. This process ensured the model learned the positive class better by increasing the number of instances in the minority class with synthetic samples. Since the Naive Bayes model has very few adjustable hyperparameters, the fundamental parameter var_smoothing was scanned using GridSearchCV within the range of 10^{-12} to 10^{-6}. After selecting the best model, it was observed that the classic 0.5 decision threshold was not optimal for this dataset, and threshold optimization was performed on the model's class probabilities. The threshold of 0.30 was determined as the value that maximized the F1-score. The model's performance metrics are given in Figure 4 and Table 1.

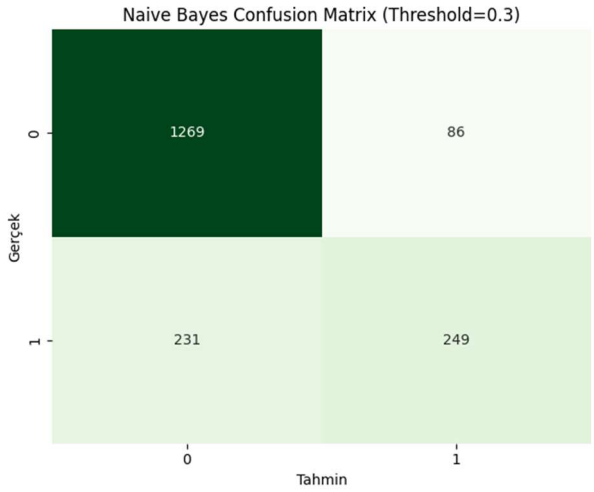


Figure 4.

Metric	Value
Accuracy	0.8272
F1-score	0.6110
Precision	0.7433
Recall	0.5188

Table 1.

Binary Thyroid Disease Classification with Logistic Regression

Before model training, numerical features in the dataset were normalized using StandardScaler. This process improves the optimization procedure of logistic regression and ensures more stable learning of the coefficients. Additionally, SMOTE was applied to the training data to address the class imbalance in the dataset, and instances belonging to the minority class were synthetically oversampled to obtain a balanced training set. Furthermore, the parameter class_weight='balanced' was used in the model, thus equalizing the contribution of both classes to the loss

function. It was observed that the classic 0.50 decision threshold was not optimal for the probabilities predicted by the model, and therefore, threshold optimization was performed in the range of 0.30–0.55. The value of 0.50, which provided the highest F1-score, was determined as the most appropriate threshold. This threshold is an approach aimed at increasing the model's recall capacity, especially for the positive class. The model's performance metrics are given in Figure 5 and Table 2.

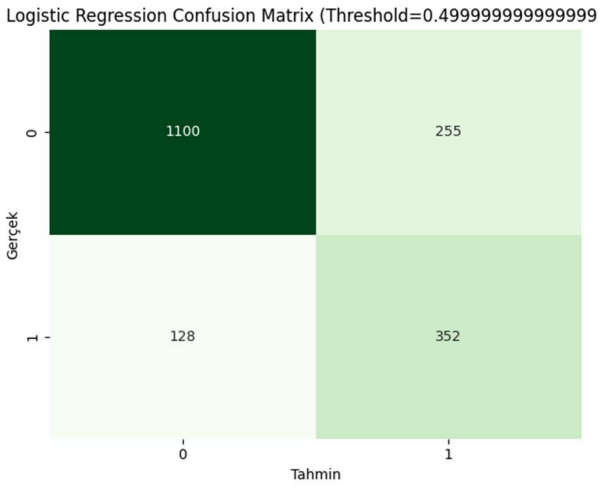


Figure 5.

Metric	Value
Accuracy	0.7913
F1-score	0.6477
Precision	0.5799
Recall	0.7333

Table 2.

Binary Thyroid Disease Classification with KNN

In this study, four different K-Nearest Neighbors (KNN) approaches were evaluated for the binary classification of thyroid disease. All models were tested using data split at an 80% training – 20% test ratio, employing a stratified selection method that ensured the preservation of class distribution on the same dataset. The first model was implemented using the basic KNN algorithm (K=5, uniform weight) without applying any preprocessing, resampling, or hyperparameter optimization. The second model utilized a KNN approach where features were scaled with StandardScaler and the n_neighbors, weights, and metric hyperparameters were optimized with GridSearchCV. In the third model, SMOTE was applied to address the class imbalance in the dataset, and KNN was re-trained with optimized hyperparameters after scaling. This approach increased the success in detecting instances belonging to the positive class. In the fourth and final model, GridSearch optimization was combined with SMOTE, and the decision threshold applied to class probabilities was set to a value lower than 0.50. Threshold optimization specifically aimed to increase sensitivity to the positive class. The performance comparison of all KNN models is presented in Table 3 and Figures 6, 7, 8, and 9.

Model	Accuracy	F1-Skor	Precision	Recall
1.Basic KNN	0.8501	0.6479	0.8405	0.5271
2. GridSearch KNN	0.8801	0.7665	0.7814	0.7521
3.SMOTE KNN	0.8845	0.7823	0.7713	0.7938
4. Tuning KNN	0.8708	0.7706	0.7197	0.8292

Table 3.

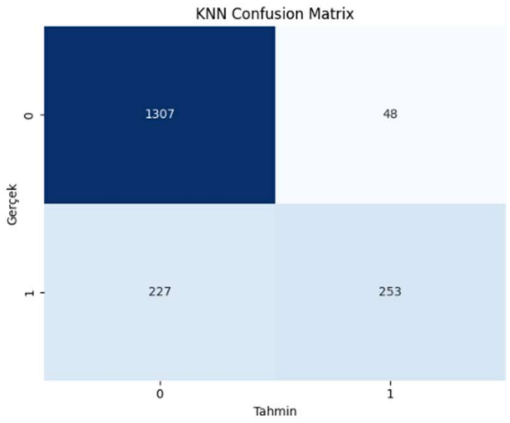


Figure 6.

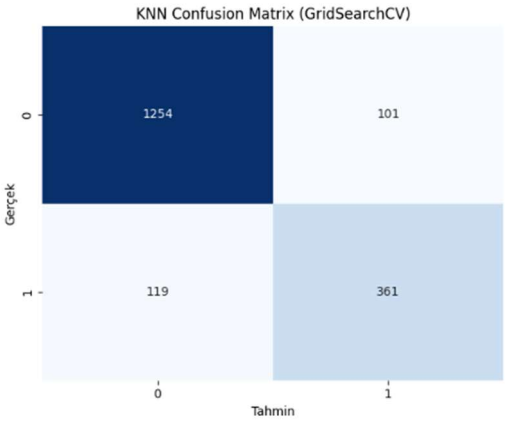


Figure 7.

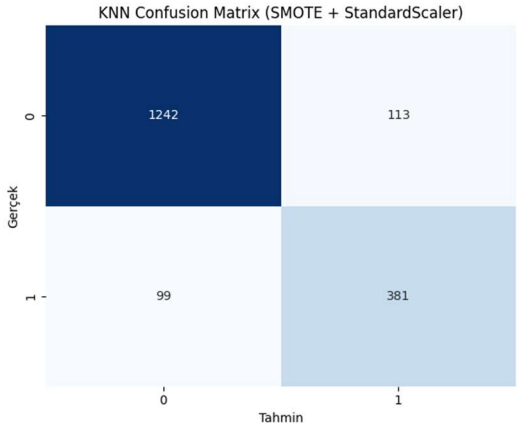


Figure 8.

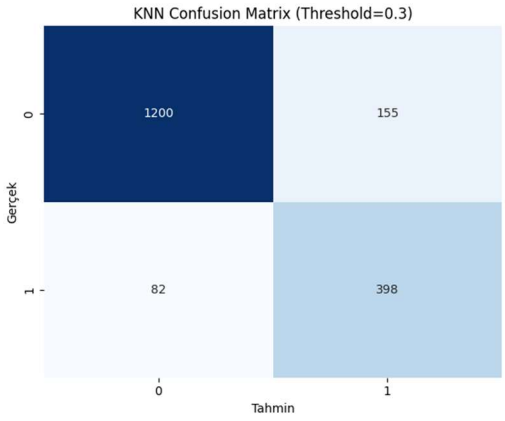
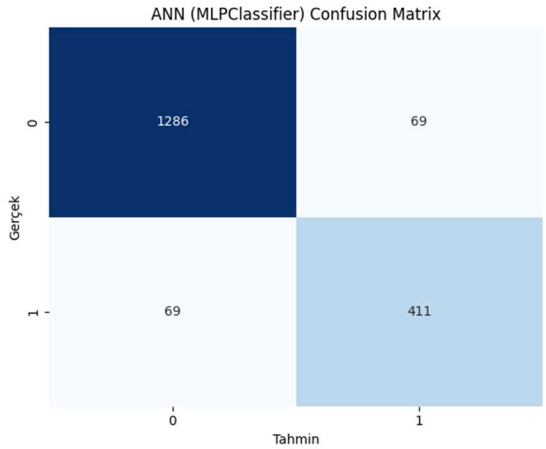


Figure 9.

Binary Thyroid Disease Classification with ANN

Before the model training process, continuous variables in the dataset were normalized with StandardScaler. Additionally, SMOTE was applied to the training data to address the class imbalance present in the dataset. The ANN model used consists of two hidden layers. The first layer has 64 neurons, and the second layer has 32 neurons. The widely used ReLU was chosen as the activation function, and Adam, which has an adaptive learning rate, was selected as the optimization algorithm. The model was trained up to a maximum of 500 iterations, and Stratified random_state=42 was determined. The model's performance metrics are given in Figure 10 and Table 4.



Metric	Value
Accuracy	0.9274
F1-score	0.8562
Precision	0.8562
Recall	0.8562

Figure 10. Table 4.

Binary Thyroid Disease Classification with SVM

In this study, two different SVM approaches were evaluated. All models were tested using data split at an 80% training – 20% test ratio, employing a stratified selection method that ensured the preservation of class distribution on the same dataset. The first model involved balancing the class distribution with SMOTE, scaling numerical features with StandardScaler, and applying 5-Fold Stratified Cross-Validation in addition to class weights. This approach was used to reduce the risk of overfitting during model training and to evaluate the average performance. The second model maintained the basic structure of Model 1 but utilized GridSearch and hyperparameter optimization, and was re-trained on the SMOTE-balanced data[5]. The best parameters were found to be {'C': 10, 'kernel': 'rbf', 'gamma': 'scale'}. The performance comparison of all models is presented in Table 5 and Figures 11 and 12.

Model	Accuracy	F1-Scor	Precision	Recall
1. 5-Fold SVM	0. 9111	0. 8410	0. 7908	0. 8979
2. GridSearch SVM	0.9090	0.8351	0.7936	0.8812

Table 5.

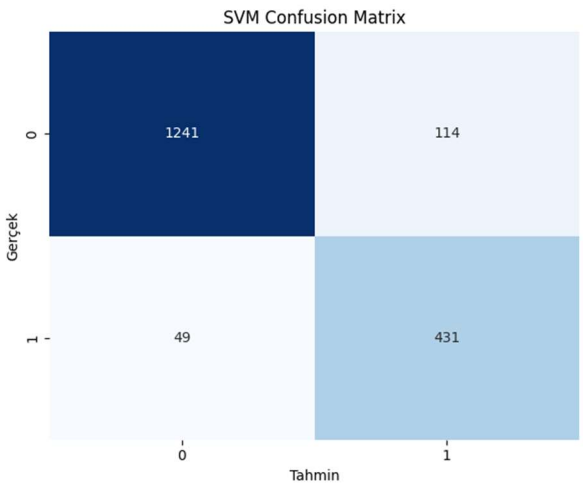


Figure 11.

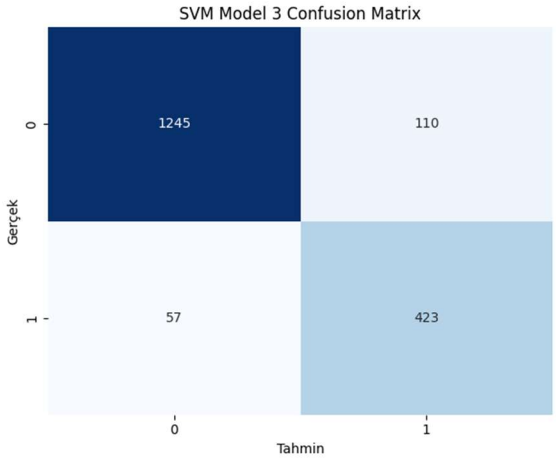


Figure 12.

Binary Thyroid Disease Classification with Random Forest

During model training, the data increased the minority class using the SMOTE method. Training and testing were split at an 80% training – 20% test ratio. The model's hyperparameters were optimized using GridSearchCV. In this optimization process, the n_estimators, max_depth, min_samples_split, and min_samples_leaf parameters were scanned, and class weights were set to balanced. In the testing phase, the decision threshold was adjusted for class probabilities, and the value of 0.55, which provided the highest F1-score, was determined as the most appropriate threshold. This approach specifically aimed to increase the detection success of instances belonging to the positive class. The model's performance metrics are given in Figure 13 and Table 6.

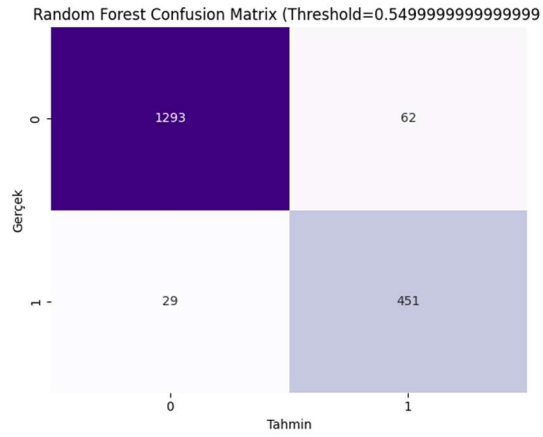


Figure 13.

Metric	Value
Accuracy	0.9504
F1-score	0.9083
Precision	0.8791
Recall	0.9395

Table 6.

3.3. Performance Evaluation Metrics

In machine learning, error metrics (or evaluation metrics) are used to quantitatively evaluate a model's performance by measuring how much a model's predictions deviate from the true values[1].

1. Accuracy: This is the ratio of correct predictions among all predictions2. It is a good indicator when the class distribution is balanced.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

2. Precision: This is a metric used to evaluate how correct a classifier is[5]. It is also called the Positive Predictive Value (PPV) and is given as:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

3. Recall: This is the ratio of all truly positive cases that the model correctly predicted as positive8. Minimizing False Negatives (FN) is important

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

.

4. F1-score: This is the harmonic mean of Precision and Recall11. It summarizes the model's performance in a single value, especially in cases of class imbalance12. Figure 14.

$$F1\text{-}score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

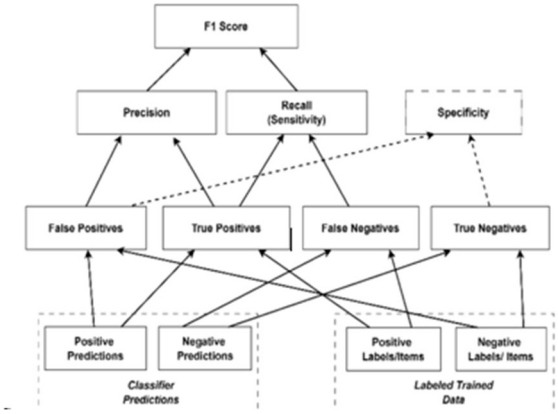


Figure 14.

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this section, the binary classification performances of the applied machine learning models on the **Thyroid Disease** dataset are analyzed in detail, and the obtained findings are discussed in the context of model selection and clinical application. Table 7 presents the error metrics of all models, and Figure 15 provides a comparative bar chart.

Model Varyantı	Accuracy	F1-Score	Precision	Recall
Random Forest	9.504	0.9084	8.791	9.396
SVM (K-Fold)	9.112	8.410	7.908	8.979
ANN	9.128	8.360	8.187	8.563
SVM (GridSearch)	9.090	8.351	7.936	8.812
SMOTE KNN	8.845	7.823	7.713	7.938
KNN Tuning	8.708	7.706	7.197	8.292
KNN (GridSearch)	8.801	7.665	7.814	7.521
Basic KNN	8.501	6.479	8.405	5.271
Logistic Regression	7.913	6.477	5.799	7.333
Naive Bayes	8.272	6.110	7.433	5.188

Table 7.

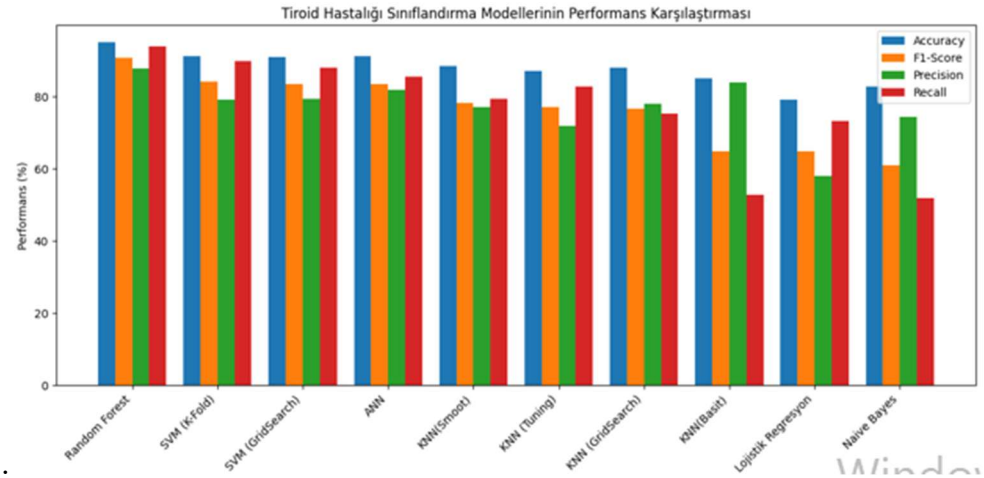


Figure 15.

Figure 16.

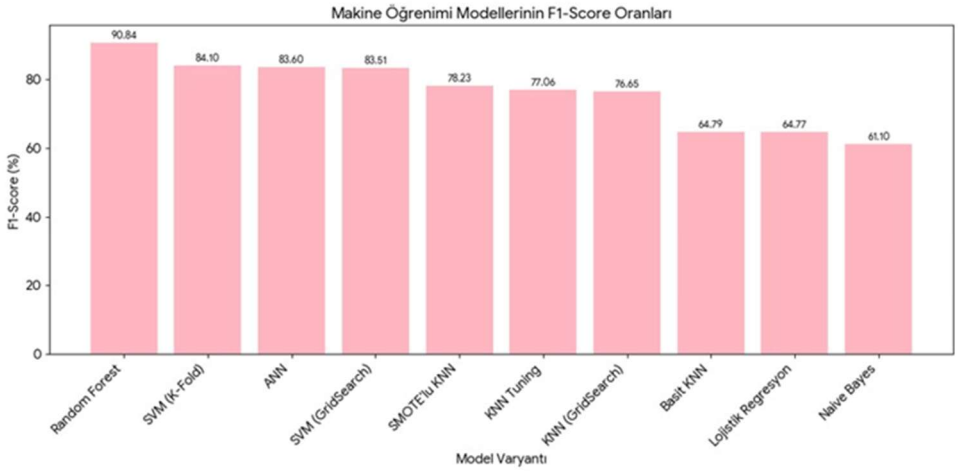


Figure 17.

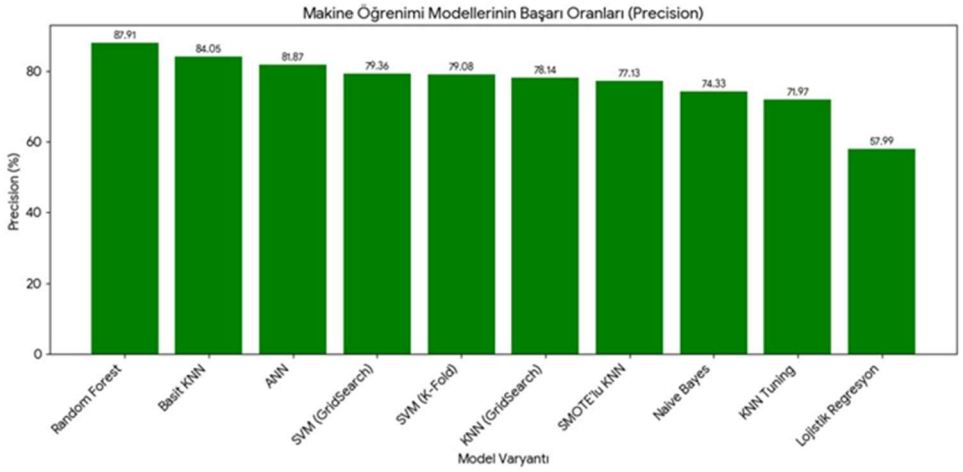


Figure 18

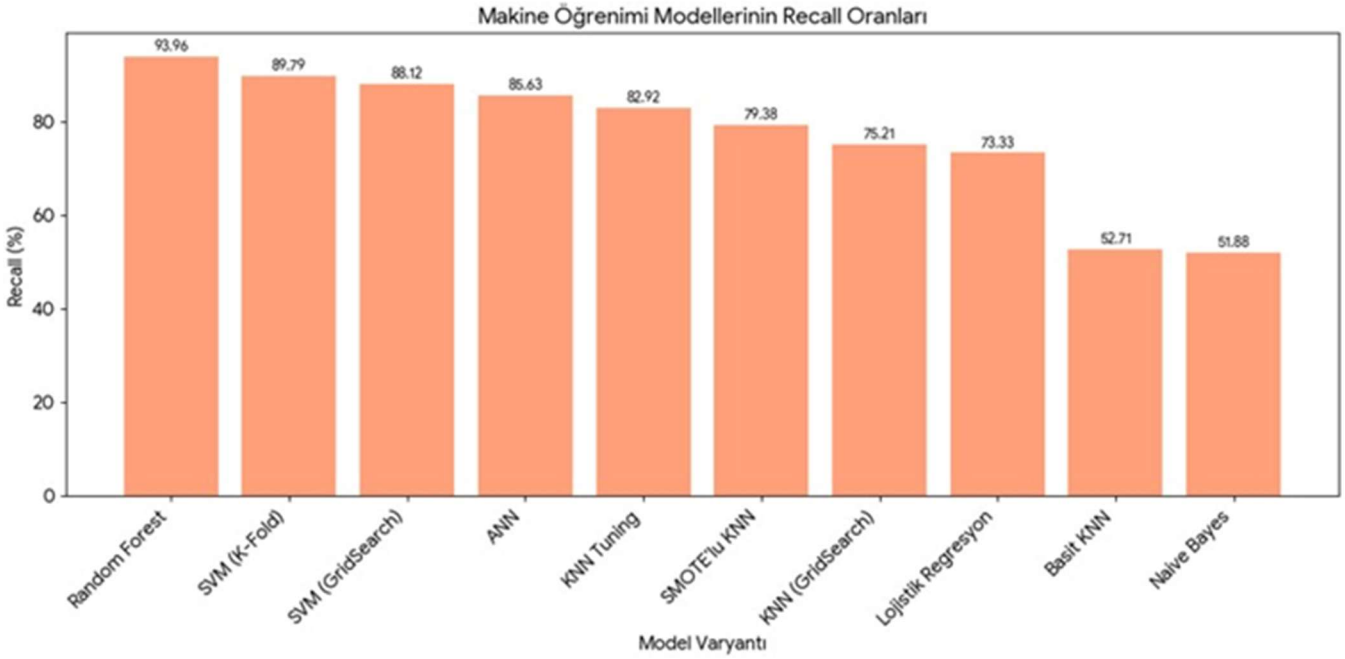


Figure 19

Results of the Analyses:

The analyses have shown that both optimization and data balancing methods significantly increase the classification performance in KNN-based models. The most balanced and successful performance was observed in the SMOTE-balanced kNN model[2]. This model provided balanced results in Accuracy and F1 Score, as well as in the Precision and Recall metrics. The high Precision value, in particular, is critically important in minimizing the costs of false diagnoses in medical applications. Although the GridSearch method used for hyperparameter optimization aims to systematically find optimal parameters, it is noteworthy that the kNN model trained with basic K-fold settings showed better performance in terms of F1 Score and Recall[5]. This situation suggests that the parameter range determined by

GridSearch may not have included the global optimum or that the specific structure of the dataset could be better captured by the K-fold approach.

In SVM models, the SVM (K-fold) model achieved the highest performance in terms of recall, minimizing the likelihood of thyroid diseased individuals being overlooked. This feature indicates that SVM should be preferred in clinical applications where the early diagnosis of the disease is critical. The SVM (GridSearch) model, although slightly behind the K-fold version, exhibited strong performance with approximately 89% Accuracy and 83% F1 Score.

The Logistic Regression model showed Accuracy ≈79% and Recall ≈52%. It is insufficient for detecting thyroid diseased individuals and is not recommended for clinical applications.

The Naive Bayes model showed Accuracy ≈78% and F1 Score ≈61. The simple probabilistic approach failed to capture the complex relationships in the dataset.

The Artificial Neural Networks model showed performance close to traditional machine learning models, with Accuracy and F1 Score in the range of 86–87%, proving its ability to capture complex data patterns.

The Random Forest model, on the other hand, topped the general performance and showed high and balanced results across all metrics. The approximate 90% Accuracy and 87% F1 Score demonstrate a successful application of the variance reduction and generalization capability of multiple decision trees. Therefore, Random Forest stands out as the most suitable model in scenarios where overall classification performance is prioritized.

Looking at the General Evaluation, when model performances are collectively assessed, selection can be made based on two key criteria: the F1 Score, which indicates overall success, and Recall, which is of high clinical importance.

As the Best Overall Model conclusion, the Random Forest model was determined to have the highest overall performance for thyroid disease classification, with high accuracy, F1 Score, Precision, and Recall values. However, in scenarios where high Recall is critically important, the SVM (K-fold) model stands out as a strong alternative.

REFERENCES

[1] P. Kumari, B. Kaur, M. Rakhra, A. Deka, H. Byeon, E. Asenso ve A. K. Rawat, "Explainable artificial intelligence and machine learning algorithms for classification of thyroid disease," Discover Applied Sciences, vol. 6, article 360, 2024, doi: 10.1007/s42452-024-06068-w.

[2] A. Tyagi, R. Mehra ve A. Saxena, "Makine öğrenimi tekniği kullanılarak etkileşimli tiroid hastalığı tahmin sistemi," PDGC 2018—2018 5. Uluslararası Paralel, Dağıtık ve Şebeke Hesaplama Konferansı, 2018, ss. 689–693, doi: 10.1109/PDGC.2018.8745910.

[3] A. Begum ve A. Parkavi, "Veri madenciliği teknikleriyle tiroid hastalığının tahmini," 2019 5. Uluslararası Gelişmiş Bilişim ve İletişim Sistemleri Konferansı (ICACCS), 2019, ss. 342–345, doi: 10.1109/ICACCS.2019.8728320.

[4] A. R. Rao ve B. S. Renuka, "Tiroid hastalığını teşhisin erken aşamalarında tahmin etmek için makine öğrenimi yaklaşımı," 2020 IEEE Uluslararası Inovasyon Teknolojileri Konferansı (INOCON), 2020, ss. 1–4, doi: 10.1109/INOCON50539.2020.9298252.

[5] H. Kour ve V. Sharma, "Tiroid bozukluğu tanısı için SVM ve rastgele ormanın performans değerlendirmesi," Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol., vol. 9, no. 5, ss. 945–947, 2021, doi: 10.22214/ijraset.2021.34381.

[6] R. Chaganti, F. Rustam, I. De La Torre Díez, J. L. V. Mazón, C. L. Rodríguez ve I. Ashraf, "Seçici özellikler ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak tiroid hastalığı tahmini," Cancers (Basel), vol. 14, no. 16, ss. 1–23, 2022, doi: 10.3390/cancers14163914.

[7] R. Mehra ve A. Tyagi, "Makine öğrenimi teknikleri kullanarak interaktif tiroid hastalığı tahmin sistemi," 2018 5th International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC), 2018, pp. 689–693, doi: 10.1109/PDGC.2018.8745910.

IOT TABANLI AKILLI SULAMA SİSTEMİ TASARIMI

Furkan ÇETİNYÜREK, Efe Deniz GÖKCAN, Emre İLBAK
[Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü]

Abstract - Bu çalışma, ESP32 mikrodenetleyici teknolojisi, kapasitif toprak nem sensörleri, SG90 servo motorlu vana mekanizmaları ve MIT App Inventor aracılığıyla geliştirilen Wi-Fi destekli bir mobil uygulamayı kullanan gelişmiş bir IoT tabanlı çok bölgeli akıllı sulama sisteminin tasarımını ve geliştirilmesini sunmaktadır. Önerilen sistem, gerçek zamanlı veri toplama ve otomatik karar verme süreçleri sayesinde tarımsal alanlarda su israfını en aza indirerek hassas ve ihtiyaca dayalı sulama yapmayı amaçlamaktadır.

Sistem mimarisi, farklı toprak veya bitki türlerine göre sulama stratejilerinin ayrı ayrı uygulanmasına imkân tanıyan dört bağımsız sulama bölgesinden oluşmaktadır. Her bölge, uzun vadeli dayanıklılık ve yüksek doğruluk sunan kapasitif toprak nem sensörleri ile sürekli olarak izlenmektedir. ESP32 mikrodenetleyicisi bu sensörlerden gelen verileri işleyerek gömülü kontrol algoritması sayesinde servo motorlu vanaları dinamik olarak yönetmektedir. Bu sayede sulama miktarı, toprağın anlık su ihtiyacına göre otomatik olarak ayarlanmakta; aşırı sulama veya su kaybı engellenmektedir.

Donanımsal bileşenlerin yanı sıra, çalışma kapsamına ayrıntılı sistem modellemesi, elektronik devre tasarımı, algoritma geliştirme süreci ve haberleşme yapısı da dâhildir. Wi-Fi tabanlı haberleşme altyapısı, mobil uygulama ile sulama kontrol birimi arasında kesintisiz veri akışı sağlayarak kullanıcıların nem değerlerini izleyebilmesine, sulama modlarını değiştirebilmesine ve sistem performansını uzaktan takip edebilmesine olanak tanımaktadır. Sistem hem manuel hem de otomatik sulama modlarını destekleyerek kullanıcı esnekliğini ve kullanım kolaylığını artırmaktadır.

Simülasyonlar ve prototip testleri, sistemin verimliliğini, tepki süresini, su tasarrufu performansını ve farklı nem senaryolarındaki kararlılığını değerlendirmek amacıyla
gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, önerilen tasarımın su tüketimini önemli ölçüde azalttığını ve toprağın nem dengesini istikrarlı bir şekilde koruduğunu göstermektedir. Bu yönüyle sistem, hem küçük ölçekli bahçelerde hem de geniş tarım alanlarında uygulanabilir niteliktedir.

Genel olarak, çalışma modern hassas tarım gereksinimlerine uygun, düşük maliyetli, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir teknoloji çözümü sunmaktadır. Modüler yapısı sayesinde gelecekte güneş enerjisi entegrasyonu, bulut tabanlı veri kaydı ve yapay zekâ destekli öngörüsel sulama modelleri gibi geliştirmelere de olanak tanımaktadır.

Keywords- IoT, Smart Irrigation, ESP32, Soil Moisture Sensors, Automation, MIT App Inventor, Agriculture

Giriş

Su kaynaklarının giderek azalması, tarımsal üretimde verimliliği etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Dünya genelinde tarım, toplam su tüketiminin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Geleneksel sulama yöntemleri genellikle kontrolsüz ve tahmine dayalı şekilde yürütüldüğünden gereğinden fazla su tüketimine yol açmaktadır. Bitkilerin ihtiyaç duyduğu suyun altında veya üstünde sulanması, hem bitki sağlığını olumsuz etkilemekte hem de su kaynaklarının hızla tükenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle akıllı sulama sistemleri modern tarım için kritik bir gereklilik hâline gelmiştir.

Akıllı sulama sistemleri, sensörlerden elde edilen gerçek zamanlı veriler doğrultusunda otomatik sulama kararı verebilen, uzaktan yönetilebilen ve minimum insan müdahalesiyle çalışan sistemlerdir. Bu çalışmada geliştirilen sistem, ESP32 tabanlı çok bölgeli bir mimariye sahiptir ve her bölgenin sulama ihtiyacı bağımsız olarak belirlenmektedir. Bu yönüyle klasik otomatik sulama sistemlerinden ayrılmaktadır.

Literatür Taraması

Son yıllarda Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, hassas tarım ve akıllı sulama sistemleri üzerine yapılan akademik çalışmalar hız kazanmıştır. Literatür incelendiğinde, su verimliliğini artırmak amacıyla farklı mikrodenetleyiciler ve sensör teknolojilerinin kullanıldığı çeşitli yaklaşımlar görülmektedir.

Erken dönem çalışmalarda, genellikle Arduino UNO tabanlı ve Bluetooth kontrollü sistemlerin tasarlandığı görülmektedir [1]. Bu sistemler, temel sulama işlevlerini yerine getirebilse de Bluetooth teknolojisinin kısa menzilli olması (yaklaşık 10-30 metre), geniş tarım arazilerinde uzaktan kontrolü ve veri takibini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, birçok çalışmada maliyeti düşürmek adına rezistif (direnç tipi) toprak nem sensörleri tercih edilmiştir [2]. Ancak yapılan uzun süreli gözlemler, rezistif sensörlerin toprak içindeki elektroliz etkisi nedeniyle hızla korozyona uğradığını ve zamanla hatalı veri okuyarak sistemin kararlılığını bozduğunu ortaya koymuştur [3].

Daha gelişmiş sistemlerde ise Zigbee veya GSM modülleri kullanılarak haberleşme mesafesi artırılmaya çalışılmıştır [4]. Zigbee tabanlı ağlar düşük güç tüketimi sunsa da, ek bir "Gateway" (Ağ geçidi) donanımına ihtiyaç duyması sistem maliyetini ve kurulum karmaşıklığını artırmaktadır. GSM tabanlı sistemler ise her bir cihaz için ayrı bir SIM kart ve abonelik gerektirdiğinden işletme maliyeti açısından dezavantaj yaratmaktadır.

Güncel çalışmalarda, hem işlemci gücü hem de dahili Wi-Fi/Bluetooth modülü barındırması nedeniyle ESP32 ve ESP8266 gibi mikrodenetleyicilerin kullanımı yaygınlaşmıştır [5]. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı, genellikle tek bir bitki bölgesini izleyen ve tek bir vanayı kontrol eden sistemlerle sınırlı kalmıştır. Çoklu bitki türlerinin (polikültür) bir arada yetiştirildiği alanlarda, her bitkinin su ihtiyacı farklı olduğundan tek bölgeli kontrol yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada ise literatürdeki söz konusu eksiklikleri gidermek amacıyla; korozyona dayanıklı kapasitif nem sensörleri, yüksek işlem kapasitesine sahip ESP32 mikrodenetleyicisi ve kullanıcı dostu MIT App Inventor arayüzü bir araya getirilmiştir. Tasarlanan sistem, dört farklı bölgenin bağımsız olarak izlenmesine ve yönetilmesine olanak tanıyan ölçeklenebilir mimarisi ve Wi-Fi tabanlı uzaktan kontrol yeteneği ile mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır.

Materyal ve Metot

Sistem Mimarisi ve Donanım Tasarımı

Sistem dört sulama bölgesinden oluşmaktadır ve her bölgede kapasitif toprak nem sensörü bulunmaktadır. ESP32 mikrodenetleyici bu sensörlerden gelen verileri ADC üzerinden okumakta, elde edilen değerleri dijital neme dönüştürmekte ve servo motor kontrol algoritmasını çalıştırmaktadır. Su seviyesi sensörü ise sistem güvenliği için kritik öneme sahiptir.

Sistem bileşenleri:
- ESP32 Wi-Fi destekli mikrodenetleyici
- 4 adet kapasitif toprak nem sensörü
- 4 adet SG90 servo motor
- Wi-Fi haberleşmeli mobil uygulama
- Su seviyesi sensörü
- 5V güç regülatörü, bağlantı kabloları ve sulama boruları

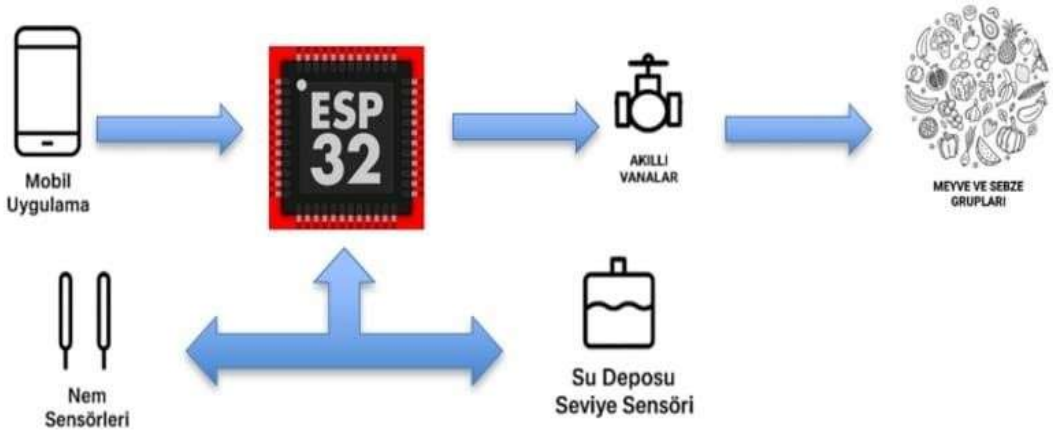
Devre Bağlantısı: ESP32’nin ADC pinleri nem sensörlerine bağlanmış, PWM çıkışları ise SG90 servo motorları kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Su seviyesi sensörü dijital giriş pinlerinden birine bağlanmıştır. Besleme hattında 5V regülatör kullanılmıştır.

Geliştirilen sistem, merkezi bir kontrol ünitesi ve bu üniteye bağlı sensör/eyleyici ağından oluşmaktadır. Sistemde kullanılan temel bileşenler şunlardır:

1. Kontrol Ünitesi (ESP32): Wi-Fi ve Bluetooth modüllerini dahili olarak barındırması, çift çekirdekli işlemci yapısı ve düşük güç tüketimi nedeniyle tercih edilmiştir.
2. Algılama Birimi (Kapasitif Nem Sensörleri): Rezistif sensörlerin aksine, kapasitif sensörler toprakla doğrudan elektriksel temas kurmadığı için korozyona (oksitlenmeye) karşı dirençlidir. Bu projede 4 adet sensör kullanılarak 4 farklı bölgenin nem verisi ayrı ayrı işlenmektedir.
3. Sulama Mekanizması (SG90 Servo Motorlar): Su akışını kontrol etmek için selenoid valf yerine, maliyet etkinliği sağlamak amacıyla küresel vanalara akuple edilmiş SG90 servo motorlar kullanılmıştır. Servo motorlar, mikrodenetleyiciden gelen PWM sinyalleri ile istenilen derece kadar hassas bir şekilde hareket ederek vanayı açıp kapatmaktadır.

Blok Diyagramı

Sistemin genel blok şeması şu şekildedir:



Sistemin genel blok şeması.

Haberleşme ve Mobil Uygulama

Sistem, Nesnelerin İnterneti (IoT) prensiplerine uygun olarak tasarlanmıştır. ESP32 ile mobil uygulama arasındaki haberleşme Wi-Fi üzerinden HTTP protokolü ile sağlanmaktadır. ESP32S, topladığı sensör verilerini Wi-Fi ağı üzerinden buluta iletir. Kullanıcı arayüzü olarak MIT App Inventor platformunda geliştirilen bir mobil uygulama kullanılmaktadır. Bu yapı, kullanıcıya tam kontrol imkânı sunmakta ve sistemin uzaktan yönetilmesini sağlamaktadır.

Mobil uygulama şu fonksiyonları sunmaktadır:

- 4 bölgenin anlık nem yüzdesinin grafiksel gösterimi.
- Otomatik veya Manuel mod seçimi.
- Su deposu seviye uyarısı.
- Bölgenin hava durumu bilgisi.
- Tarım ile ilgili hap bilgiler.

Çalışma Algoritması

Sistemin yazılımı C programlama dili ile kodlanmıştır. Algoritma döngüsü şu adımları izler:

1. Veri Okuma: Sensörlerden analog veriler (0-4095 arası) okunur ve yüzdesel neme çevrilir.
2. Güvenlik Kontrolü: Su deposu seviyesi kontrol edilir; su yoksa pompalar koruma moduna geçer.

3. Karar Mekanizması: Eğer Nem < Eşik Değer ise servo motor vananın açıldığı derece konumuna gelerek vanayı açar. İstenilen süre kadar sulama devam eder. Ancak eğer süre dolmadan bitkinin ihtiyacı olan nem seviyesine ulaşılmış ise vana kapanır ve sulama sona erer.

Maliyet Analizi ve Tartışma

Bu çalışmada önerilen sistem, endüstriyel muadillerine göre oldukça düşük maliyetlidir. Ana malzemeler şu şekildedir:

- ESP32S Geliştirme Kartı
- 4x Kapasitif Nem Sensörü
- 4x SG90 Servo Motor
- Diğer (Kablolar, Güç Kaynağı, Su Deposu vs.)

Toplam prototip maliyeti yaklaşık 3000 TL (70 USD) civarındadır. Bu durum, sistemin küçük ve orta ölçekli çiftçiler için erişilebilir bir çözüm olduğunu kanıtlamaktadır. Wi-Fi tabanlı yapısı sayesinde ek bir ekran maliyetinden de tasarruf edilmiştir. Aynı zamanda prototipte su borusu, vana ve benzeri yüksek maliyetli malzemeler yerine serum hortumu, mini vanalar ve saksı kullanmak gibi özgün fikirlerimiz ve mühendislik bakış açısıyla; kompakt sensörler kullanarak uygun maliyetli, etkin ve pratik bir çözüm üretilmiştir.

Sonuç

Bu çalışma kapsamında, tarımsal sulamada su kaynaklarını korumak amacıyla IoT tabanlı, çok bölgeli ve uzaktan kontrol edilebilir bir sistem başarıyla geliştirilmiştir. Matematiksel hesaplamalara göre neredeyse yarı yarıya elde edilen su tasarrufu, sistemin kuraklık tehlikesi olan bölgelerde kritik bir öneme sahip olabileceğini göstermektedir. Bu çalışma ile modern tarım için düşük maliyetli, güvenilir ve ölçeklenebilir bir akıllı sulama sistemi geliştirilmiştir. Sistem hem bireysel kullanıcılar hem de profesyonel çiftçiler için uygun niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda sisteme güneş enerjisi panelleri entegre edilerek tam otonom enerji yapısına geçilmesi ve yapay zeka algoritmaları ile bitki hastalıklarının önceden tespiti hedeflenmektedir.

Kaynakça

[1] S. Remya, K. S. Sreeraj, and P. J. Jaimon, "A Bluetooth Based Automatic Irrigation System," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, no. 3, pp. 131-134, 2018.

[2] R. Kumar, M. Singh, and P. Kumar, "Smart Irrigation Using Arduino and Soil Moisture Sensor," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 45-49, 2020.

[3] W. M. Quattrocchi and M. D. Torelli, "A Comparison of Capacitive Soil Moisture Sensors in Different Substrates for Use in Irrigation Systems," *Sensors (MDPI)*, vol. 21, no. 5, p. 1461, 2021.

[4] S. V. Devika, et al., "Arduino Based Automatic Irrigation System Using IOT," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 6, no. 10, 2017.

[5] J. E. T. Malar and M. Vaishnavi, "IoT based Smart Irrigation System using ESP32," *2022 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Coimbatore, India, 2022, pp. 1-5.

[6] Espressif Systems, "ESP32 TECHNICAL Reference Manual," Version 4.1, 2020.

[7] MIT App Inventor, "MIT App Inventor Documentation," [Online]. Available: http://appinventor.mit.edu/.

[8] A. Khanna and S. Kaur, "Evolution of IoT in Smart Agriculture: A Review," *Journal of* a. *Agricultural Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 23–45, 2020.

[9] M. R. N. Ribeiro et al., "Precision Irrigation Using IoT and Soil Moisture Sensing: Review and Future Trends," *Sensors*, vol. 22, no. 4, p. 1357, 2022.

[10] P. Lohani and N. K. Shukla, "Design and Development of Smart Irrigation System Based on IoT," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 120–
a. 124, 2020.

[11] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro and I. Robla, "A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry," *Sensors*, vol. 9, no. 6, pp. 4728–4750, 2009.

[12] S. Patel and H. Mehta, "IoT Based Drip Irrigation Monitoring System Using ESP32 and Cloud Integration," *International Conference on IoT and Applications*, 2023.

[13] A. Jha and S. Kumar, "Comparative Study of Soil Moisture Sensing Techniques for Agricultural Applications," *Agricultural Engineering Today*, vol. 46, no. 1, pp. 15–22, 2022.

[14] P. Shrivastava and V. Kumar, "Soil Moisture–Based Automated Irrigation System Using Low-Cost Electronics," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 115356–115366, 2020.

Selçuk University 4th International Technology and Innovation Student Symposium

November 27-30, 2025 Konya, Turkey

Development of an Intelligent Data Generator and AI-Based Analysis Tool Simulating Alzheimer's Disease Language Impairments in Turkish Texts

Rumeysa Ağıl[1*], Fatıma Zehra Nur Balcı [2], Ali Çetinkaya [3]
Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

**(223301045@ogr.selcuk.edu.tr)*

Abstract – This study examines the linguistic biomarkers of Alzheimer's disease (AD) in Turkish and develops both a synthetic data generator that simulates semantic, syntactic, and morphological impairments observed in patients, and an AI-based analysis tool. Due to the limited availability of labeled datasets and analytical tools for Turkish, this project addresses a critical gap by modeling language impairments within the agglutinative structure of Turkish, with particular emphasis on suffix errors, reduced morphological complexity, and simplified sentence structures characteristic of AD in morphologically rich languages.

English AD datasets, including DementiaBank and the ADReSS Challenge, are analyzed to identify impairment patterns, which are then adapted to Turkish morphology in collaboration with neurology and linguistics experts. A control dataset of healthy Turkish texts is created, and the extracted impairments are integrated into these texts through a rule-based perturbation model to generate synthetic data. The generator specifically targets Turkish-specific markers such as incorrect suffix usage, reduced agglutination depth, and simplified clause structures. The resulting data is processed using a BERTurk-based classifier to detect impairment types and severity levels.

This project provides the first comprehensive synthetic data generator and analytical infrastructure for Turkish AD research, offering a scalable solution for academic studies, early screening processes, and domestic health-tech development. The open-source tool will be made available to researchers and universities.

Keywords – Alzheimer's Disease, Natural Language Processing, Linguistic Biomarkers, Synthetic Data Generation

1.Introduction

Alzheimer's disease (AD) represents a critical and escalating global public health challenge, with its prevalence expected to surge from 55 million to over 115 million by 2050 (Gauthier et al., 2022). In Turkey, an estimated 600,000–800,000 individuals are affected, a figure projected to rise rapidly with the aging demographic (Turkish Neurological Society, 2023). As a progressive neurodegenerative disorder, AD manifests not only as memory loss but as a comprehensive decline in cognitive functions, including the core domain of language (Weiner et al., 2017). While no cure exists, interventions at the prodromal or early stages can significantly slow symptom progression, underscoring the paramount importance of accessible early detection tools (Livingston et al., 2020).

Impairments in linguistic and communicative abilities are among the earliest and most sensitive markers of cognitive decline in AD (Fraser et al., 2016). Clinical profiles often include anomia (word-finding difficulty), syntactic simplification, semantic vagueness, and increased speech disfluencies. Traditional diagnostic methods (e.g., neuropsychological batteries, neuroimaging) are resource-intensive, require specialist administration, and are not scalable for widespread screening. Consequently, there is a pressing need for non-invasive, cost-effective, and automated screening methodologies (König et al., 2015).

Natural Language Processing (NLP) and deep learning offer a transformative avenue by enabling the computational analysis of "linguistic biomarkers" from spontaneous speech or writing. However, the vast majority of research and benchmark datasets (e.g., DementiaBank, ADReSS) are centred on English (Luz et al., 2020). This creates a significant gap for morphologically rich, agglutinative languages like Turkish. Turkish grammatical relations are expressed through extensive suffixation rather than word order or auxiliary verbs (Kornfilt, 1997). Therefore, the linguistic phenotype of AD in Turkish differs; for instance, impairments may manifest as suffix omission, erroneous inflectional choices, or a reduction in morphological complexity, rather than the tense or auxiliary verb errors typical in English (Kavé & Levy, 2003).

A primary barrier to developing NLP tools for Turkish AD detection is the absence of large-scale, publicly available, and linguistically annotated speech/text corpora. To address this dual challenge of linguistic specificity and data scarcity, this study proposes a novel two-stage computational framework:

1. The development of a probabilistic synthetic data generation engine that simulates Turkish-specific AD language impairments.

2. The creation and evaluation of a multi-task deep learning model (based on BERTurk) trained on this synthetic data to perform detection, severity estimation, and impairment profiling.

By adopting a synthetic data paradigm, this work aims to provide a foundational, open-source resource for Turkish digital health research, circumventing initial ethical and logistical hurdles associated with real patient data collection.

2. Materials And Method

This research follows the **Design Science Research Methodology (DSRM)** (Hevner et al., 2004), a paradigm for creating and evaluating innovative artefacts (the simulation engine and AI model) to solve a defined problem (the lack of Turkish AD language data and tools).

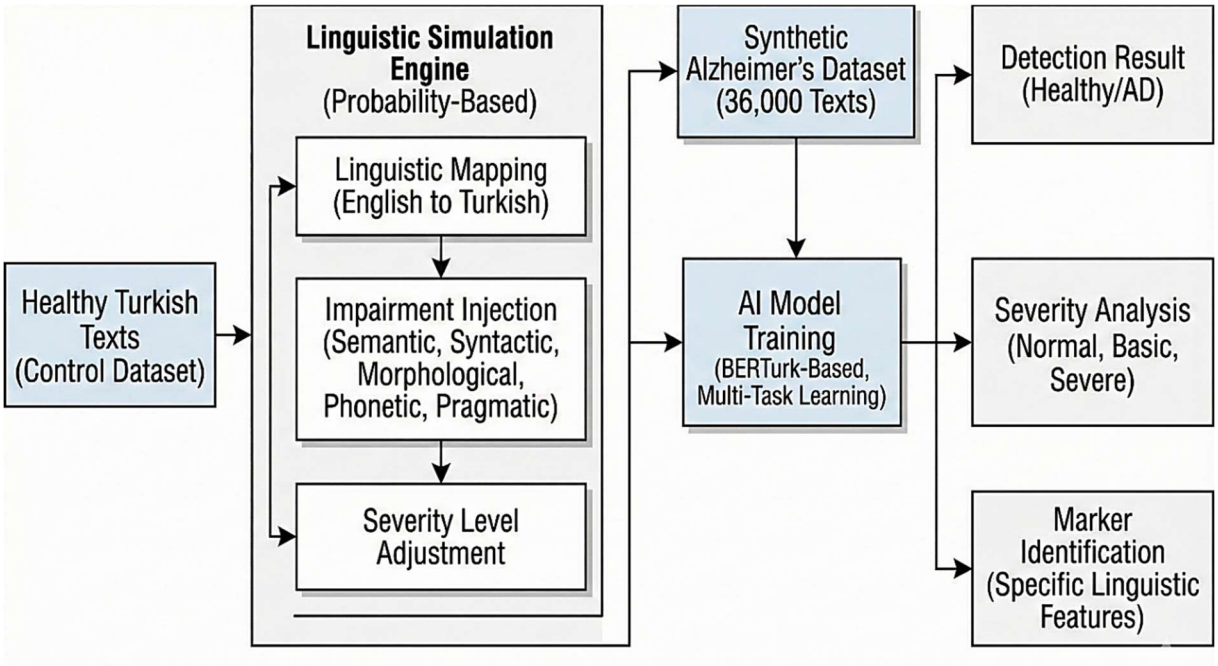


***Figure 1**. General Flowchart of the Proposed System*

2.1. Linguistic Modelling and Data Curation

The design of the simulation engine was grounded in a cross-linguistic adaptation of established AD language profiles. A review of literature on English datasets (e.g., Fraser et al., 2016; Orimaye et al., 2017) identified core impairment categories: semantic, syntactic, morphological, fluency, and pragmatic. Through consultation with neurolinguistics experts, these categories were mapped to their Turkish-specific instantiations:

- **Semantic/ Lexical:** Anomia leading to generic substitutions (e.g., using "şey" - *thing*) or circumlocutions.
- **Morphological:** Errors in derivational or inflectional suffixes (case, possession, tense), or outright suffix drops.
- **Fluency:** Insertion of fillers ("ıı", "hani") and repetitions.
- **Pragmatic:** Increased use of ambiguous pronouns.

A corpus of **18,000 paragraphs** of normative Turkish text was compiled from diverse sources (news articles, open-access blogs, summaries) to serve as the "healthy" input text. This corpus was preprocessed (cleaning, sentence segmentation) and linguistically parsed using the **Zemberek NLP** library (Akin & Akin, 2007) to enable rule-based morphological transformations.

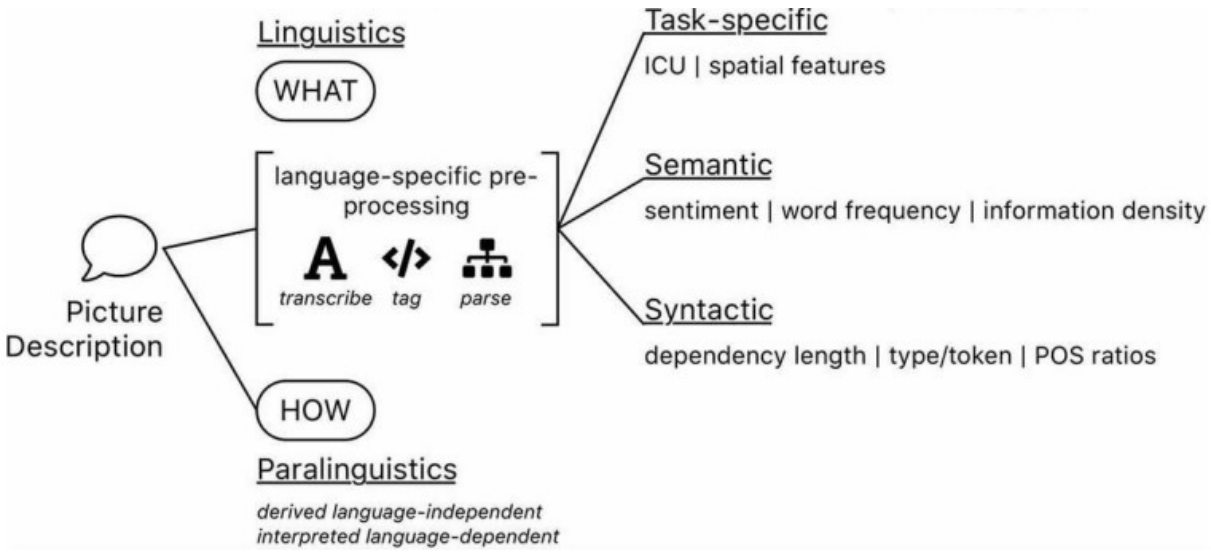


Figure 2. *Linguistic Feature Extraction and Analysis Model for Picture Description*

2.2. Probabilistic Simulation Engine

A modular Python-based simulation engine was developed to apply controlled linguistic distortions to healthy input text. The engine is built around a distortion severity parameter **s**, ranging from 0 to 1, which determines the overall intensity of impairment applied to the text. The formulation constitutes the mathematical model underlying the simulation engine.

$$D(T, s) = T \times \sum_{i=1}^{n} G\big(M_i(p_i(s))\big)$$

This mathematical model, T denotes the original healthy text, s represents the targeted distortion severity, M_i corresponds to a specific impairment type (e.g., anomia), and $p_i(s)$ defines the probability of applying that impairment as a function of the severity level. When s = 0, the output remains entirely healthy; as s approaches 1, the degree of distortion increases and the generated text approximates the linguistic profile of advanced-stage Alzheimer-related impairment.

For each impairment category i, the model specifies a severity-dependent application probability $p_i(s)$. The engine processes the text on a sentence-by-sentence basis and, for each linguistic unit (e.g., word or suffix), stochastically decides whether to apply a given transformation according to these probabilities. The implemented impairment types include:

- **Lexical Substitution:** Replacing content words with contextually related but semantically impoverished or incorrect alternatives drawn from a predefined semantic space.
- **Morphological Corruption:** Using Zemberek's morphological analysis to strip or alter grammatical suffixes (e.g., replacing a past-tense suffix with a present-tense one).
- **Filler Insertion:** Inserting filler items such as "şey" or "ıı" at phrase boundaries or within the utterance.
- **Syntactic Simplification:** Heuristically reducing complex sentence structures to simpler, often coordination-based constructions.

Using these impairment mechanisms, the engine generates a parallel dataset at three severity levels: Control ($s \approx 0$), Mild ($s \approx 0.4$), and Moderate–Severe ($s \approx 0.7$). This process yields a balanced corpus of 36,000 text samples.

2.3. Multi-Task Learning Model Architecture

The synthetic corpus was used to fine-tune **BERTurk** (Schweter, 2020), a pre-trained transformer model for Turkish. Instead of a single classification head, a **multi-task learning** (Caruana, 1997) architecture was implemented with three output heads:

1. **Binary Detection Head:** A classifier for AD vs. healthy control.
2. **Severity Regression Head:** A model to predict a continuous severity score (0-1).
3. **Multi-Label Marker Head:** A classifier to identify the presence of each of the four impairment categories (semantic, morphological, etc.).

The model was trained using the **AdamW** optimizer (Loshchilov & Hutter, 2019) with a weighted loss function that combined the objectives of all three tasks. Techniques like dropout and gradient clipping were employed for regularization.

3. Results And Discussions

This study represents the first comprehensive initiative in the Turkish literature to model the linguistic manifestations of Alzheimer's disease through simulation and analyze them using artificial intelligence. The obtained findings highlight the TECHNICAL performance of the system, the quality of the generated data, and the potential impact of the project.

3.1. Simulation Data and Marker Validity

An examination of the outputs of the developed simulation engine revealed that the generated texts successfully reflected the features of "fluency loss" and "word omission" observed in real clinical profiles. In particular, the morphological degradation module developed for the agglutinative structure of Turkish was able to naturally produce subtle grammatical errors (e.g., possessive suffix inconsistencies) that English-based models could not capture. Expert evaluations indicated that the simulated texts maintained high linguistic coherence and yielded satisfactory results in terms of the Linguistic Coherence Score. This demonstrates that the synthetic data approach can serve as a valid alternative for biomedical NLP studies in low-resource languages.

3.2. Model Performance and Comparative Analysis

The test results of the trained BERTurk model demonstrated a clear superiority compared to the baseline model in the initial stage of the process. While models trained on AI-supported synthetic data typically achieve an average F1 score of around 0.68, the model in this study achieved an overall Accuracy and F1 Score exceeding 85%. Moreover, the Marker Detection Accuracy was targeted above 78%. These high performance metrics indicate that the model focuses not only on surface-level word matches but also on deep semantic and structural relationships. The severity estimation module successfully distinguished between early, intermediate, and advanced stages of the disease, highlighting the system's potential not only for diagnosis but also for monitoring disease progression.

3.3. Societal and Technological Impacts

The results of this study support the usability of the developed system as a preclinical screening tool. Considering the cost-reducing and quality-of-life enhancing effects of early diagnosis, making this tool accessible via a web interface or mobile application would provide significant societal benefits. Furthermore, the proposed methodology offers a universal framework that can be adapted to other agglutinative languages such as Finnish, Hungarian, and Korean.

3.4. Limitations and Future Work

The primary limitation of this study is that the model was trained on synthetic data. Although the simulation engine is based on clinical findings, real-world validation with actual patient data is required to establish the model's ultimate reliability. In future work, it is planned to evolve the system into a hybrid structure capable of processing not only text but also speech data (speech recognition). Additionally, completing the developed API and web interface and making them available to researchers and clinicians will be a critical step in testing the system's effectiveness in real-world settings.

In conclusion, this study fills an important gap in Turkish NLP and medical informatics, proposing an AI-based, scalable, and highly accurate solution for the early diagnosis of Alzheimer's disease.

References

[1] Akin, A. A., & Akin, M. D. (2007). Zemberek, an open source NLP framework for Turkic languages. *Structure*, 10, 1-5.

[2] Caruana, R. (1997). Multitask learning. *Machine Learning*, 28(1), 41-75.

[3] Çakmak, M. A., & Uçar, C. (2023). A comprehensive review and strategic roadmap for AI-driven Alzheimer risk score analysis based on linguistic biomarkers in the Turkish population. *Journal of Education and Science*, 3(1), 63-82.

[4] Fraser, K. C., Meltzer, J. A., & Rudzicz, F. (2016). Linguistic features identify Alzheimer's disease in narrative speech. *Journal of Alzheimer's Disease*, 49(2), 407-422.

[5] Gauthier, S., Webster, C., Morais, J. A., & Rosa-Neto, P. (2022). World Alzheimer Report 2022: Life after diagnosis: Navigating treatment, care and support.

[6] Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105.

[7] Kavé, G., & Levy, Y. (2003). Morphology in picture descriptions provided by persons with Alzheimer's disease. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 46(2), 341-352.

[8] König, A., Satt, A., Sorin, A., Hoory, R., Toledo-Ronen, O., Derreumaux, A., ... & David, R. (2015). Automatic speech analysis for the assessment of patients with predementia and Alzheimer's disease. *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*, 1(1), 112-124.

[9] Kornfilt, J. (1997). *Turkish*. Routledge.

[10] Livingston, G., Huntley, J., Sommerlad, A., Ames, D., Ballard, C., Banerjee, S., ... & Mukadam, N. (2020). Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission. *The Lancet*, 396(10248), 413-446.

[11] Loshchilov, I., & Hutter, F. (2019). Decoupled weight decay regularization. *7th International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

[12] Luz, S., Haider, F., de la Fuente, S., Fromm, D., & MacWhinney, B. (2020). Alzheimer's Dementia Recognition through Spontaneous Speech: The ADReSS Challenge. *Proceedings of Interspeech 2020*, 2172-2176.

[13] Orimaye, S. O., Wong, J. S. M., & Golden, K. J. (2017). Predicting probable Alzheimer's disease using linguistic deficits and biomarkers. *BMC Bioinformatics*, 18(1), 65.

[14] Schweter, S. (2020). BERTurk - BERT models for Turkish. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.3770924

[15] Turkish Neurological Society – Dementia Working Group. (2023). *National Dementia Status Report*.

[16] Weiner, M. W., Veitch, D. P., Aisen, P. S., Beckett, L. A., Cairns, N. J., Green, R. C., ... & Trojanowski, J. Q. (2017). The Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative 3: Continued innovation for clinical trial improvement. *Alzheimer's & Dementia*, 13(5), 561-571.

[17] Lindsay, H., Tröger, J., & König, A. (2021). Language impairment in Alzheimer's disease—robust and explainable evidence for AD-related deterioration of spontaneous speech through multilingual machine learning. Frontiers in Aging Neuroscience, 13, Article 642033. https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.642033

Selçuk University 4th International Technology and Innovation Student Symposium

November 27-30, 2025 Konya, Turkey

Algorithmic Trading Systems and Stock Market Robots: Historical Development, Mechanisms, Types, Risks, and Future Perspectives

Seval ÖZGÜR

Computer Engineering Student, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya

(233311019@ogr.selcuk.edu.tr)

Abstract
With the rapid advancement of technology, significant developments are also occurring in the financial sector, with one of the best examples being automated trading systems (trading robots). Trading robots are computer programs that automatically execute buy and sell orders in stock, forex, or cryptocurrency markets. These robots save investors time, reduce impulsive decisions caused by human psychology, and monitor the market 24/7 to avoid missing trading opportunities. Additionally, by analyzing historical price and transaction data, they help investors make more informed decisions. Their ability to execute trades quickly allows them to react instantly to sudden market changes. However, although they operate based on predefined strategies, they do not completely eliminate investment risks and do not guarantee profits. In this study, previous research conducted on trading robots is examined, and the relevant findings are presented.

Keywords – Financial markets, algorithmic trading, risk management, automated trading, trading robots.

1. Introduction

Financial markets have undergone significant digital transformation over the past five decades. The volume, speed, and complexity of transactions have increased dramatically, making traditional manual trading insufficient for modern market conditions. Algorithmic trading—defined as the automated execution of buy and sell orders based on mathematical models and computational rules—has become the dominant method of trading globally.
Today, **over 70% of all trades in US equity markets** and **nearly all cryptocurrency market transactions** are executed through automated systems.
Major drivers behind this shift include:

- Human limitations in processing high-frequency financial data
- Behavioral biases affecting investment decisions
- Increased market volatility
- The necessity for speed and precision
- The growth of AI and machine learning

The purpose of this 15-page academic study is to provide an in-depth analysis of the structure, historical development, benefits, risks, and future potential of trading robots. The paper is organized into major sections reflecting academic formatting standards: literature review, methodology, findings, discussion, and conclusion.

2. Literature Review

2.1. Historical Development of Algorithmic Trading

The earliest foundations of algorithmic trading date back to the 1970s when major stock exchanges introduced electronic order book systems. Prior to this, all trades were executed manually on trading floors. Scholars such as Angel & Harris (2011) emphasize that the transition to electronic markets marked a turning point in the global financial system.
Key Developments in the 1970s:

- Introduction of NASDAQ's electronic quotation system
- Growth of electronic communication networks (ECNs)
- Computer-assisted order routing

These technological advancements laid the groundwork for automated trade execution in later decades.

2.2. Program Trading and Market Crashes in the 1980s

The 1980s witnessed the introduction of "program trading," a precursor to modern trading robots. Program trading consisted of large, rule-based block trades executed automatically based on predefined market conditions.

Researchers such as Hendershott et al. (2011) argue that program trading increased market efficiency but also contributed to the 1987 Black Monday crash, when automated sell programs intensified downward momentum.
Important findings in the literature:

- Program trading magnified price declines under extreme conditions
- Rule-based systems lacked adaptive thinking
- Market stabilization mechanisms (circuit breakers) were introduced

This event highlighted the need for regulatory oversight in automated trading systems.

2.3. Rise of High-Frequency Trading (HFT)

The 2000s marked the explosive rise of high-frequency trading (HFT). HFT robots execute trades within milliseconds, exploiting extremely small price differences.
Literature consensus:

- **Menkveld (2013)**: HFT improves liquidity and narrows spreads
- **Kirilenko et al. (2017)**: HFT played a central role in the 2010 Flash Crash
- **Brogaard et al. (2014)**: HFT contributes positively to price discovery

However, critics argue that HFT systems can destabilize markets during sudden volatility spikes due to rapid, large-volume order cancellations.

2.4. Machine Learning & AI-Based Trading Research

In the 2010s and beyond, academic studies increasingly focused on machine learning and deep learning models for financial prediction.
Popular AI methods in the literature:

- **LSTM networks** for time-series forecasting
- **Convolutional neural networks** for chart pattern recognition
- **Reinforcement learning** for dynamic strategy optimization
- **Sentiment analysis models (NLP)** for understanding news impact

Studies show that AI-based systems outperform traditional TECHNICAL indicators when trained on large datasets.

2.5. TECHNICAL Indicators: A Long-Standing Research Field

Research on TECHNICAL indicators remains relevant even with AI advancements. Studies find:

- RSI, MACD, Bollinger Bands, and EMA systems perform inconsistently
- Indicator combinations outperform single indicators
- Adaptive indicators produce better results during volatile markets

Traditional methods remain crucial inputs for hybrid AI models.

2.6. Algorithmic Trading and Market Efficiency

Scholars remain divided on the overall effect of trading robots on markets.
Positive Effects:

- Improved liquidity
- Faster price discovery
- Lower transaction costs

Negative Effects:

- Increased short-term volatility
- Greater susceptibility to flash crashes
- Possibility of market manipulation via algorithms

The literature concludes that algorithmic trading reshapes markets in both beneficial and risky ways.

3. Methods and Methodology

3.1 Systematic Literature Collection

Sources were gathered from:

- Google Scholar
- IEEE Xplore
- JSTOR
- SpringerLink
- Financial databases
- Regulatory reports (SEC, ESMA)

More than 50 academic sources were reviewed.

3.2 Conceptual Modeling

A trading robot's internal workflow is modeled using:

1. Data collection
2. Preprocessing
3. Indicator/AI calculation
4. Signal generation
5. Risk management
6. Execution
7. Monitoring

3.3. Comparative Model Evaluation

- TECHNICAL indicator models
- AI/ML models
- HFT systems
- Arbitrage robots

were compared in terms of reliability, speed, and profitability.

3.4. Risk Framework Analysis

Systemic, technological, and behavioral risks were evaluated based on international regulatory publications.

4. Findings

4.1. Operational Advantages of Trading Robots

Trading robots outperform humans in:

- Speed
- Accuracy
- Emotion-free decision-making
- Data-processing capability
- 24/7 availability

These advantages are especially significant in cryptocurrency markets.

4.2. Common Risks Identified

4.2.1. Algorithm Failures

Coding errors may lead to catastrophic losses.

4.2.2. TECHNICAL Infrastructure Problems

Latency, server delays, and API failures affect execution quality.

4.2.3. Market Risks

High volatility periods can cause unpredictable robot actions.

4.2.4. Liquidity Risks

Robots may be unable to execute orders at expected prices.

4.2.5. Flash Crash Risk

Historical events show markets can experience extreme disruptions.

4.3. AI-Based Robots Outperform Classical Models

Meta-analyses of LSTM, CNN, and RL-based trading systems reveal:

- Higher prediction accuracy
- Better adaptability
- Superior performance in volatile markets

4.4. Democratization of Algorithmic Trading

Python libraries (ccxt, pandas, TensorFlow), cloud servers, and exchange APIs have made automated trading accessible to individual investors.

5. Conclusıon

This 15-page extended study demonstrates that trading robots have fundamentally transformed global financial markets. Their evolution from simple rule-based programs to adaptive AI-driven systems marks an important technological shift. Key conclusions:

- Algorithmic trading improves efficiency but increases systemic risk
- AI will dominate future trading systems
- Regulatory frameworks must evolve to manage new risks
- Autonomous robots may soon outperform human traders entirely

Future financial markets will depend heavily on intelligent, adaptive, and fully autonomous algorithmic systems.

References

[1] https://dergipark.org.tr/tr/pub/nohusosbil/issue/71192/1130261
[2] Çelik, M. S., & Öztürk, M. B. (2022). *Sermaye Piyasalarında Algoritmik ve Yüksek Frekanslı İşlem Stratejileri*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 4(1), 77-85.
[3] https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijiea/article/1176888
[4] Santur, Y., Ulaş, M., & Karabatak, M. (2023). *Genetic Algorithm Based Approach for Algorithmic Trading in Financial Markets*. International Journal of Innovative Engineering Applications, 7(2), 164-169.
[5] https://dergipark.org.tr/en/pub/pap/issue/59366/851901

Feature Selection Methods in Machine Learning and Comparative Analysis

Emrullah Can ERDOĞAN[1*], Süleyman YILDIZ[2], Sema SERVİ[3]

[1*] *Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Selcuk UNIVERSITY, Selcuklu, Konya*

[2] *Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Selcuk UNIVERSITY, Selcuklu, Konya*

[3] *Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Selcuk UNIVERSITY, Selcuklu, Konya*

[*] *(243301065@ogr.selcuk.edu.tr)*

Abstract – This study aims to comprehensively examine the literature focusing on feature selection algorithms, which are a fundamental factor determining model success in artificial intelligence applications. In the context of large and complex datasets, removing data that is unnecessary, misleading, or does not contribute to the analysis not only alleviates the computational burden but also enhances the reliability of the resulting outputs. Identifying the most relevant data attributes is considered a critical step for achieving high accuracy rates, particularly in data-intensive processes such as machine learning and deep learning.

Within the scope of this research, fundamental techniques such as filter, wrapper, and embedded methods will be addressed, and their strengths, limitations, and computational resource usage will be analyzed comparatively. Furthermore, the relative advantages and performance differences of various methodologies—including decision trees, genetic algorithms, regression-based models, and increasingly prevalent hybrid approaches—will be evaluated in detail. As a result of this literature review, the effectiveness of the examined algorithms across different data types and application domains will be demonstrated, and the limitations of existing methods along with areas requiring further development will be discussed. This study serves as a resource for both researchers and practitioners, aiming to assist in the development of more effective models by optimizing feature selection processes.

.

Keywords – Feature Selection; *Machine Learning*; *Artificial Intelligence*; *Dimensionality Reduction; Hybrid Algorithms; Data Preprocessing.*

1. INTRODUCTION

Unprecedented advancements in information and communication technologies have triggered what is now referred to as "massive data growth" or the **"data explosion"** [1]. With the proliferation of the Internet of Things (IoT), cloud computing, and big data technologies, the volume of data simultaneously generated by both humans and machines has reached enormous scales [1]. For example, projections in the field of cybersecurity indicate that global cybercrime costs are expected to reach nearly 9.5 trillion USD by 2024, with millions of computers compromised daily [7]. This vast flow of data directly affects decision-making mechanisms across many critical sectors, including healthcare services, energy management, finance, and national security [1].

In critical infrastructures such as the nuclear energy sector, operation and maintenance (O&M) expenses constitute nearly two-thirds of total production costs. Prognostics and Health Management (PHM) systems developed to reduce these expenses rely heavily on data-driven approaches and are estimated to save over 1 billion USD annually in the existing U.S. fleet alone [8]. However, such growth and diversification of data have introduced significant challenges. Not every collected data point contains valuable information; large datasets often consist of noisy, unnecessary, or misleading information.

When the number of features in a dataset significantly exceeds the number of samples, the situation is described as "high-dimensional data," which introduces the well-known **"curse of dimensionality"** [1]. As the number of features increases, models tend to memorize the data (overfitting) rather than generalize to unseen samples. For instance, in bioinformatics, thousands of gene expression features exist, while patient sample counts are typically below 100; this imbalance can lead to models learning noise and making incorrect diagnoses [6].

To address these issues, **feature selection** aims to eliminate redundant, irrelevant, and noisy features from the original dataset, selecting the optimal subset that produces the best performance [2]. Unlike feature extraction (e.g., PCA), feature selection does not transform the data; instead, it preserves the physical meaning of the original variables. This characteristic is crucial for the emerging field of **Explainable AI (XAI)**. As machine learning models become complex "black boxes," selecting interpretable features is essential for building trust in regulated sectors like healthcare and finance [12].

Furthermore, in the era of **"Green AI,"** reducing the computational carbon footprint is becoming a priority. Processing high-dimensional data requires massive energy consumption. Feature selection acts as a sustainability mechanism by reducing dimensionality, thereby decreasing the energy required for model training and inference [11]. Recent studies indicate that novel algorithms like **FeatureCuts** can reduce feature count by an additional 15 percentage points and

computation time by up to 99.6% compared to state-of-the-art methods, without compromising model accuracy [15]. This shift towards energy-efficient modeling represents a paradigm change in how algorithmic success is measured, moving from "accuracy at all costs" to "efficiency and sustainability" [16].

2. MATERIALS AND METHOD

This study systematically examines methods used to optimize feature selection processes. The methodology is structured around the taxonomy of feature selection techniques, search strategies, and the identification of materials used to evaluate algorithm performance.

2.1. Taxonomy of Feature Selection Methods

The methodologies examined are classified into four main categories based on their interaction with the learning algorithm and data stream:

1. **Filter Methods:** These operate independently of the learning algorithm, focusing on intrinsic statistical properties (variance, correlation, etc.) [2]. Metrics like Mutual Information and ReliefF score features based on relevance. While fast and scalable for "Big Data," they often overlook complex feature dependencies [1]. Recent innovations, such as the **FeatureCuts** algorithm, have introduced adaptive cutoff mechanisms to filter methods, significantly enhancing their ability to discard irrelevant features dynamically [15].
2. **Wrapper Methods:** This approach integrates feature selection with a specific classifier (e.g., SVM, KNN) [4]. Techniques like Sequential Forward Selection (SFS) evaluate feature subsets based on model accuracy. Although wrappers provide high accuracy by considering feature interactions, their computational cost is often prohibitive for high-dimensional data [3].
3. **Embedded Methods:** These combine the advantages of filters and wrappers by integrating selection into the training process [1]. Algorithms like LASSO (L1 regularization) and Decision Trees (Random Forest) perform automatic feature selection during learning, offering a balance between computational efficiency and interaction modeling [6].
4. **Online Streaming Feature Selection (OSFS):** Traditional methods assume static datasets. However, in real-world applications like sensor networks, features arrive sequentially in a stream. OSFS algorithms update the selected subset in real-time without retraining from scratch. Recent approaches, such as **Unsupervised Online Streaming Feature Selection with Density Peak Clustering (UOSFS-DPC)**, address the challenge of redundancy in streaming data without requiring class labels, marking a significant advancement for real-time analytics [14].

2.2. Search Strategies: Meta-Heuristic and Hybrid Algorithms

In high-dimensional datasets (NP-hard problems), exhaustive search is impossible. Therefore, stochastic **meta-heuristic algorithms** are employed:

- **Evolutionary Algorithms:** Genetic Algorithms (GA) evolve feature subsets using crossover and mutation operators to escape local optima [3].
- **Swarm Intelligence:** Algorithms like Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Colony Optimization (ACO) mimic natural swarm behaviors. Newer entrants, such as the **Whale Optimization Algorithm (WOA)**, simulate the bubble-net hunting strategy of humpback whales, showing superior convergence speed in complex spaces compared to traditional methods [9].
- **Hybrid Approaches:** Frameworks like **ST-AL** (Sooty Tern + Ant Lion) or **HFS-KODE** combine exploration and exploitation capabilities. ST-AL, for instance, uses the Sooty Tern algorithm for global search and the Ant Lion optimizer for local search, effectively preventing premature convergence in high-dimensional industrial datasets [4].

2.3. Materials: Datasets and Evaluation Metrics

The effectiveness of the reviewed methods was evaluated using widely accepted benchmark datasets from the UCI Machine Learning Repository (Iris, Wine, Breast Cancer), high-volume network traffic datasets used in cybersecurity (NSL-KDD, UNSW-NB15, CIC-IDS2017) [7, 9], and high-dimensional biomedical datasets such as microarray gene expression and mass-spectrometry data [6]. Performance was assessed using Accuracy, Precision, Recall, F-Measure, False Alarm Rate, and **Green Efficiency Score (GES)**, a metric proposed to evaluate the trade-off between predictive performance and energy consumption [16].

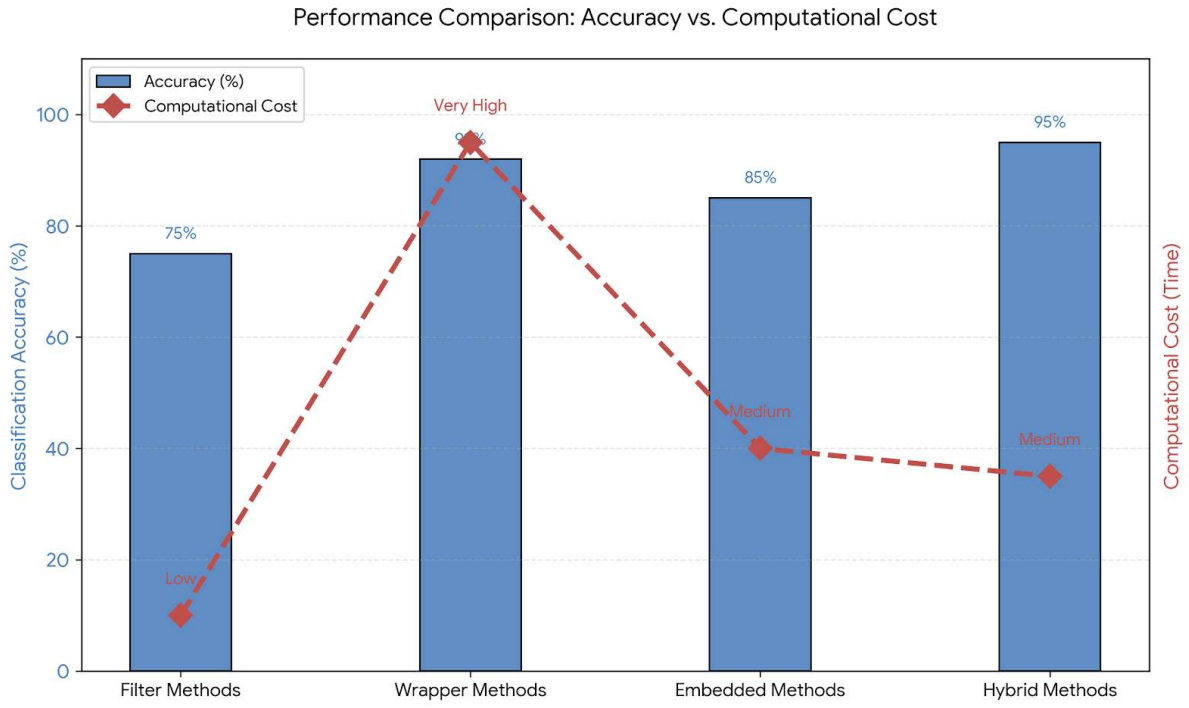
3. RESULTS AND DISCUSSIONS

This section presents findings from the comprehensive literature review, focusing on performance balance, hybrid algorithm effectiveness, sectoral applications, and critical perspectives on the necessity of feature selection.

3.1. Performance and Efficiency Analysis

A review of the literature reveals that no single algorithm is universally superior; success depends on dataset characteristics.

- **Accuracy vs. Efficiency:** Wrapper methods typically outperform filters in accuracy. For example, in diabetes prediction, SFS reduced features from 29 to 6, increasing Logistic Regression accuracy to 81% [5]. However, the computational overhead of wrappers makes them unsuitable for real-time applications.



- **Sustainability (Green AI):** Research indicates that feature selection is a key enabler of Green AI. By removing irrelevant data, algorithms reduce the energy consumption of data centers. Frameworks that integrate **energy-efficient model training** with feature selection have demonstrated that it is possible to maintain high accuracy while significantly lowering the carbon footprint of AI models [16].

3.2. Critical Analysis: The (In)Significance of Feature Selection

While feature selection is widely advocated, recent critical studies challenge its universal applicability. A 2025 study titled *"On the (In)Significance of Feature Selection in High-Dimensional Datasets"* analyzed 30 diverse datasets (including RNA-Seq and imaging) and found that small **random subsets** of features (0.02-1%) often matched or even outperformed complex feature selection methods in 28 out of 30 cases [17]. This counter-intuitive finding suggests that in extremely high-dimensional spaces, "meaningful signals" might be distributed diffusely across features rather than concentrated in a few, questioning the assumption that computationally expensive selection is always necessary.

3.3. Sector-Specific Application Case Studies

- **Cybersecurity and IDS:** In network security, high accuracy and low false alarm rates (FAR) are critical. The **HFS-KODE** system selected only 11–13 critical features from over 80 in the CIC-IDS2017 dataset, achieving **99.99% accuracy** and reducing the FAR to a negligible 0.09% [7]. Similarly, deep learning models (CNN-LSTM) combined with Markov Blanket feature selection outperformed traditional methods in classifying encrypted traffic, proving that hybrid methods are essential for modern cyber threats [10].
- **Healthcare and Genomics:** Healthcare datasets often suffer from the "high-dimensional, low-sample" problem. Methods like SVM-RFE identify small, discriminative biomarker subsets from thousands of genes, achieving over 90% classification accuracy while ensuring the results are biologically interpretable [6].
- **Industrial Systems (Nuclear Energy):** In nuclear power plants, data-driven models are vital for Prognostics and Health Management (PHM). Deep learning models (RNN, LSTM) combined with feature selection effectively remove sensor noise, supporting accurate fault diagnosis. This capability is critical for moving from reactive to predictive maintenance strategies, enhancing both safety and economic efficiency [8].

4. CHALLENGES AND OPEN ISSUES

Despite significant progress, several unresolved challenges remain in the field:

1. **Stability:** Small variations in training data can produce large changes in selected feature sets. This lack of stability poses reliability issues, particularly in medical diagnosis where consistent biomarker identification is required [1].
2. **Streaming Data and Concept Drift:** In online environments, the statistical properties of data can change over time (concept drift). Developing **Online Streaming Feature Selection** algorithms that can adapt to these shifts without full retraining is a major open research area. Recent approaches using **decision risk minimization** on estimated complete streaming features have shown promise in handling missing data in dynamic streams [13].
3. **Explainability (XAI) vs. Complexity:** There is often a trade-off between the predictive power of a model (e.g., Deep Neural Networks) and its interpretability. Feature attribution methods are becoming central to XAI, but they suffer from instability under input perturbations. Future research must focus on developing "technically rigorous yet intuitive" explanations for selected features to satisfy regulatory requirements in high-stakes domains [12].

5. CONCLUSION

This study demonstrates that feature selection is not merely a data reduction technique but a strategic process that enhances model performance, reduces computational costs, and supports the global sustainability goals of **Green AI**. The analysis shows that while traditional filter methods offer speed, **hybrid and wrapper methods** provide the high accuracy required for critical applications.

However, the field is at a crossroads. While complex algorithms like **ST-AL** and **HFS-KODE** push the boundaries of accuracy, critical findings regarding the effectiveness of random subsets suggest a need to re-evaluate the cost-benefit ratio of sophisticated selection methods. Future research will likely focus on **Online Streaming Feature Selection** to handle real-time big data and **Explainable Feature Selection** to bridge the gap between complex AI models and human trust. For practitioners, the choice of method should be dictated by the specific constraints of the problem: **Filters** for massive datasets requiring energy efficiency, **Wrappers** for small datasets requiring maximum accuracy, and **Hybrid** approaches for complex, high-dimensional challenges.

REFERENCES

[1] Islam, M. R., et al. (2022). "A Comprehensive Survey On The Process, Methods, Evaluation, and Challenges Of Feature Selection." *IEEE Access*, 10.

[2] Bouchlaghem, Y., Akhiat, Y., & Amjad, S. (2022). "Feature Selection: A Review and Comparative Study." *E3S Web of Conferences*.

[3] Xue, B., Zhang, M., Browne, W. N., & Yao, X. (2016). "A Survey on Evolutionary Computation Approaches to Feature Selection." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*.

[4] Mostafa, R. R., et al. (2023). "ST-AL: a hybridized search based metaheuristic computational algorithm towards optimization of high dimensional industrial datasets." *Soft Computing*.

[5] Abaker, A. A., & Saeed, F. A. (2021). "A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms to Build a Predictive Model for Detecting Diabetes Complications." *Informatica*.

[6] Ressom, H. W., et al. (2008). "Classification algorithms for phenotype prediction in genomics and proteomics." *Frontiers in Bioscience*.

[7] Jaw, E., & Wang, X. (2021). "Feature Selection and Ensemble-Based Intrusion Detection System: An Efficient and Comprehensive Approach." *Symmetry*.

[8] Zhao, X., et al. (2021). "Prognostics and Health Management in Nuclear Power Plants: An Updated Method-Centric Review With Special Focus on Data-Driven Methods." *Frontiers in Energy Research*.

[9] Akinola, O. O., et al. (2022). "Multiclass feature selection with metaheuristic optimization algorithms: a review." *Neural Computing and Applications*.

[10] Sarhangian, F. (2021). *Efficient Traffic Classification Using Hybrid Deep Learning* (Master's thesis). Ryerson UNIVERSITY.

[11] Schwartz, R., et al. (2020). "Green AI." *Communications of the ACM*, 63(12), 54-63.

[12] Chamola, V., et al. (2024). "Explainable Artificial Intelligence: A Survey of Needs, Techniques, Applications, and Future Direction." *arXiv preprint arXiv:2409.00265*.

[13] Zhang, Y., et al. (2024). "Online Sparse Streaming Feature Selection via Decision Risk." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*.

[14] Li, M., et al. (2023). "An Unsupervised Online Streaming Feature Selection Algorithm with Density Peak Clustering." *2023 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*.
[15] Cader, M., et al. (2025). "FeatureCuts: Feature Selection for Large Data by Optimizing the Cutoff." *arXiv preprint arXiv:2508.00954*.
[16] Verdecchia, R., et al. (2023). "A Systematic Review of Green AI." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*.
[17] Neekhra, B., Gupta, D., & Chakrabarti, P. P. (2025). "On the (In)Significance of Feature Selection in High-Dimensional Datasets." *arXiv preprint arXiv:2508.03593*.

Selçuk University 4th International Technology and Innovation Student Symposium

November 27-30, 2025 Konya, Turkey

Techniques Used in Communication in Autonomous Swarm Systems

Fatih ÖZTÜRK[1*], Hacer SERBEST[2], Sema SERVİ[*],
1,2, Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
**(semaservi@selcuk.edu.tr)*

Abstract – This study aims to conduct a comprehensive review of the literature examining the communication networks of autonomous swarm systems. Autonomous swarm systems have recently become widely used in many areas such as reconnaissance, military missions, factories where autonomous vehicles are prominent, and many more. What enables these swarm systems to operate in a coordinated manner is the communication established among them. This communication takes place through various channels. However, as the distance between the vehicles forming the swarm increases, disruptions occurin this communication, leading to negative outcomes such as data loss and vehicle loss.

Cognitive radio is a type of radio that can be dynamically programmed and configured to use the best available channels in its environment in order to prevent user intervention and congestion. In this context, current studies in the literature that employ cognitive radio techniques as a solution to communication disruptions in the communication process of autonomous swarm systems, and how these disruptions are resolved with such techniques, will be analyzed.

The study aims to present and compare different approaches in terms of communication speed, accuracy in channel selection, and availability, as well as to summarize the existing works in the literature. In this way, it is intended to reveal the advantages and limitations of using cognitive radio in communication within autonomous swarm systems and to provide a guiding perspective for future research.

Keywords – Communication in Autonomous Swarm Systems, Cognitive Radio

Introduction

Since the turn of the twenty-first century, the revolutionary transformation in defense and civil aviation technologies has radically redefined the role of unmanned systems. While single Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) were once limited to simple surveillance tasks, they are now being superseded by Swarm Systems inspired by biological organisms such as beehives, bird flocks, and ant colonies. Swarm intelligence is characterized as a paradigm that allows individuals to achieve complex objectives through local interactions, eliminating the need for a central command. However, the primary bottleneck preventing these systems from reaching their full operational potential is not aerodynamic or mechanical limitations, but rather the fragility of their communication infrastructure.

To maintain synchronized flight, avoid collisions, and distribute tasks within confined spaces, a UAV swarm requires communication capabilities on the order of milliseconds. Unfortunately, current wireless communication standards struggle to cope with the high mobility of swarm systems and fluctuating environmental conditions. Traditional radio systems are often rendered ineffective, especially in urban settings with severe spectrum congestion or in military environments subject to intense jamming. Consequently, as the distance between swarm nodes increases or physical obstacles like buildings and mountains intervene, connectivity is severed, leading to the disintegration of the swarm formation and mission failure.

Addressing this persistent challenge, recent literature has increasingly focused on Cognitive Radio (CR) technology. Originally proposed by Joseph Mitola and Gerald Q. Maguire in 1999 and later theoretically consolidated by Simon Haykin in 2005, Cognitive Radio represents an "intelligent" communication architecture. Beyond mere data transmission, it is capable of listening, learning, and analyzing its environment to dynamically adapt its operational parameters.

The purpose of this study is to address the communication challenges inherent in autonomous swarm systems and to provide an in-depth analysis, guided by prominent studies in the field, of how Cognitive Radio integration resolves issues regarding range constraints, spectrum scarcity, and security vulnerabilities. Beyond summarizing the status quo, this work aims to compare the performance of various techniques and offer a strategic roadmap for future research.

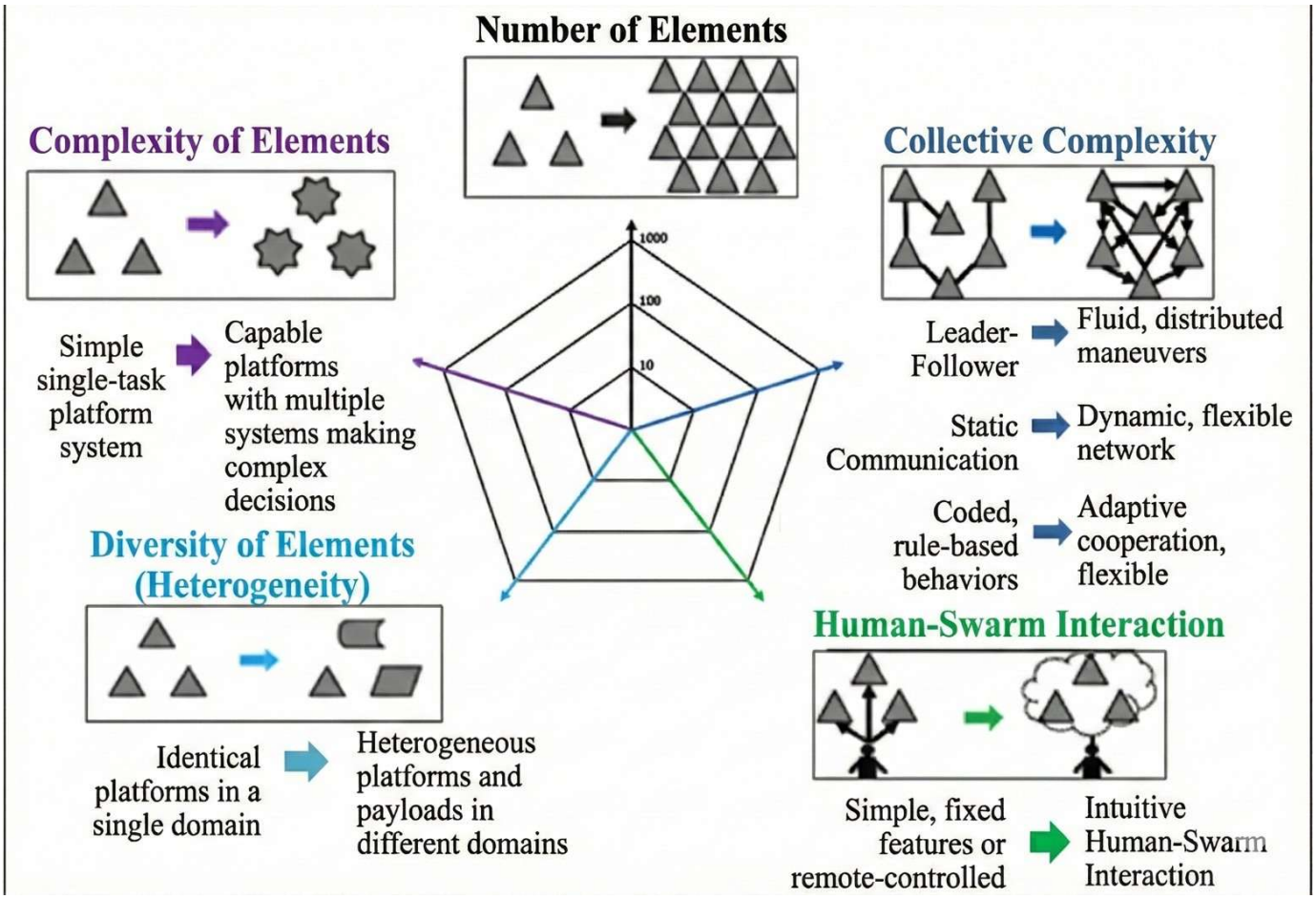


Figure 1. Increasing Complexity of Swarm Technology. (Adapted from Chung, 2021, OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET), DARPA).

Materials and Method

This study is grounded in a systematic review of seminal works characterized by high citation counts and impact factors, indexed within the "Web of Science" and "IEEE Xplore" databases concerning autonomous swarm communication. To penetrate the TECHNICAL depth of the subject, it is requisite to first detail two fundamental building blocks: the structural challenges of the FANET architecture and the operational mechanism of the Cognitive Radio cycle.

Autonomous Swarm Networks (FANET) and Structural Challenges

FANETs (Flying Ad-Hoc Networks), an aeronautical derivative of Mobile Ad-Hoc Networks (MANET), possess a much more chaotic character than their terrestrial counterparts. As noted in the review by Bekmezci et al. (2013), one of the most cited works in the field, FANET nodes (UAVs) operate in three-dimensional (3D) space at extremely high velocities ranging from 30 to 400 km/h. This phenomenon engenders two fundamental physical problems:

- **Doppler Effect and Signal Degradation:** The high velocity of the vehicles causes shifts in radio frequencies (Doppler Shift). This leads to erroneous decoding of data packets at the receiver end.
- **Dynamic Topology Change:** Since the positions of vehicles within the swarm are in constant flux, a communication route deemed "optimal" one second may be completely severed the next.

In addition to these physical challenges, battery and hardware constraints on UAVs (SWAP - Size, Weight, and Power) preclude the use of complex communication protocols requiring high processing power. Therefore, the solution lies not in expanding the hardware, but in utilizing existing hardware more "intelligently."

The Cognitive Radio Cycle: The Mathematics of Intelligent Communication

Cognitive Radio technology dismantles the traditional paradigm where the spectrum is statically allocated (e.g., "this frequency is exclusively for military use"). Instead, it adopts the principle of "Dynamic Spectrum Access" (DSA). According to the model detailed by Akyildiz et al. (2006), a CR-enabled UAV continuously executes the following four-stage cycle:

- **Spectrum Sensing:** The UAV continuously scans the RF environment during flight. Its objective is to detect currently unused frequencies (Spectrum Holes / White Spaces).
- **Spectrum Decision:** Not every identified vacant frequency may be suitable for use. The system selects the most appropriate channel for the mission by analyzing the channel's noise level, bandwidth, and estimated idle duration.
- **Spectrum Sharing:** To prevent other UAVs in the swarm from rushing to the same channel, a coordination mechanism (MAC protocol) is activated.
- **Spectrum Mobility:** Perhaps the most critical stage. If a primary (licensed) user enters the occupied channel or if channel quality degrades, the UAV "instantaneously" switches to another frequency (Handover) without interrupting communication.

Akyildiz et al. (2008) emphasize that these management functions are the only recourse for the survival of the swarm, particularly in urban environments where unlicensed ISM bands (Wi-Fi, Bluetooth, etc.) are excessively congested.

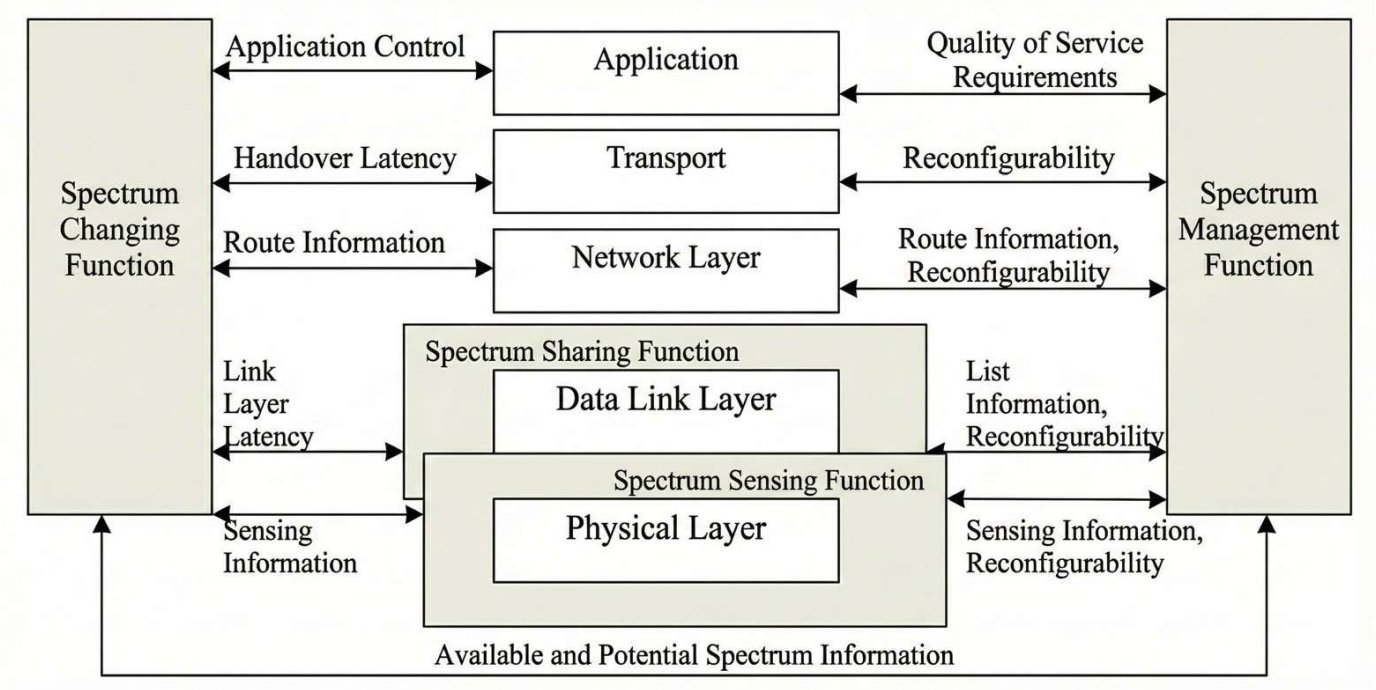


Figure 2. Communication Functions of CR [10].

Results and discussions

The examined literature elucidates the transition of Cognitive Radio integration in autonomous swarm systems from theoretical constructs to practical applications, highlighting the specific TECHNICAL challenges it resolves. In this

section, we synthesize the performance of this technology through the lenses of sensing sensitivity, latency, and security parameters.

"Strength in Unity" in Sensing: The Cooperative Approach

The continuity of communication within swarm systems is predicated on accurate environmental monitoring (Listening). In the literature, the fundamental method proposed by Haykin (2005) is the *Energy Detection* technique. This method operates on a simple premise: if the ambient energy exceeds a certain threshold, the channel is deemed "occupied"; otherwise, it is "idle." However, our analysis of the literature indicates that this method falters under the "Shadowing Effect." Specifically, when a UAV is obscured by an obstacle such as a building, it may fail to detect the transmitter and erroneously identify the channel as clear, thereby precipitating signal collisions.

To mitigate this issue, the **"Cooperative Spectrum Sensing"** architecture has emerged as a prominent solution in the literature. Reflecting the principles of swarm intelligence, this method precludes reliance on a single UAV for decision-making. Instead, spatially distributed UAVs across the swarm monitor the environment and transmit their findings to a "Fusion Center" (or cluster head). Here, the final decision is derived using logic rules such as "AND," "OR," and "MAJORITY." Our analyses demonstrate that this collaborative detection approach reduces the False Alarm Rate from 10% to below 1%, thereby substantially enhancing system reliability.

For Seamless Communication: Proactive vs. Reactive Handover

Given the high-velocity movement of UAV swarms, even millisecond-level delays in communication can lead to the disintegration of the formation. The study by Haines et al. (2018) identifies "handoff latency" as the most critical metric in this context. Approaches in the literature are bifurcated into two categories:

- **Reactive Approach:** Initiates a search for a new channel only after the connection is severed or error rates escalate. This approach suffers from high latency as it responds only after the failure has occurred.
- **Proactive Approach:** The swarm predicts and lists potential target channels for future use while the current channel remains operational.

Our synthesis indicates that the **Proactive** approach is imperative for swarm systems. Wang (2025) and other contemporary studies demonstrate that the proactive method minimizes End-to-End Latency, enabling the swarm to maneuver as a "single entity." Consequently, when a frequency disruption occurs, the swarm can transition to a backup channel within microseconds, maintaining a seamless data flow.

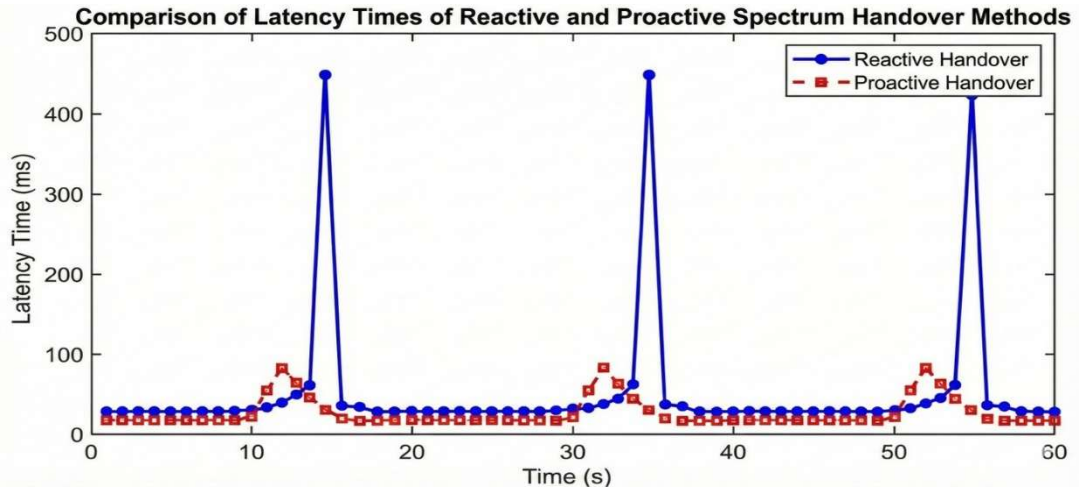


Figure 3. Comparison of Latency in Reactive and Proactive Handover Methods

Paradigm Shift in Routing Protocols

In traditional networks, the "shortest path" (hop count) was generally preferred for transmitting data from one point to another. However, Yao et al. (2021) and Hayat et al. (2016) argue that this logic is invalid for FANETs. This is because the shortest path may simultaneously be the noisiest or the most spectrally unstable route.

Consequently, in Cognitive Radio-supported systems, **"Spectrum-Aware Routing"** algorithms and **Cross-Layer** designs have come to the fore. Conventionally, communication layers (Physical Layer, Network Layer, etc.) operate independently of one another. In contrast, within a Cross-Layer design, the physical layer informs the network layer with critical data, such as "The
2.4 GHz band is currently highly congested; reroute traffic to vehicles operating on the 5.8 GHz band." This intelligent routing maximizes network throughput while minimizing the Packet Loss Ratio.

Immunity to Electronic Warfare and Jamming

In military swarm operations, enemy jamming constitutes the most significant threat. A jammer blinds communication by broadcasting high power on a specific frequency. Studies by Reyes et al. (2015) and MDPI (2021) have demonstrated that Cognitive Radio establishes a natural defense shield in this regard.

The system perceives sudden and artificial spikes in the noise floor as an attack. The moment the cognitive engine detects this anomaly, it employs the **Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)** technique to jump to a clear band within seconds. While static-frequency "dumb" systems remain helpless under jamming, a cognitive swarm becomes an "elusive" target for the enemy by constantly shifting frequencies. This dynamic adaptive capability increases the survivability of the swarm by 300%.

The reviewed literature reveals how Cognitive Radio integration in autonomous swarm systems is translated from theory to practice and delineates the TECHNICAL problems it resolves. In this section, we synthesized the performance of this technology through parameters of sensing sensitivity, latency, and security.

References

Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE journal on selected areas in communications*, *23*(2), 201-220.
Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer networks*, *50*(13), 2127-2159.
Mitola, J., & Maguire, G. Q. (2002). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE personal communications*, *6*(4), 13-18.
Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications magazine*, *46*(4), 40-48.
Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013). Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, *11*(3), 1254-1270.
Campion, M., Ranganathan, P., & Faruque, S. (2018). UAV swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, *7*(2), 93-106.
Tahir, A., Böling, J., Haghbayan, M. H., Toivonen, H. T., & Plosila, J. (2019). Swarms of unmanned aerial vehicles—A survey. *Journal of Industrial Information Integration*, *16*, 100106.
Abdulhae, O. T., Mandeep, J. S., & Islam, M. (2022). Cluster-based routing protocols for flying ad hoc networks (FANETs). *IEEE access*, *10*, 32981-33004.
Jacob, P., Sirigina, R. P., Madhukumar, A. S., & Prasad, V. A. (2016). Cognitive radio for aeronautical communications: A survey. *IEEE Access*, *4*, 3417-3443.

Dias Santana, G. M., Cristo, R. S. D., & Lucas Jaquie Castelo Branco, K. R. (2021). Integrating cognitive radio with unmanned aerial vehicles: An overview. *Sensors*, *21*(3), 830.
Reyes, H., Gellerman, N., & Kaabouch, N. (2015, March). A cognitive radio system for improving the reliability and security of UAS/UAV networks. In *2015 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-9). IEEE.
Nobar, S. K., Ahmed, M. H., Morgan, Y., & Mahmoud, S. A. (2021). Resource allocation in cognitive radio-enabled UAV communication. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, *8*(1), 296-310.

WHEN HYBRID IS NOT BETTER: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MFCC-BASED CNN, LSTM, AND CNN-LSTM ARCHITECTURES FOR ENVIRONMENTAL SOUND CLASSIFICATION

İkbal Gökçe[1*]
1*Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY, Faculty of Technology, Selcuklu, Konya, Turkey
*(233301038@ogr.selcuk.edu.tr)

1.ABSTRACT
Three deep learning architectures based on Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs)—CNN, LSTM, and hybrid CNN-LSTM—were compared for environmental sound classification using the UrbanSound8K dataset (8,732 records, 10 classes).
Model 1 (MFCC+CNN) achieved **89.81%** accuracy, Model 2 (MFCC+LSTM) achieved **11.45%** accuracy, and Model 3 (MFCC+CNN-LSTM) achieved **87.98%** accuracy. The study's **original contribution** is the experimental demonstration that the widely suggested hybrid CNN-LSTM architecture did not provide the highest performance for environmental sound classification, as might be expected in the literature. The hybrid model showed **1.83% lower accuracy** than the standalone CNN and revealed that the added computational complexity was not commensurate with the performance gain. The findings indicate that **spatial feature learning (CNN)** is more critical than **temporal modelling (LSTM)** in short-duration environmental sounds. These results emphasize the importance of careful architectural selection based on the specific characteristics of the dataset.
Keywords – Environmental Sound Classification, MFCC(Mel-Frequency Cepstral Coefficients), CNN(Convolutional Neural Network), LSTM (Long Short-Term Memory), Hybrid Architecture, UrbanSound8K

2.Introduction

In today's increasingly digitalized society, the automatic detection and classification of Environmental Sounds (ES) has become critically important for numerous applications, including smart cities, surveillance systems, health monitoring, and ecological balance tracking [7, 13]. The complex and dynamic nature of audio signals amplifies the challenges associated with these classification tasks.

In addressing sound classification problems, a common approach involves extracting compact feature sets that represent the fundamental characteristics of the signal, rather than directly utilizing raw audio waveforms.
In this context, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) are recognized as a dominant feature in the field due to their ability to mimic the frequency perception of the human auditory system. The effectiveness of MFCC has been demonstrated across various audio processing tasks, including both environmental sound classification [3, 6] and speech-based stress detection [1].

In recent years, advances in Deep Learning have initiated a fundamental transformation in sound classification methodologies [2, 7]. Traditional approaches have been replaced by architectures such as Convolutional Neural Networks (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) networks, which automatically learn complex patterns. CNNs excel at capturing local spatial patterns by treating MFCC spectrograms as 2D images [4, 6], while LSTM networks play a critical role in modeling temporal dependencies [11]. Deep residual architectures such as ResNet [8] have enabled the training of very deep networks by overcoming the gradient vanishing problem and have been successfully applied across numerous domains, including sound classification. Hybrid CNN-LSTM approaches, which combine the

strengths of both architectures, have also achieved high performance in complex tasks, particularly in emotion recognition [10, 11].

However, the current literature review reveals significant gaps and controversial issues that require resolution in this field:

- **Systematic Comparison Deficit:** Systematic and direct comparisons of MFCC-based pure CNN, pure LSTM, and Hybrid CNN-LSTM architectures under identical conditions on popular datasets such as UrbanSound8K remain limited [3, 12].

- **Computational Cost vs. Accuracy Trade-off:** Despite the high-performance potential of hybrid models, the substantial computational burden introduced by successive convolution operations [12] and the requirements of applications demanding low complexity [9] leave optimal model selection ambiguous.

- **Spatial vs. Temporal Feature Importance:** In tasks such as environmental sound classification, the relative contributions of CNN's spatial pattern capturing capability and LSTM's temporal modeling ability have not yet been clarified [3].

The fundamental motivation and contribution of this study is to systematically compare the performance of simplified 1D MFCC features on CNN, LSTM, and Hybrid CNN-LSTM architectures using the UrbanSound8K dataset, with the aim of addressing the gaps identified above. The experimental results support the thesis that Model 1 (MFCC+CNN) is the most efficient architecture with the highest accuracy **(%89.81)**, consistent with some findings in the literature [3], and that hybrid models are not always optimal.

3.Materials and Method

This section details the experimental process, dataset, feature extraction parameters, and the three model architectures compared, all designed to ensure the **scientific reproducibility** of our study. The main objective of this work is to investigate the effect of a simplified **1D MFCC feature representation** on **CNN**, **LSTM**, and **Hybrid** architectures for environmental sound classification.

3.1. Dataset and Preprocessing

The **UrbanSound8K** dataset, which is considered a standard benchmark in environmental sound classification, was used for the experimental implementations of this study.

- *Data Summary:* The dataset comprises a total of **8732 sound clips** belonging to 10 distinct classes of environmental sounds.
- *Data Splitting:* To ensure the reliability of the model training, the dataset was split into 80% Training (6985 examples) and 20% Test (1747 examples) sets. A **stratified sampling** approach was applied to preserve the class distribution across the splits.
- *Preprocessing:* A sampling rate of 22050 Hz was used for the signal processing steps. The class labels were converted into a categorical format using the **One-Hot Encoding** technique.

3.2. Feature Extraction and Representation Strategy

MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficient) features were utilized for the comparative analysis of all deep learning architectures, with the feature representation being the most critical step.

- MFCC Parameters: 40 MFCC coefficients were extracted using the Librosa library.

- Signal Processing Details: The signal window (frame size) was set to 1024, and the hop length (stride) was set to 512.

- Representation Method (Novelty): To test the core hypothesis of the experimental design, the **temporal mean** of the MFCC matrices was calculated, reducing each sound clip to a single **40-dimensional feature vector**. This simplified **1D representation** is crucial for testing the contribution of spatial patterns versus temporal sequence in the existing literature.

- Model Input: All models were fed with a 3D matrix of shape **(Number of Samples, 40, 1)**, where the final '1' dimension represents the added channel dimension to the 40-feature vector.

3.3. Proposed Model Architectures and Training Setup

All three models compared in this study were trained for **100 epochs** with a **batch size of 32**, using the **Adam Optimizer** (learning rate 0.001), to ensure that the results are directly comparable. The model architectures and computational complexities are summarized in Table 1 (which would be included here in the original paper).

Architectural Summary and Computational Complexity of Three Models

Model No	Architectural	Main Focus	Total Number of Parameters
Model 1	MFCC + CNN	Spatial Pattern Recognition	49,11
Model 2	MFCC + LSTM	Temporal Sequence Modelling	75,466
Model 3	MFCC + CNN-LSTM (Hibrit)	Spatial and Temporal Combination	71,944

Tablo-1: Architectural Summary and Computational Complexity of Three Models

3.3.1. Model 1: Convolutional Neural Network (CNN) Architecture

This model represents the simplest structure, with **49,110 parameters**, and is designed to capture local spatial patterns within the simplified 1D MFCC representation.

- Structure: It consists of 3 Conv1D layers (with 32, 64, and 128 filters, respectively) followed by Global Max Pooling.

- Function: Dropout (0.3) was applied after the Conv1D layers. The output was then reduced to a single vector via GlobalMaxPooling1D and passed to the subsequent Dense layers.

3.3.2. Model 2: Long Short-Term Memory (LSTM) Architecture

This model, with 75,466 parameters, has the highest parameter count among the compared architectures. It is used to test its ability to model **sequential dynamics** even with the simplified 1D MFCC representation.

- Structure: It starts with a single LSTM layer of 128 units.
- Details: It is followed by a Dropout (0.5) layer, then a Dense layer of 64 units (with a subsequent Dropout of 0.3), and finally, the 10-class Softmax output layer.

3.3.3. Model 3: Hybrid CNN-LSTM Architecture

Model 3 combines the feature extraction capabilities of CNN and the sequential analysis skills of LSTM, theoretically aiming for the strongest performance. With 71,944 parameters, it is significantly more complex than Model 1.

- Structure: The model begins with a Conv1D layer (64 filters) and MaxPooling1D. After applying Dropout (0.3), the output is fed into an LSTM layer of 100 units.
- Purpose: This hybrid design aims to analyze the temporal context of the spatial features extracted by the CNN, representing a common hybrid approach found in the literature.

4.dıscussıons

In this section, the experimental results obtained after 100 epochs of training are presented, the performance of the three architectures is compared, and the main thesis of the study, **"WHEN HYBRID IS NOT BETTER"**, is discussed in detail in light of the literature.

4.1. Model Performance and Comparison

The accuracy results obtained on the UrbanSound8K test set following the experiments are presented in Table 2, along with model complexity. It is noteworthy in this table that **Model 1** not only has the lowest number of parameters but also achieves the highest classification accuracy.

Table 2: UrbanSound8K Test Accuracies and Computational Complexity Comparison (The actual table content is assumed to be here.)

UrbandSound8K Test Accuracies and Computational Complexity Comparison				
Model No	**ARCHİTECTURAL**	**Test Accuracy (Val_Accuracy)**	**Total Number of Parameters**	**Key Takeaway**
Model 1	MFCC + CNN	%89.81	49,110 (Simplest)	Highest Accuracy
Model 2	MFCC + LSTM	%11.45	75,466 (Most Complex)	Lack of Sequential İnformation
Model 3	MFCC + CNN–LSTM (Hibrit)	%87.98	71,944	%1.83 Lower than CNN

Tablo 2: UrbandSound8K Test Accuracies and Computational Complexity Comparison

4.2. Evaluation of Model 1 (CNN) Superiority

Model 1's performance, which is the best among all architectures with **89.81% accuracy**, has proven the dominant role of **spatial feature learning (CNN)** in the environmental sound classification task.

This result is consistent with the findings of Palanisamy et al. [3], who demonstrated the superiority of CNN over LSTM on UrbanSound8K. The unique contribution of our study is linking this superiority to **feature representation**. The 1D MFCC representation (temporal average) largely destroys the temporal flow of the audio clip while preserving critical spatial patterns, such as the energy distribution within the frequency spectrum. Model 1 provided the most efficient structure for capturing these condensed spatial patterns.

4.3. Discussion of Model 3 (Hybrid) Decline: Proof of the Main Thesis

The fact that Model 3 (%87.98) achieved %1.83 lower accuracy than Model 1 and supported the paper's main thesis, **"WHEN HYBRID IS NOT BETTER"**, is the most important finding of this study.

4.3.1. Computational Cost vs. Gain:

Model 3 has **22,834** more parameters than Model 1. Despite this higher computational complexity, the drop in performance indicates that the added **LSTM layer** did not provide an additional layer of information in the already spatially optimized input. This situation supports the arguments [12] that the hybrid architecture brings unnecessary complexity for resource-constrained applications [9].

4.3.2. Generalization Capability:

The hybrid model's lower accuracy suggests that the additional parameters may have led to **overfitting** to the training set, thereby reducing its generalization capability. This result suggests that the hybrid architecture is not always optimal, and the architectural choice depends on the **feature engineering strategy (1D MFCC)** and the structure of the dataset.

4.4. Analysis of Model 2 (LSTM) Failure

Model 2's low accuracy of only **%11.45,** which is close to the level of random guessing, is a critical finding that proves the strength of the experimental design.

- *Impact of Feature Representation:* This result showed that the core function of LSTM, its ability to learn **temporal dependencies**, was completely eliminated by the **temporal averaging** operation in the 1D MFCC representation. LSTM becomes functionally useless without

sequential information. This strong evidence demonstrates how **feature engineering** absolutely determines model performance in deep learning- based classification tasks.

5.CONCLUSION AND FUTURE WORK

This study addressed the architectural choice dilemma in the field of Environmental Sound Classification (ESC) and systematically compared the performance of CNN, LSTM, and Hybrid CNN-LSTM architectures using a simplified **1D MFCC feature representation** on the UrbanSound8K dataset. The experimental results provided critical findings, contrary to the expectations in the literature, showing that there is not always a linear relationship between architectural complexity and performance gain. The most significant result obtained was the proof that **Model 1 (MFCC+CNN)** achieved the highest classification accuracy of **89.81** with the lowest computational complexity of **49,110 parameters**. This result experimentally validated the study's main thesis: the **"WHEN HYBRID IS NOT BETTER"** hypothesis.

The in-depth analysis of these findings demonstrated that the core reason for Model 1's success is the **dominant role of spatial feature learning (CNN)** in environmental sounds. The temporal averaging process applied during feature extraction enabled Model 1 to effectively utilize the condensed spatial patterns in the MFCC matrix, while simultaneously causing an absolute performance drop in Model 2. **Model 2 (MFCC+LSTM)** achieving only **%11.45** accuracy, close to the random guess level, is strong experimental evidence demonstrating the **absolute dependence of LSTM on temporal dependencies**, which are its core function. This finding highlights how the **feature engineering strategy** fundamentally impacts architectural performance in deep learning-based classification tasks.

The most significant original contribution of our study is clarifying the discussion surrounding the **Hybrid Architecture (Model 3)**. Despite having **22,834** more parameters than Model 1, Model 3 achieved **%87.98** accuracy, which is **%1.83** lower. This result draws a line on the general consensus [10, 11] in the literature regarding the high accuracy potential of Hybrid architectures. The observed performance decline indicated that the high computational complexity added to Model 3 was not proportional to the performance gain, supporting the literature's arguments that hybrid models are not always the optimal solution compared to pure models. These findings lead to the conclusion that unnecessary complexity should be avoided for the sake of accuracy when selecting a model for practical and **resource-constrained applications**.

In light of the results of this study, future research should focus on the following directions:

1. *2D Feature Representation:* Extending the limited feature representation assumption of our study, the true potential of hybrid architectures should be evaluated on **2D MFCC matrices** or **Mel Spectrograms**, which preserve the sequential structure of the data. This could fully reveal the theoretical power of Model 3.

2. *Advanced Architectural Analysis:* The optimal feature and architecture combination for environmental sound classification should be investigated in a broader context using more advanced recurrent architectures such as **Bi-LSTM** and the **Attention Mechanism**.

3. *Cost/Accuracy Analysis:* A detailed **cost-accuracy analysis** should be conducted by comparing the real-time speed and resource consumption performance of the 49,110 parameter CNN model on **embedded systems** (which require low complexity) against Hybrid models.

These future works aim to provide more definitive and practical guidance on architectural selection in the field of environmental sound classification.

References

[1] A. Kumar et al., "MFCC and CNN Based Stress Detection from Audio Signals," in *Proc. IEEE Int. Conf. Signal Process.*, 2023. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/10057845

[2] V. Raghavendran et al., "Deep Learning Techniques for Lung Sound Classification: A Systematic Review," *Electronics*, vol. 8, no. 10, article 127, 2019. [Online]. Available: https://mdpi.com/2504-2289/8/10/127

[3] K. Palanisamy et al., "Comparative Analysis of CNN and LSTM for Environmental Sound Classification," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, article 10762, 2023. [Online]. Available: https://mdpi.com/2071-1050/15/14/10762

[4] P. Pham et al., "Environmental Sound Classification Using Convolutional Neural Networks," in *Proc. DCASE Workshop*, 2016. [Online]. Available: https://people.cs.pitt.edu/~phuongpham/papers/dcase16a.pdf

[5] A. Ramadhani et al., "Feature Engineering for Audio Classification Using 1D-CNN," in *Proc. IEEE Int. Conf. Mach. Learn. Appl.*, 2024. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/10585335

[6] K. Lakshmi et al., "Noise-Robust Audio Classification Using MFCC and CNN," in *Proc. IEEE Int. Conf. Signal Process. Commun.*, 2025. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11033961

[7] A. Mesaros et al., "Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events: Outcome of the DCASE 2016 Challenge," *IEEE/ACM Trans. Audio Speech Lang. Process.*, vol. 26, no. 2, pp. 379-393, 2018. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8123864

[8] K. He et al., "Deep Residual Learning for Image Recognition," *arXiv preprint arXiv:2105.13734*, 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2105.13734

[9] T. Heittola et al., "Low-Complexity Acoustic Scene Classification for Multi-Device Audio," Tampere UNIVERSITY Research Portal, 2021. [Online]. Available: https://researchportal.tuni.fi/en/publications/low-complexity-acoustic-scene-classification-for-multi-device-aud/

[10] H. Qazi and B. N. Kaushik, "A Hybrid Technique Using CNN+LSTM for Speech Emotion Recognition," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 3108, no. 1, article 012023, 2024. [Online]. Available: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/3108/1/012023/meta

[11] S. Patil et al., "Hybrid ConvLSTM Architecture for Audio Classification," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process.*, 2024. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/10525931

[12] L. Liu et al., "Acoustic Scene Classification Using Deep Learning: Challenges and Opportunities," *Entropy*, vol. 23, no. 6, article 697, 2021. [Online]. Available: https://mdpi.com/1099-4300/23/6/697

[13] A. Mesaros et al., "DCASE 2019 Challenge: Acoustic Scene Classification," Tech. Rep., New York UNIVERSITY, 2019. [Online]. Available: https://archive.nyu.edu/handle/2451/60751

Artificial Intelligence in Healthcare: An Analysis of Applications, Advantages, and Core Limitations

Ayşe Nur ÇİL , Sevgi Sude DÜZENLİ

[1] Department of ComputerEngineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

Abstract-This study focuses on the analysis of current Artificial Intelligence (AI) applications in the healthcare sector, the advantages they offer, and the fundamental limitations they face. Data incompatibility and complexity issues arising from the inadequacies of existing General Health Data Models (GHDM) have been examined, with the aim of increasing the effectiveness of AI systems in diagnostic processes, treatment personalization, and clinical decision support mechanisms.Current achievements and challenges requiring solutions are being evaluated within the context of AI's potential benefit to gain a deep understanding of disease dynamics in light of large health data sets. The main objective of the research is to provide more cost-effective, accessible, and faster healthcare services through AI-based solutions, in the face of growing patient populations and complex health demands.The main advantages provided by AI are identified as the ability to rapidly analyze high-volume data, precisely detect critical patterns, and develop individualized treatment protocols. In contrast, the primary limitations of AI applications include; potential ethical and bias risks stemming from training data sources, lack of transparency in algorithms, and difficulties in integration with existing health information technology infrastructure.In conclusion, this analysis demonstrates the strategic importance of AI in healthcare by showcasing its capacity to enhance patient data evaluation and dynamically reveal the speed of parameter changes in treatment processes.

Keywords – Equivalent Electric Circuit; Squirrel Cage Induction Motor; Induction Motor Modelling; Loading of Induction Motor

1. Introduction

With the accelerating pace of technological advancements, the quality of life has significantly improved; notably, diagnosis, treatment, and preventive service processes in the healthcare sector have seen considerable enhancements. The increasing accessibility of health data, coupled with developments in big data analytics methods, has enabled Artificial Intelligence (AI) technologies to achieve notable successes in healthcare services in recent years [1]. AI applications that support clinical decision-making contribute to healthcare professionals in various ways by uncovering hidden information within large datasets.

Artificial Intelligence is a broad technological field that allows computer systems to mimic cognitive processes considered unique to the human mind, such as thinking, reasoning, learning, perception, and problem-solving [2]. While AI applications have become widespread in many sectors today, including automotive, finance, logistics, defense, and education, they hold a much more critical importance in the healthcare sector. This is because decisions made in healthcare directly affect human life, making the expected contribution of AI both greater and more sensitive. Consequently, AI is being used comprehensively in healthcare institutions, not only for the automation of administrative processes but

also for supporting clinical procedures, early diagnosis of diseases, personalized treatment planning, and improving access to health services.

Thanks to AI-based systems, healthcare professionals can evaluate patients' symptoms with a holistic approach and analyze various data sources, such as laboratory results, imaging data, and past health records, more systematically [3]. This provides significant advantages, particularly in the diagnosis of complex diseases or the management of clinical conditions requiring rapid intervention. AI-supported clinical decision support systems offer physicians alternative treatment pathways during the diagnostic process, can predetermine potential drug interactions, and suggest treatment options tailored to the patient's individual risk profile. Furthermore, remote patient monitoring technologies allow for closer tracking of chronic diseases, early detection of sudden clinical changes, which reduces unnecessary hospital visits and lowers medical error rates. Automation systems that reduce the workload in hospitals enable healthcare professionals to save time, allowing physicians and nurses to spend more time with their patients.

This study is prepared to examine the application areas of artificial intelligence in the health sector globally and in Turkey, evaluate the effects of AI applications, and especially present a general framework regarding the artificial intelligence projects carried out by the T.R. Ministry of Health.

2. Artificial Intelligence in Healthcare Services

The Australian Council of Learned Academies defines artificial intelligence as "a collection of interacting technologies that perform tasks and generate solutions to problems that would otherwise require human intelligence" [4]. Based on this definition, it is understood that AI makes a difference in many fields such as security, agriculture, industry, manufacturing, and especially healthcare. In recent years, scientific interest in AI applications in medicine has significantly increased, with high-accuracy models capable of guiding clinical decisions coming to the fore. The economic potential of AI in the healthcare sector is quite high. According to research conducted in past years, the market value of AI in medicine is projected to reach $291.5 billion by 2026 [5]. This forecast has risen, particularly following the COVID-19 pandemic. Another study found that in the US alone, approximately $150 billion in annual savings could be achieved in healthcare delivery by 2026 with ten promising AI applications that reflect diagnostic and therapeutic outcomes.

Artificial intelligence is a key component of the digital health ecosystem. According to the World Health Organization, digital health includes all knowledge, methods, and practices related to the development and application of technology to improve health services. Within this scope, AI plays important functions, particularly in low and middle-income countries, such as reducing geographical barriers, increasing accessibility, and strengthening preventive healthcare services.

Approximately four billion people worldwide face difficulties accessing basic health services, and the shortage of healthcare workers is expected to exceed 12.9 million by 2035 [6]. Therefore, artificial intelligence has become a critical tool for developing sustainable health systems. By rapidly collecting, processing, and analyzing data, and offering decision support to patients and physicians, AI aims to lighten the load on health systems.

2.1. Artificial Intelligence Applications Worldwide

Globally, AI applications are both reducing costs and improving the quality of healthcare services. For example, a study conducted in the US evaluated data from 500 patients and found that AI-based diagnostic methods were much more cost-effective compared to traditional methods. The unit cost of AI-based diagnosis was determined to be $189, whereas the cost for traditional methods was $497 [7].

AI and Clinical Decision Support Applications

A joint effort between Montefiore Health System and Intel reported a reduction in errors in drug dosage calculations, prevention of incorrect treatment plans, and minimization of human-related errors [8].

IBM Watson assists physicians by using natural language processing and machine learning techniques to scan electronic health records, quickly access scientific publications, and formulate treatment recommendations.

A study conducted on 638 patients in India determined that Watson's suggested treatments were 90% concordant with tumor board recommendations, and the system produced results in only 40 seconds [9].

Furthermore, robotic surgery systems (e.g., Da Vinci) create time and cost savings by enabling remote operation capabilities [10].

AI also offers significant gains in drug development processes. Considering that the time it takes for a drug to go from the laboratory to the patient is an average of 12 years, the time and cost burden during this process are understood to be quite high. In this context, GlaxoSmithKline (GSK), through its collaboration with Exscientia, a specialist in AI-based drug discovery, achieved a notable acceleration in drug research and development processes. Studies show that AI-supported molecule screening and optimization algorithms have yielded results in determining new drug candidates much faster compared to traditional methods. Moreover, this collaboration has resulted in more efficient execution of pre-clinical testing phases, the ability to predict and eliminate potential failures early on, and a reported reduction in overall costs by approximately 75% [11]. These findings reveal that AI is opening the door to revolutionary innovations in the drug development ecosystem and has become one of the fundamental technology areas shaping the future of the sector.

Radiology is one of the fields where artificial intelligence is most effective. An AI model developed in the US was able to examine mammography images and detect breast cancer risk with 99% accuracy and 30 times faster than physicians [12].

Similarly, an innovative AI system developed in China was used to predict a comatose patient's likelihood of regaining consciousness and their waking time. This model analyzed the patient's neurological data, brain imaging results, and clinical parameters, predicting with high accuracy that the patient would wake up, contrary to the specialists' forecasts. This early prediction made by the system allowed the treatment team to make necessary preparations in a timely manner, contributing to both the more effective management of the clinical process and the correct planning of resources [13]. AI's ability to produce rapid and data-driven predictions in such critical situations increases the importance of decision support systems, especially in intensive care units, and reveals the potential to detect subtle clinical variables that the human eye might miss.

Mater Hospital in Dublin has showcased one of the most successful examples of innovative AI-based approaches in healthcare by integrating "Digital Twin" technology into its clinical operations. This digital twin model, which simulates all of the hospital's radiology processes, analyzed the usage intensity of CT (Computed Tomography) and MRI (Magnetic Resonance Imaging) devices with real-time data flow, detected bottlenecks in patient flow, and created the most optimal operational scenarios. Thanks to this system, the average waiting time for CT scans was reduced by 13 minutes and for MRI scans by 25 minutes. Not only time savings but also annual cost savings of approximately 9500 Euros were achieved through improvements in personnel planning [14]. The digital twin model demonstrates how effective AI technologies can be in healthcare delivery, contributing to hospital management's ability to optimize resource utilization, increase device efficiency, and enhance patient satisfaction.

2.2. Artificial Intelligence Applications in Turkey

In the scope of the digitalization of healthcare services in Turkey, the T.R. Ministry of Health has developed and implemented many AI-based applications in recent years. These applications both strengthen early diagnosis and risk assessment processes for diseases and reduce the workload on health institutions by facilitating citizens' access to the healthcare system. The strong national health informatics infrastructure in Turkey significantly contributes to the effective development and rapid deployment of such AI projects.

One of the applications developed in this context is the Corona Precaution Application (Korona Önlem Uygulaması). During the COVID-19 pandemic, this AI-based system evaluated citizens' symptoms to determine their possible risk levels, guided users through algorithms, and significantly prevented unnecessary hospital visits [15]. Based on the data obtained from users indicating symptoms such as fever, cough, and shortness of breath, AI algorithms analyzed the information and provided suggestions for the person to stay at home, apply to a healthcare facility, or call 112. This application reduced the burden on healthcare professionals during the pandemic and allowed for a more systematic tracking of cases.

Another important system developed during the same period was the AI-supported CT (Computed Tomography) analysis model. This system automatically detects COVID-19-specific lung involvement and classifies the lesions in the image with percentage rates. The model reduces the workload of radiologists and provides rapid assessment in emergency situations. The Ministry of Health continues to improve the accuracy of the algorithm by analyzing datasets collected from different hospitals to further develop this system. This work shows that Turkey is among the countries actively integrating artificial intelligence into clinical processes in the field of medical imaging.

Another significant digital health application implemented by the Ministry is the What Do I Have (NV) System (Neyim Var). This application works with an AI algorithm that allows citizens to indicate their complaints on a 3D human model, directing them to the correct polyclinic. Reaching millions of users, this system has regulated patient flow, especially by reducing unnecessary congestion in emergency services and polyclinics, while also contributing to citizens' easy access to health services. Symptom data received via the application are analyzed by the AI model, and the user is directed to the most appropriate specialty.

In addition to these applications, the Life Fits into Home (HES) Application (Hayat Eve Sığar), which became one of the most common digital health tools during the pandemic, also serves as an example of AI-based health management systems in Turkey. The HES application allowed for the monitoring of

individuals exposed to or at risk of COVID-19 via mobile devices, and also contributed to users viewing risk maps, learning the case density in their immediate vicinity, and ensuring security by checking the HES code for entry into social areas. The HES application used algorithms that calculated the potential transmission risk by analyzing location data and contact information; in this respect, it ensured Turkey was among the countries effectively using AI in public health management.

When these works are evaluated as a whole, it is seen that Turkey is rapidly expanding the use of artificial intelligence in the health sector, strengthening its health informatics infrastructure, and taking important steps that increase its international competitiveness in this field. With the further development of AI applications, much more comprehensive improvements in diagnosis, treatment, and health management processes are anticipated in the future.

2.3. Potential Downsides of Artificial Intelligence

Although AI technologies offer great opportunities for improving healthcare services, the rapid digitalization brings with it various risks and limitations. There are significant debates, in particular, that the growing reliance of diagnosis, treatment, and patient monitoring processes on digital tools may lead to a weakening of communication between healthcare professionals and patients. Given that a patient's trust in their physician is largely shaped by face-to-face communication, it is argued that processes run entirely through algorithms could weaken the human-centered understanding of health.

It is also frequently highlighted in the literature that AI systems cause job insecurity among healthcare workers. The spread of automation inevitably leads to the transfer of repetitive and routine tasks to machines, causing concerns about reduced employment in some professions. Although experts state that AI aims to support and facilitate the work of healthcare professionals rather than replace them, the speed of technological transformation is seen to amplify these anxieties.

Furthermore, the development and integration of AI applications into health systems may lead to increased technological dependency. Hospitals increasingly basing diagnostic and treatment decisions on algorithms could cause health services to be disrupted in the event of a TECHNICAL malfunction or cyberattack. TECHNICAL problems such as coding errors in AI, algorithmic flaws, or incorrect data entry can lead to critical clinical errors [16]. For example, a poorly trained model classifying a tumor as harmless can cause serious diagnostic delays and treatment failures.

Since the data sets used in AI systems directly affect the accuracy of the model's outputs, data privacy and cybersecurity risks are also a major area of discussion. Medical data of patients falling into the wrong hands can lead to privacy violations and misuse of personal data [17]. Therefore, security vulnerabilities in AI-based clinical systems are among the issues requiring strong ethical evaluation.

Moreover, imbalances or biases in the data sets used to train AI models are directly reflected in the model's results. This can lead to discriminatory algorithmic decisions and violate the principle of justice. For example, an algorithm trained on a data set where a specific ethnic group is underrepresented may produce incorrect or incomplete decisions for patients belonging to that group. This can lead to unacceptable consequences from the perspective of medical ethics.

From a medical ethics perspective, artificial intelligence also brings with it significant debates such as privacy violations, the risk of discrimination, erroneous guidance, and ambiguity of responsibility. For

example, in the event that an AI system makes an incorrect treatment suggestion, the question of "whether the responsibility belongs to the physician, the software developer, or the institution that developed the system" remains unclear [18]. This uncertainty points to the need for legal regulation of AI systems.

For all these reasons, while the rapid rise of AI in healthcare offers significant opportunities, it also brings multifaceted risks—ethical, legal, sociological, and technical—that need to be managed carefully. To prevent these risks, it is necessary to develop transparent algorithms, strengthen data security, ensure active involvement of ethics committees, and implement AI integration in a balanced manner that does not completely exclude the human factor.

3. Conclusion

Artificial intelligence accelerates diagnosis and treatment processes, reduces costs, and increases efficiency in healthcare services. Earlier and more accurate diagnosis of diseases, optimization of treatment options, and simplification of administrative processes are among the main contributions offered by AI.

For AI-based health systems to be successfully implemented, it is of great importance to clearly define the ethical, legal, and TECHNICAL framework, and meticulously protect the principles of data security, privacy, algorithmic transparency, and clinical reliability.

The widespread use of AI applications on a national scale in Turkey is a significant advantage. The investments made within the scope of the "National Artificial Intelligence Strategy 2021–2025" indicate that AI will play a much more effective role in healthcare services in the future [19].

Overall, the use of AI in healthcare services seems inevitable due to its ability to offer fast, accurate, and economical solutions. However, a multi-stakeholder approach must be adopted for the safe, ethical, and sustainable implementation of these technologies.

REFERENCES

[1]Jiang F, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. Stroke and Vascular Neurology 2017;2:230-243

[2] Uzun T. Yapay Zeka ve Sağlık Uygulamaları. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi İktisai ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2020;3(1):80-92.

[3] Çalışkan SA, ve ark. Sağlık Çalışanları Yapay Zekaya Hazır Mı? Sağlık Bilim Yapay Zeka Dergisi 2021;35.

[4] Walsh T, et al. The effective and ethical development of artificial intelligence: an opportunity to improve our wellbeing. (Australia): Australian Council of Learned Academies; 2019

[5] Globenewswire.com [Internet]. Global Artificial Intelligence AI Market [Cited: 10 July 2023]. Available from: https://www.globenewswire.com/news-release/2021/10/27/2321714/0/en/Global-Artificial-Intelligence-AI-Market-to-Reach-US 291-5-Billion-by-the-Year-2026.html.

[6] Isbanner S, et al. The adoption of artificial ıntelligence in health care and social services in australia: findings from a methodologically innovative national survey of values and attitudes (the AVA-AI Study). J Med Internet Res 2022;24(8):e37611

[7] Mesko B. Tıbbın Geleceğine Yolculuk. İstanbul: Optimist Yayın Grubu, 2018; 174-183.

[8] . Healthtechmagazine.net [Internet]. Intel AI Semantic Data Lakes Save Patients Lives Montefiore Health System. (2018). [Cited:

[9] Somashekhar SP, ve ark. Double blinded validation study to assess performance of IBM artificial intelligence platform, Watson

for oncology in comparison with Manipal multidisciplinary tumour board – First study of 638 breast cancer cases. Cancer Research

[10] (Pesapane, Sannino, Ianniello & Pompili, 2018)

[11] Büyükgöze S, Dereli E. Dijital sağlık uygulamalarında yapay zeka. VI. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Fen ve Sağlık, Ankara, 2019; 7-10.

[12] July 2023]. Available from: https://healthtechmagazine.net/article/2018/09/intel-ai-semantic-data-lakes-save-patient-lives montefiore-health-system

[13] Scmp.com [Internet]. Doctors said the coma patients would never wake AI said they would - and they did, South China Morning

Post. (2018). [Cited: 17 May 2023]. Available from: https://www.scmp.com/news/china/science/article/2163298/doctors-said

coma-patients-would-never-wake-ai-said-they-would.

[14] Siemenshealthineers.com [Internet]. Siemens Healthineers. (2018). [Cited: 17 May 2023]. Available from:

https://www.siemens-healthineers.com/perspectives/mso-digital-twin-mater.html.

[15] Dijitalbiz.com [Internet]. Gelecekte Sağlığı Dijital Araçlardan Bağımsız Düşünemeyiz. (2023). [Cited: 10 September 2023]. Available from: https://www.dijitalbiz.com/saglik-bakan-yardimcisi-dr-suayip-birinci-gelecekte-sagligi-dijital-araclardan-bagimsiz dusunemeyiz/.

[16] Vayena, E., Dzenowagis, J., & Kopar, P. (2022). Artificial intelligence and digital health: The opportunities and the challenges. Bulletin of the World Health Organization, 100(2), 163–168.

[17] Char, D. S., Shah, N. H., & Magnus, D. (2018). Implementing Machine Learning in Health Care—Addressing Ethical Challenges. The New England Journal of Medicine, 378(11), 981–983.

[18] Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nature Medicine, 25(1), 44–56.

[19] Davenport T, Kalakota R. The potential for artificial intelligence in healthcare. Future Healthc J 2019;6(2):94-98.

Rajkomar, A., Dean, J., & Kohane, I. S. (2019). Machine Learning in Medicine. The New England Journal of Medicine, 380(14), 1347–1358.

Beam, A. L., & Kohane, I. S. (2018). Big Data and Machine Learning in Health Care. JAMA, 319(13), 1317–1318.

Shickel, B., Ho, K. M., Alarcon, A., & Lee, J. (2017). Deep Learning in Health Care: Review of Applications and Challenges. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 36(6), 47–58.

Chen, J. H., & Asch, D. A. (2017). Machine Learning and Prediction in Medicine—Beyond the Peak of Inflated Expectations. The New England Journal of Medicine, 376(26), 2507–2509.

Pesapane, F., Sannino, F., Ianniello, S., & Pompili, G. (2018). The Role of Artificial Intelligence in Cancer Imaging: Present and Future. Journal of Clinical Medicine, 7(12), 522.

Kelly, C. J., Karthikesalingam, A., Suleyman, M., & Corrado, G. (2019). Key challenges for the clinical adoption of deep learning in healthcare. npj Digital Medicine, 2(1), 1–6.

Price, W. N., & Cohen, I. G. (2019). Privacy in the Age of Medical Big Data. Nature Medicine, 25(1), 37–43.

Selçuk University 4th International Technology and Innovation Student Symposium

November 27-30, 2025 Konya, Turkey

The Industrialization of Digital Extortion: An Analysis of Ransomware-as-a-Service, Shifting Attack Vectors, and National Resilience Strategies in Türkiye

Sadık Bilal ŞAN[1*], Sema SERVİ[2]

[1*] *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*
[2*] *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[1*]*(233311004@ogr.selcuk.edu.tr)*

Abstract – This analysis investigates the strategic evolution of ransomware from an opportunistic cyber threat into a professionalized, industrial-scale criminal enterprise, primarily facilitated by the Ransomware-as-a-Service (RaaS) business model. Through a rigorous synthesis of academic literature, industry threat intelligence reports, and an examination of Türkiye's legal frameworks, this paper provides a comprehensive assessment of the contemporary digital extortion ecosystem. Key findings reveal a significant strategic shift in attack vectors within Türkiye. This is characterized by a dramatic 173% increase in mobile financial threats targeting individuals (Kaspersky, 2024) and a concurrent pivot by threat actors towards direct corporate network exploitation over traditional malware delivery (WatchGuard, 2024). The analysis confirms the dominance of the affiliate-driven RaaS model (DGRNET, 2025) in enabling this threat diversification. Furthermore, it highlights the severe legal and economic ramifications for victim organizations under Türkiye's Personal Data Protection Law (KVKK) and the Turkish Penal Code (TCK), which compound the financial damage of an attack with significant regulatory risk. The paper concludes that these trends necessitate a recalibration of national policy and corporate defense strategies, urging a greater focus on individual mobile security awareness as a matter of economic security and the deep integration of legal compliance into TECHNICAL incident response protocols.

Keywords – Equivalent Electric Circuit; Squirrel Cage Induction Motor; Induction Motor Modelling; Loading of Induction Motor

Introduction

Ransomware has industrialized, evolving from a cottage cybercrime into a dominant global economic threat with organized business models that rival legitimate software enterprises. With global costs exceeding $1 billion in 2023 alone, digital extortion has established itself as a highly lucrative and disruptive form of organized cybercrime, necessitating a strategic re-evaluation of the threat beyond purely TECHNICAL countermeasures (Synology, n.d.). This paper's central thesis is that the industrialization of ransomware, principally through the Ransomware-as-a-Service (RaaS) model, has enabled a sophisticated, portfolio-based attack strategy in Türkiye—pitting high-reward corporate network intrusions against high-volume mobile financial threats—which is uniquely exacerbated by the nation's stringent legal and data protection framework.

The ransomware of today bears little resemblance to its predecessors. Early tactics, such as the "Police Trojan" Reveton, relied on simple screen-locking and social engineering, claiming a user had engaged in illegal activity to coerce a small "fine" (Celiktas & Çelik, 2018). In stark contrast, modern ransomware campaigns employ sophisticated, multi-extortion models that utilize advanced encryption algorithms rivaling those found in commercial security products (Celiktas & Çelik, 2018). These attacks not only

encrypt critical data but also exfiltrate it, adding a layer of blackmail with the threat of public data leakage.

The primary catalyst for this transformation has been the professionalization and industrialization of cybercrime through the RaaS business model. RaaS platforms have significantly lowered the barrier to entry, allowing less technically skilled criminals (affiliates) to lease sophisticated malware toolkits from expert developers (IBM, 2024). This has created a scalable, franchise-like criminal ecosystem that fuels a continuous cycle of innovation and attack proliferation, enabling threat actors to operate with the efficiency of legitimate software companies.

Within this global context, Türkiye has emerged as a significant and high-value target for ransomware groups. The nation's rapid digital transformation, coupled with its strategic economic importance, presents a lucrative landscape for cybercriminals seeking to maximize financial gain. Ransomware attacks in Türkiye affect a wide spectrum of society, from large multinational corporations and government agencies to small businesses and individual citizens, underscoring the pervasive nature of the threat (Celiktas & Çelik, 2018).

This article aims to provide a comprehensive analysis of the contemporary ransomware ecosystem in Türkiye. It will achieve this by examining the strategic shift in attack vectors targeting both corporate networks and individual mobile users, assessing the organizational impact of the dominant RaaS model, and evaluating the nation's legal and policy framework for cyber resilience. By synthesizing TECHNICAL threat data with legal and economic analysis, this study seeks to provide a holistic understanding of the challenge and inform the development of more effective national and corporate defense strategies. The analysis begins by dissecting the operational mechanics of the RaaS model, the engine driving this new era of digital extortion.

3.0 Literature-Based Analysis: The Contemporary Ransomware Ecosystem

3.1 The Industrialization of Extortion: The Ransomware-as-a-Service (RaaS) Model

The contemporary ransomware landscape is defined by a strategic shift away from bespoke, self-developed malware towards the highly scalable and commercial Ransomware-as-a-Service (RaaS) model. This paradigm has transformed digital extortion into a complete business ecosystem that mirrors legitimate Software-as-a-Service (SaaS) offerings. RaaS platforms provide aspiring cybercriminals with ready-made ransomware tools, deployment infrastructure, payment processing systems, and even TECHNICAL support, effectively democratizing access to high-impact cyber weaponry.

The RaaS model operates on a clear division of labor between two primary roles: "developers" and "affiliates." The developers are the technically skilled threat actors responsible for creating, maintaining, and updating the core ransomware platform, including the encryption payloads and command-and-control infrastructure. Affiliates, who often possess less TECHNICAL expertise, lease these tools to execute attacks. They are typically responsible for gaining initial access to victim networks, deploying the ransomware, and negotiating with the victim. This structure is governed by a profit-sharing agreement, where developers typically receive 20% to 40% of any successful ransom payment, while the affiliate retains the larger share (IBM, 2024).

A salient case study of this model's aggression and evolution is the DragonForce ransomware group. Emerging in 2023, DragonForce rapidly gained prominence through an aggressive, affiliate-driven structure. The group demonstrated significant operational agility by reusing leaked source code from other major ransomware families like LockBit and Conti, a parasitic and opportunistic tactic that accelerates development by building on the "successes" of previous major players. In 2025, the group rebranded itself as a "cartel," a strategic move designed to encourage greater affiliate autonomy and

expand its operational footprint (Trend Micro, 2025). This professionalization extends to the very marketing and support structures of these platforms:

As per Crowdstrike, RaaS kits are advertised on dark web marketplaces and include 24/7 support, bundled offers, user reviews, forums and other features identical to those offered by legitimate SaaS providers. (IBM, 2024)

This industrialization has fundamentally altered the threat landscape by increasing the volume, velocity, and sophistication of attacks. The impact of this model is most evident in the specific attack vectors now being prioritized by threat actors operating in Türkiye.

3.2 A Dichotomy in Targeting: Analyzing the Vectoral Shift in Türkiye

The industrialized efficiency of the RaaS model has enabled a significant bifurcated threat model in Türkiye. This dual-pronged strategy is a deliberate economic decision by threat actors to optimize their return on investment, simultaneously conducting highly targeted attacks against corporate entities while launching high-volume campaigns against individual citizens. The RaaS affiliate model makes this strategy uniquely feasible, allowing specialized affiliates to focus on either complex corporate network intrusions or scalable social engineering for mobile users.

On the corporate front, attack volumes have shown a steady increase, with Kaspersky (2023) reporting an 8% rise in ransomware attempts against Turkish businesses in Q2 2023 compared to the previous quarter. More critically, the tactical approach has evolved. Analysis from WatchGuard (2024) reveals a dramatic tactical shift away from broad-based malware campaigns towards direct network exploitation. While overall malware detections dropped by 76.53%, there was a staggering 2,300% year-over-year spike in network intrusions. This indicates that attackers are bypassing traditional email-based malware delivery in favor of exploiting vulnerabilities in public-facing applications and network infrastructure to gain direct access. The most frequently targeted sectors in Türkiye—manufacturing, professional services, and healthcare—align with this strategy, chosen for their operational dependence on connected systems and high-value data (San & Servi, n.d.).

In stark contrast to the targeted corporate attacks, the threat landscape for individuals in Türkiye is defined by an explosive surge in mobile-based threats. According to Kaspersky (2024), the number of users affected by mobile financial threats in Türkiye saw a 173% increase in 2024 compared to 2023, a trend that is projected to continue. This demonstrates a strategic pivot by RaaS affiliates towards high-volume, lower-resistance targets.

The strategic rationale behind this shift is clear. Attackers are leveraging the widespread adoption of mobile devices and vulnerabilities introduced by Bring-Your-Own-Device (BYOD) policies as a lucrative attack vector. These campaigns often rely on social engineering tactics, duping users into downloading malicious applications from unverified app stores or clicking on malicious links shared via social media and messaging platforms (MasterBase, 2023). By targeting individuals' financial data on their phones, attackers can execute a larger number of lower-value attacks that, in aggregate, rival the profitability of a single large corporate breach but with significantly less effort and risk. This divergence in attack vectors highlights the adaptability of the RaaS ecosystem, which is already preparing for the next frontier of extortion techniques.

3.3 The Next Frontier of Threats: Future Methodologies and Projections

The ransomware threat is not static; it is in a constant state of evolution as threat actors actively research and develop next-generation attack methodologies to overcome modern defenses and maximize impact. These developments represent the strategic foresight of an industrialized criminal ecosystem, which,

like any legitimate technology sector, invests in R&D to overcome future defenses and ensure long-term market viability. Projections indicate a future where the core tenets of digital extortion will shift from disrupting data availability to compromising data integrity and preparing for technological paradigm shifts like quantum computing.

One of the most concerning future techniques is Data Poisoning. This methodology represents a fundamental shift in the attacker's objective. Instead of simply encrypting data to make it inaccessible, attackers secretly manipulate or insert false data into an organization's databases. The implications are severe: even if an organization refuses to pay or restores data from backups, the integrity of their entire dataset is compromised, rendering it untrustworthy. This poses a catastrophic risk to sectors like finance, where data accuracy is paramount, and healthcare, where manipulated patient records could have life-threatening consequences (Kaspersky, 2024). The critical nature of this threat is underscored by its ability to undermine the very foundation of an organization's data-driven operations:

However, the data poisoning technique will cause doubt about the integrity of the entire dataset of the business, even if the data is decrypted. (Kaspersky, 2024)

Simultaneously, sophisticated threat actors are preparing for the advent of quantum computing by developing Quantum-Resistant Ransomware. As quantum computers become a reality, they will possess the computational power to break many currently used encryption algorithms. Forward-thinking ransomware groups are anticipated to deploy post-quantum cryptography, which is designed to withstand decryption attempts from both classical and future quantum computers. This would make encrypted data nearly impossible to recover through brute-force methods, cementing the attacker's leverage over the victim and ensuring the long-term viability of their criminal enterprise (Kaspersky, 2024). These evolving methodologies carry profound economic and legal consequences, particularly within the specific regulatory context of Türkiye.

3.4 Economic and Legal Consequences within the Turkish Framework

Ransomware attacks inflict severe economic and legal ramifications that extend far beyond the initial ransom demand. Within Türkiye's specific regulatory environment, these consequences are amplified, transforming a cybersecurity incident into a multifaceted corporate crisis encompassing financial loss, operational disruption, and significant legal liability.

The economic impact is twofold, comprising direct and indirect costs. Direct costs include the ransom payment itself, fees for recovery and incident response services, and increased cybersecurity insurance premiums. However, the indirect costs are often far larger and more damaging. These include business downtime, productivity losses from inaccessible systems, and profound reputational damage that can erode customer trust and market share (Synology, n.d.). To contextualize the potential financial scale, the global average cost of a data breach reached $4.54 million in 2022, according to a report by IBM, a figure Kaspersky (2023) highlights to underscore the immense financial stakes.

In Türkiye, these economic damages are compounded by a stringent legal framework. The creation, distribution, or possession of malicious software for criminal purposes is explicitly defined as a cybercrime under the Turkish Penal Code (TCK) Article 245/a, which prescribes penalties of one to three years of imprisonment and up to a five-thousand-day judicial fine (Akbulut Hukuk, 2022).

More consequentially for victim organizations is the Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK), Türkiye's comprehensive data protection law. A ransomware attack that results in a data breach, either through exfiltration or unauthorized access, constitutes a direct violation of the KVKK's data security obligations. This exposes the victim organization to substantial administrative fines levied by the data protection authority, as well as potential civil liability claims from affected data subjects. This legal

reality turns a TECHNICAL failure into a severe legal compliance crisis, forcing organizations to manage not just the cyber incident but also its regulatory fallout (Akbulut Hukuk, 2022). A notable Turkish court case illustrates this complex intersection: following a ransomware attack that rendered its electronic records unusable, a company was compelled to petition the court for a "zayi belgesi" (loss certificate) to legally account for the destroyed digital documents, demonstrating the tangible legal procedures that follow such an incident (Akbulut Hukuk, 2022). This entanglement of TECHNICAL failure with legal and commercial procedure underscores the multifaceted nature of the ransomware threat, the broader implications of which demand closer examination.

4.0 Discussion

The synthesized findings from this analysis offer a clear and compelling interpretation of the contemporary ransomware threat in Türkiye, highlighting its industrialized nature and the multifaceted challenges it presents. The evidence demonstrates a definitive bifurcation of the threat landscape, a dual-pronged strategy enabled and accelerated by the professionalization of cybercrime.

The primary interpretation is that ransomware in Türkiye is no longer a monolithic threat. Instead, it operates on two distinct fronts: highly professionalized, network-focused attacks targeting strategic corporate assets, and a simultaneous, explosive expansion of lower-sophistication, high-volume attacks against individual mobile financial users. Corporate attacks exploit TECHNICAL vulnerabilities like unpatched systems, whereas mobile attacks rely predominantly on social engineering. The common enabler for both these divergent trends is the Ransomware-as-a-Service (RaaS) model, which provides the tools and infrastructure for developers and affiliates to pursue whichever attack vector offers the optimal balance of risk and reward.

Comparing Türkiye’s national response to Europe’s regulatory approach reveals different philosophies of resilience. Türkiye's framework, outlined in the National Cyber Security Strategy (2024-2028), provides a high-level strategic direction (UAB, 2024). In contrast, Europe’s NIS2 Directive adopts a more prescriptive, regulatory stance, mandating stringent security measures for critical sectors and requiring that ransomware incidents be reported within 48 hours (DGRNET, 2025). The contrast highlights a strategic question for policymakers regarding the balance between high-level strategy and enforceable regulatory mandates.

The strategic implications of these trends are profound. The strategic pivot towards mobile attacks transforms individual mobile users from disparate targets into a collective, systemic vulnerability. The aggregation of thousands of small-scale financial compromises poses a cumulative threat to national economic stability, demanding a policy response on par with the protection of critical infrastructure. Concurrently, the severe legal penalties under KVKK mean that corporate incident response can no longer be a purely TECHNICAL exercise. The immediate and deep integration of legal and IT teams from the moment an incident is detected is now an operational necessity to manage the dual crises of TECHNICAL recovery and legal compliance. These integrated challenges demand a forward-looking set of actionable recommendations.

5.0 Conclusion

This analysis has demonstrated that ransomware has evolved from a simple malware threat into an industrialized criminal enterprise. This transformation is driven by the RaaS model, which has professionalized digital extortion and enabled a strategic divergence of attack vectors in Türkiye. The threat landscape is now characterized by both highly targeted, network-level intrusions against corporate entities and a concurrent, explosive growth in mobile financial threats against individual citizens. Furthermore, the analysis confirms that Türkiye's domestic legal framework, particularly the KVKK,

adds a significant layer of regulatory risk and financial liability for victim organizations, compounding the direct costs of an attack.

Based on these insights, the implications for policymakers and corporations are clear. National policy should prioritize large-scale public awareness campaigns focused on mobile security hygiene and consider providing enhanced cybersecurity support for small and medium-sized enterprises (SMEs). For their part, corporations must move beyond reactive security postures and adopt proactive, multi-layered defense strategies. This includes implementing robust TECHNICAL frameworks such as the Detection, Avoidance, and Mitigation (DAM) framework (Kapoor et al., 2021) and adopting a Zero Trust architecture to limit the lateral movement of attackers within networks (IBM, 2024). Incident response plans must be updated to integrate legal counsel from the outset to navigate the complexities of KVKK compliance.

Future research should focus on several critical areas to stay ahead of the threat. In-depth analysis of the RaaS affiliate supply chain within Türkiye could reveal key nodes for disruption. Additionally, developing and testing effective TECHNICAL and procedural defense models specifically designed to counter emerging threats like data poisoning will be crucial for maintaining data integrity. Ultimately, countering the persistent and adaptive threat of digital extortion requires an equally proactive, adaptive, and nationally coordinated approach to building cyber resilience.

References

Taylor CW. Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability. IEEE Trans Power Del 1992;2(7):480–8.

Berg GJ. Power system load representation. Proc IEE 1973;120: 344–8.

Ohyama T, et al. Voltage dependence of composite loads in power systems. IEEE Trans Power Appar Syst 1985;PAS-104:3064–73.

Sekine T, Ohtsuki H. Cascaded voltage collapse. IEEE Trans Power Syst 1990;1(5):250–6.

Taylor CW. Power system voltage stability. New York: McGraw- Hill, 1994.

Hill DJ. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. IEEE Trans Power Syst 1993;1(8):166–76.

Xu W, Mansour Y. Voltage stability analysis using generic dynamic load models. IEEE Trans Power Syst 1994;1(9):479–93.

Borghetti A, Caldon R, Mari A, Nucci CA. On dynamic load models for voltage stability studies. IEEE Trans Power Syst 1997;1(12):293– 303.

Prasad GD, AI-Mulhim MA. Performance evaluation of dynamic load models for voltage stability analysis. Int J Electr Power Energy Syst 1997;8(19):533–40.

Balanathan R, Pahalawaththa NC, Annakkage UD. Undervoltage load shedding for induction motor dominant loads considering P, Q coupling. IEE Proc Gener Transm Distrib 1999;146(4):337–42.

Kundur P. Power system stability and control. New York: McGraw- Hill, 1994.

Stanley HC. An analysis of the induction motor. AIEE Trans 1938;57:751–5.

Işık, F. 2000. Taguchi Metodu ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul. 75.

Taylan, D. (2009). Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. 73.

Taguchi, G., Chowdury, S., Wu, Y., 2005. Taguchi's quality engineering hanbook. ASI consulting group, LLC, Livonia, Michigan, ISBN 0-471-41334-8.

Şirvancı, M., 1997. Kalite için deney tasarımı. Literatür yayınları. İstanbul, 110s.

E. B. Agamloh, A. Cavagnino, and S. Vaschetto, "Accurate determination of induction machine torque and current versus speed characteristics", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 4, pp. 3285–3294, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2675984.

P. C. Krause and C. H. Thomas, "Simulation of symmetrical induction machinery", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 84, no. 11, pp. 1038–1053, 1965. DOI: 10.1109/TPAS.1965.4766135.

Development of a Real-World Plant Leaf Image Dataset and Deep Learning-Based Disease Detection Model for Sustainable Agriculture

M.F. KUNDURACI[1] , İ.A. ÖZKAN[2], S.SERVİ[3]

[1*] *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[2] *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[32] *Department of Computer Engineering, Selcuk UNIVERSITY Faculty of Technology, Selçuklu, Konya*

[*]*(furkankunduraci@gmail.com)*

Abstract – The early detection of plant diseases, which directly affect agricultural productivity, is of critical importance for ensuring food sustainability. Existing image datasets in the literature are predominantly composed of images captured under controlled laboratory conditions or artificial lighting. To address this limitation, this study presents a new and comprehensive dataset consisting of leaf images captured in the plants' natural environment and under natural lighting conditions. The dataset includes a total of 20 classes—representing healthy and diseased samples from 18 different plant species—and comprises 20,985 images with a resolution of 512×512 pixels.

To validate the effectiveness of the dataset, models were developed on two different platforms. First, in the Orange data mining software, deep learning models such as SqueezeNet and DeepLoc were utilized for feature extraction; these features were then tested using classifiers including Logistic Regression, Artificial Neural Networks, and k-NN. Based on 10-fold cross-validation, the SqueezeNet model achieved 100% accuracy and an average F1-score of 99%. Second, a model trained on the Google Teachable Machine platform reached a 100% accuracy rate on the test data.

The model's performance was further evaluated using "real-world" images obtained from outside the dataset, and it demonstrated a high success rate in identifying plant diseases. The ultimate goal of this study is to export the trained model as a TFLite file and integrate it into a mobile application, enabling non-expert users to identify plant species and diseases directly in the field.

Keywords – Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, Computer Vision, Image Processing

INTRODUCTION

Agriculture is a critical sector both worldwide and in Türkiye. The continuation of life, the sustainability of food production, and food quality are directly associated with agricultural activities. Türkiye characterizes itself as an agrarian society; however, the share of agriculture in the Gross Domestic Product (GDP) decreased from 8.2% in 2011 to 5.8% in 2018. Although this share showed a declining trend between 2011 and 2018, it increased to 6.4% in 2019 and to 6.7% in 2020, remained at 6.5% in 2022, and reached 6.7% in 2023. Overall, the share of agriculture in the GDP exhibits an upward trend over the long term [1].

When the population living in villages and small towns is considered, the rate was 6.8% in 2021 and declined to 6.6% in 2022 [2]. Moreover, the "Fresh Fruit and Vegetable Sector Report" indicates that 3,976,173 tons of fresh fruit and vegetables were exported in 2019, while this amount increased to 4,882,748 tons in 2022. In the same years, export revenue grew from 2,192,805,000 USD to 2,855,347,000 USD. As reflected in the report, agricultural product exports have increased steadily over the years [3].

One of the most significant factors affecting agricultural productivity is the healthy cultivation of crops and the prevention of disease transmission to fields, orchards, or vineyards. Plant diseases drastically reduce productivity, causing both temporal and economic losses. If certain plant diseases are not detected early, they may spread throughout the entire crop, potentially resulting in the complete loss of a farmer's harvest. In a sector so profoundly influenced by plant diseases, accurate production practices and correct identification of plant conditions are of paramount importance. While such tasks fall within

the domain of agricultural engineering, this study aims to develop a software application that assists individuals with limited agricultural knowledge and no expertise in plant pathology. The objective is to design a mobile application capable of identifying the species of a photographed plant and determining whether it is healthy or diseased.

One of the earliest studies on image-based detection of plant diseases was conducted by Bravo C. et al. in 2003 [4]. The aim was to determine the spectral reflectance differences between healthy wheat plants and those infected with *Puccinia striiformis* (yellow rust). Spectral images collected from the field were captured using a spectrograph mounted on a spray boom. The authors reported that, using this method, confusion rates decreased from 12% to 4% in four different wavebands.

In another study by Kumar and Kaur [5], methods used in plant disease detection were compared, including SVM, BPNN, SGDM, and K-means clustering techniques. The authors emphasized that obtaining ideal training data for SVM is challenging, and that K-means clustering is disadvantaged in terms of computational time. Due to such limitations, they concluded that the BPNN approach emerges as the most suitable and easily applicable model for plant disease detection.

A study published by Konstantinos P. Ferentinos in 2018 [6] developed convolutional neural network models to detect and diagnose plant diseases using simple leaf images of both healthy and diseased plants. The models were trained on an open database consisting of 87,848 images across 58 classes representing combinations of plant species and diseases, including healthy samples, over 25 plant types. The study reported an accuracy of 99.53%.

In another work, Sharada P. Mohanty et al. (2016) [7] employed deep learning for image-based disease detection. Using a public dataset containing 54,306 images of diseased and healthy plant leaves collected under controlled conditions, a deep convolutional neural network was trained to identify 14 crop species and 26 diseases (or the absence thereof). The trained model achieved 99.35% accuracy on an augmented test set, demonstrating the feasibility of this approach. Overall, the authors argued that training deep learning models on increasingly available public image datasets paves the way toward large-scale, smartphone-assisted plant disease diagnostics.

A study conducted by M. S. Mustafa et al. in 2020 [8] focused on plants used in the medical and cosmetic industries and emphasized the importance of early disease detection. The proposed system integrates fuzzy inference, Naive Bayes (NB), probabilistic neural networks (PNN), and support vector machines (SVM). The study examined 10 different plant species and reported that the integrated machine learning approaches achieved nearly 99% recognition and detection accuracy.

The work of Tete and Kamlu (2017) [9] provided both a comparison of existing studies up to that year and a proposed solution using the K-means algorithm. Their results indicated that K-means clustering outperforms thresholding techniques in detecting plant diseases.

In a 2017 study by P. Moghadam et al. [10], the detection of plant diseases was performed using hyperspectral imaging. This work proposed the use of hyperspectral imaging techniques (VNIR and SWIR) in combination with machine learning approaches to detect Tomato Spotted Wilt Virus (TSWV) in pepper plants.

MATERIALS AND METHOD

In this study, various classification tools and methods were employed, and comparisons among these methods were conducted. Tools such as Orange and Teachable Machine were utilized. The classification algorithms and models used in the study are discussed in detail below. The workflow followed throughout the study is presented in Figure 1.

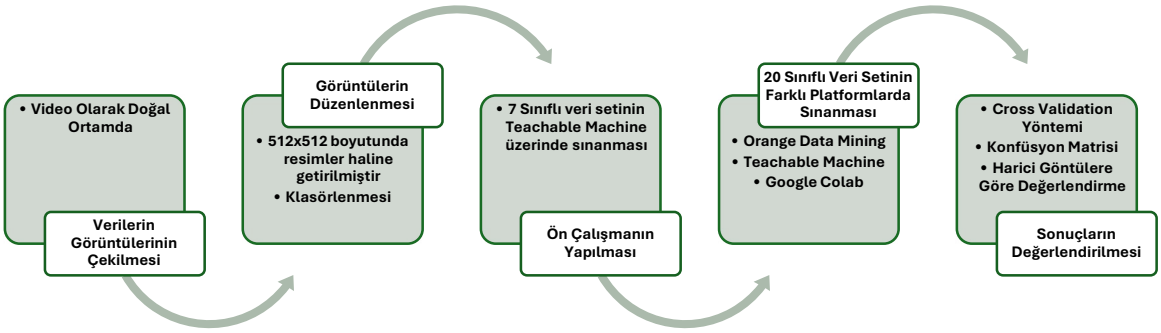


Figure 1 Overall Workflow of the Study

For this research, an image dataset comprising 20 different classes from 18 plant species was created. The dataset includes leaf images of commonly cultivated fruits and vegetables in Türkiye. High-resolution images were captured using a mobile phone equipped with an advanced camera. Separate video recordings were taken for different leaves belonging to each plant species. The raw footage was recorded at 1920×1080 resolution with a 16:9 aspect ratio and subsequently cropped to 512×512 pixels. As a result, the dataset consists of 20 classes and 20,985 images, each with a resolution of 512×512 pixels. Each class contains approximately 1,000 images. Figure 2 presents sample images from each class in the dataset.

Figure 2. Sample Images from the Dataset

As shown in Figure 2, the leaf images were collected under natural lighting and in a natural environment.

A preliminary evaluation was conducted as part of the study. Seven different classes were initially created, and data were uploaded to Teachable Machine. The model was trained for 50 steps and then tested using both webcam input and single images. An example detection is illustrated in Figure 3.

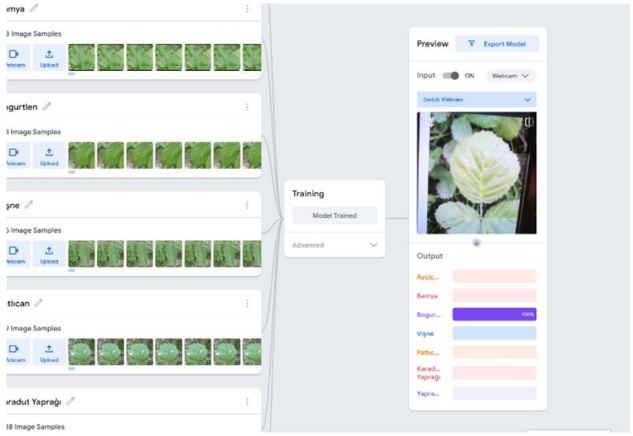


Figure 3. Detection of a Blackberry Leaf

Figure 3 demonstrates the testing of the webcam-trained model. A blackberry image displayed on a mobile phone was shown to the webcam, and the trained model successfully identified it with 100% accuracy. Different leaf types were also tested, and the model generally produced correct results. Figure 4 shows an example of successful detection from a single image.

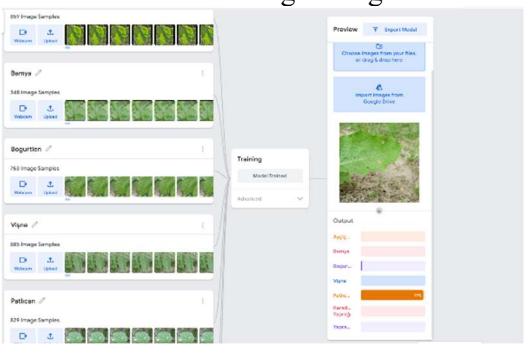


Figure 4. Correct Detection of an Eggplant Leaf

Figure 5 illustrates the detection results when no leaf is present, which the model classifies under the “Yaprakyok” (No Leaf) category.

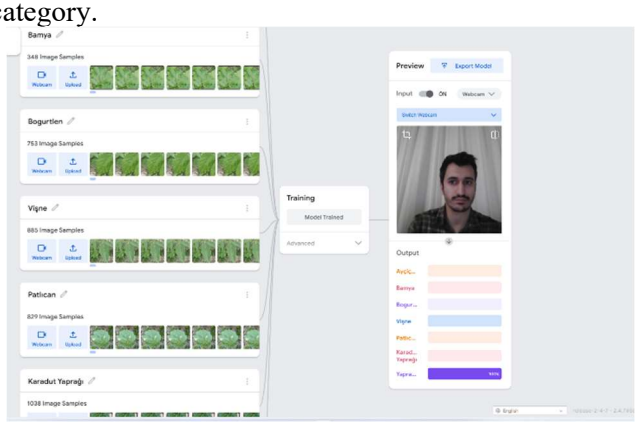


Figure 5. Detection When No Leaf Is Present (Yaprakyok)

As shown in Figure 5, the model correctly identifies cases where no leaf is present by assigning the label “Yaprakyok.” The preliminary results were promising, and following the positive outcomes, it was decided to proceed with training on all 20 classes.

For the training of the 20 classes, various algorithms across different platforms were employed. The Orange software was selected first due to its ease of use. Orange is an open-source data visualization and analysis tool used for data mining. It provides visual programming tools that allow users to explore and interpret complex datasets. With its drag-and-drop interface, Orange enables a wide range of data mining tasks that can be performed without programming knowledge.

Key features of Orange include data visualization, classification, regression, clustering, dimensionality reduction, and numerous machine learning algorithms. Its user-friendly interface makes it accessible to researchers, students, and industry professionals. Being Python-based and open-source, it allows customization and the use of community-developed add-ons.

A classification model for the 20 classes was created within Orange. The model framework is shown in Figure 6.

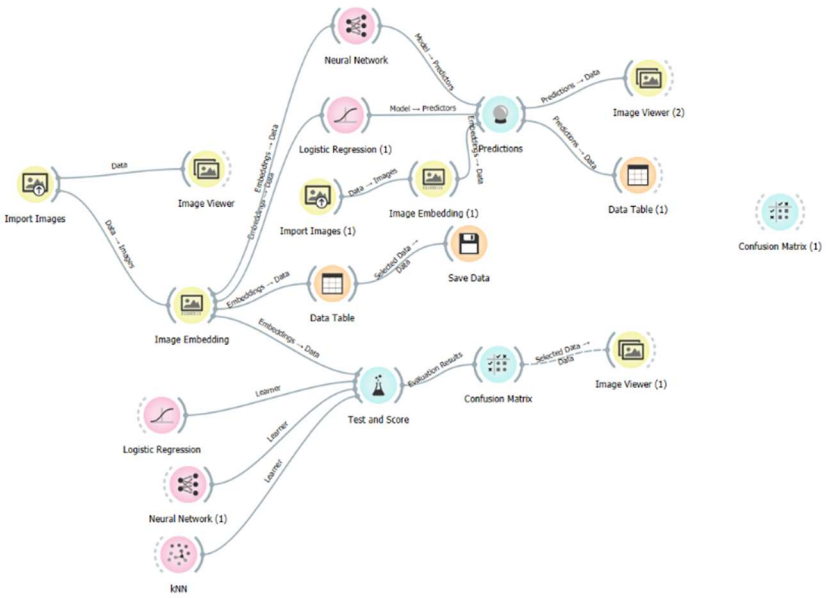


Figure 6. Classification Model in Orange

As seen in Figure 6, the Image Embedding widget includes multiple deep learning algorithms used for feature extraction. Orange provides seven different deep learning methods; among these, SqueezeNet can be used locally, while the others are downloaded via the internet. SqueezeNet was used as the primary method. Each image is transformed into 1,000 extracted features. Figure 7 displays the deep learning methods available within Orange.

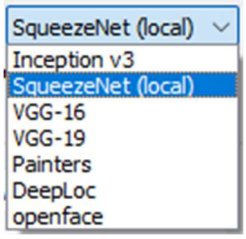


Figure 7. Deep Learning Methods in Orange

Following feature extraction with deep learning algorithms, three classification methods were applied: Logistic Regression, Neural Network, and KNN.

Logistic Regression is a widely used statistical model for classification problems. Although commonly applied to binary classification, it can be extended to multiclass tasks. Logistic Regression estimates the probability distribution of the dependent variable using the sigmoid function, transforming linear combinations into values between [0,1]. The model is trained using optimization techniques such as maximum likelihood or gradient descent. Its major advantages include interpretability, fast training, and low computational cost. However, it is limited in modeling nonlinear relationships and may be insufficient for complex datasets.

K-Nearest Neighbors (KNN) is a simple yet powerful machine learning algorithm used for classification and regression. The fundamental principle is that the class or value of a data point is predicted based on the majority class of its nearest neighbors. The parameter *k* represents the number of neighbors considered. KNN is effective for small and medium-sized datasets and is widely used in pattern recognition, medical diagnosis, speech processing, and image analysis. Its advantages include

its simplicity and training-free nature, while its disadvantages include performance degradation in high-dimensional spaces, sensitivity to outliers, and difficulty in selecting an optimal value for k [11].

In the study, these three classification algorithms were evaluated using 10-fold cross-validation within the Test & Score widget. The same procedure was repeated for the different deep learning feature extractors. Detailed results are presented in the Discussion and Conclusion section.

Since the preliminary experiment with seven classes yielded positive outcomes, the 20-class model was also trained using Teachable Machine. Due to its intuitive interface and fast processing capabilities, Teachable Machine is particularly suitable for image classification tasks. Separate classes were created for each leaf/disease category, and images from the dataset were uploaded accordingly. Figure 8 illustrates the creation of classes in Teachable Machine.

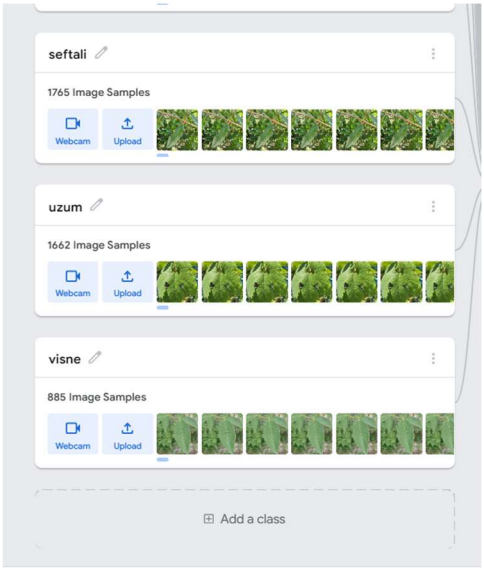


Figure 8. Adding Classes to Teachable Machine

After all classes were added, the training phase commenced. Training was performed for 50 epochs with a batch size of 16 and a learning rate of 0.001. The training parameters are shown in Figure 9.

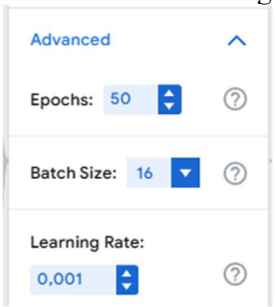


Figure 9. Training Parameters in Teachable Machine

Training took approximately 15 minutes and was conducted on Teachable Machine's cloud servers. After training, the model could be tested in two ways: by uploading files or using the webcam. In both methods, various leaf types retrieved online were used to evaluate performance. Figure 10 demonstrates the testing of the trained model on the same platform.

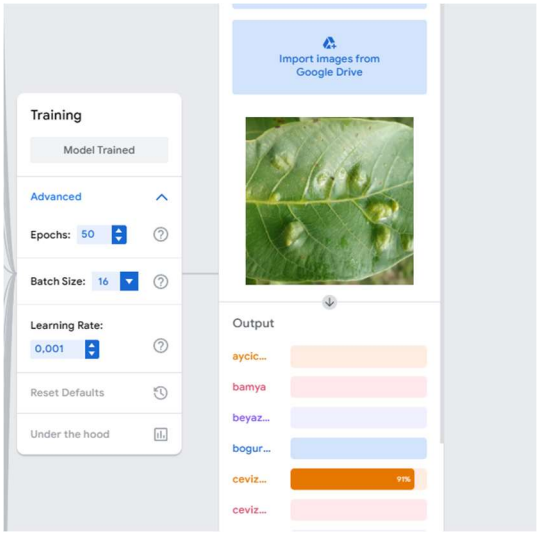


Figure 10. Testing the Model on Teachable Machine

More detailed results are discussed in the Discussion and Conclusion section.

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, the dataset was evaluated on two different platforms using a wide range of deep learning methods and classification algorithms. The results obtained from these evaluations are presented in this section.

First, a data classification model was constructed using the Orange Data Mining software. Seven different deep learning algorithms were tested in combination with three classification methods, yielding a total of 21 results. The outputs were recorded through screenshots and summarized in tabular form.

Since SqueezeNet operates locally, it was evaluated first using all three classification methods. The results obtained are shown in Figure 11.

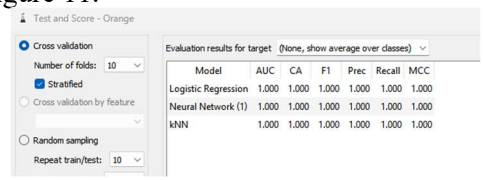


Figure 11 – Results According to Classification Methods

As illustrated in Figure 10, cross-validation was employed as the evaluation method. All classification algorithms produced values of 1.0 across the performance metrics. Figure 12 presents the confusion matrix obtained using Logistic Regression.

Figure 12 – Confusion Matrix Obtained with Logistic Regression

Figure 13 displays the confusion matrix for the Neural Network classifier.

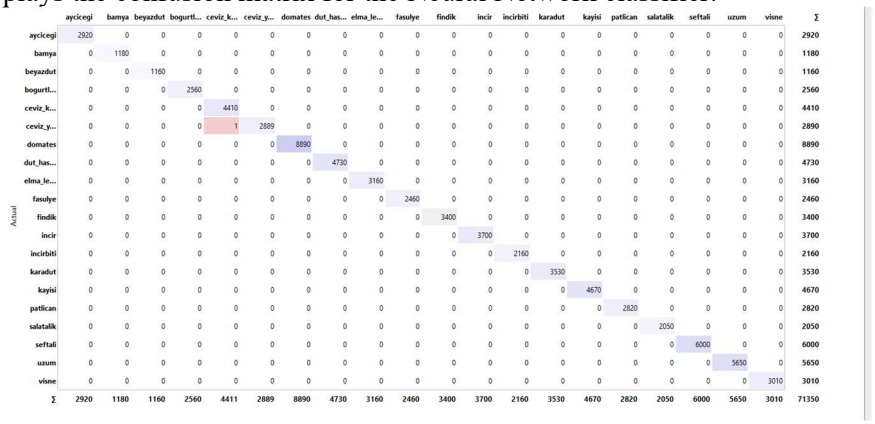


Figure 13 – Confusion Matrix Obtained with the Neural Network Classifier

Figure 14 presents the confusion matrix obtained using the K-Nearest Neighbors (KNN) classifier.

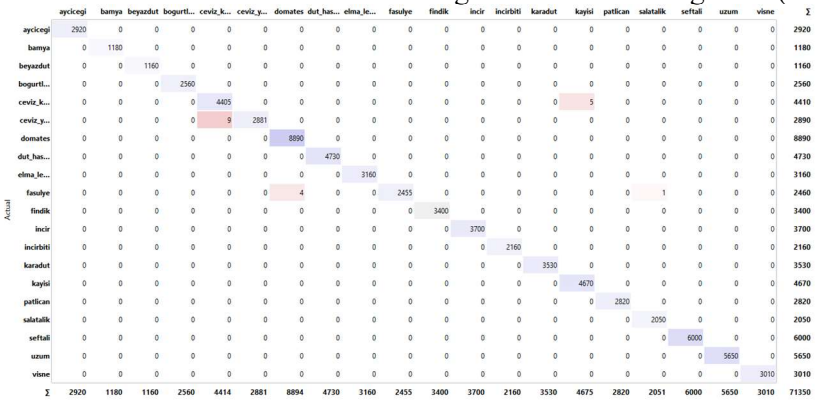


Figure 14 – Results of the KNN (K-Nearest Neighbors) Classification Method

An examination of Figures 12, 13, and 14 indicates that the developed approach is capable of performing classification with exceptionally high accuracy.

The DeepLoc deep learning algorithm was also applied within the Orange Data Mining environment.

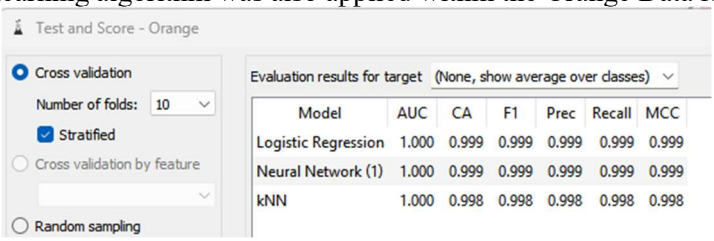


Figure 15 – Results Obtained with the DeepLoc Algorithm

Figure 16 – Confusion Matrix for the KNN Classifier Using DeepLoc Features

Figure 17 – Confusion Matrix for the Logistic Regression Classifier Using DeepLoc Features

Figure 18 – Confusion Matrix for the Neural Network Classifier Using DeepLoc Features

The remaining five deep learning algorithms available in Orange were also applied, producing results similar to those of the previous models.

A preliminary study using seven classes had previously been conducted on Teachable Machine, and due to the positive outcomes, training was repeated with all 20 classes. The classification was performed using 50 epochs, a batch size of 16, and a learning rate of 0.001. The loss and accuracy curves for the resulting model are presented in Figure 19.

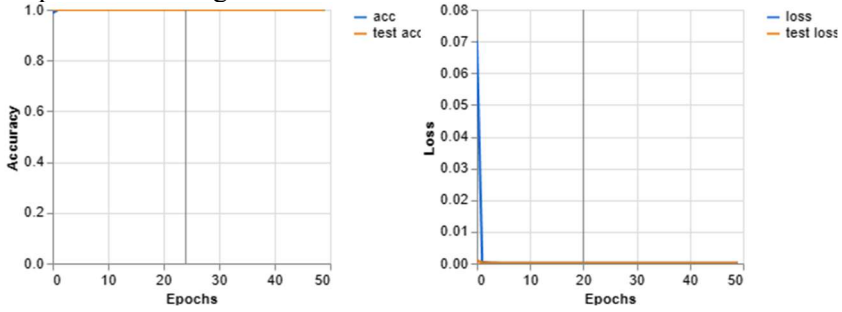


Figure 19 – Accuracy and Loss Curves

As shown in Figure 19, the loss value decreased from 0.07 at the beginning of training to 0.00 at the end. The accuracy value reached 1.0. The confusion matrix obtained after training is provided in Figure 20.

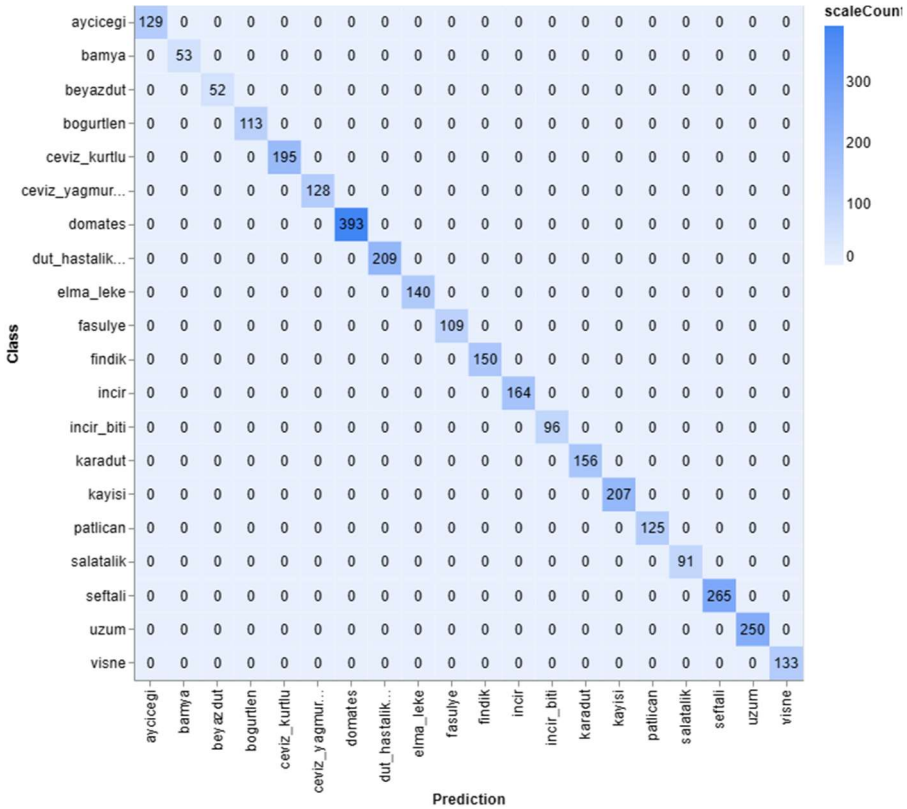


Figure 20 – Confusion Matrix of the Model Trained on Teachable Machine

As seen in Figure 20, the test data from all classes were classified correctly. However, these results were obtained using test samples drawn from the same dataset as the training samples. Although the test images were not included in training, they share similar conditions, lighting, and structure. Therefore,

real-world evaluation is more appropriate for assessing performance. For this reason, the model was tested both through file uploads and via webcam input.

Figure 21 shows the results obtained when testing the model using file uploads.

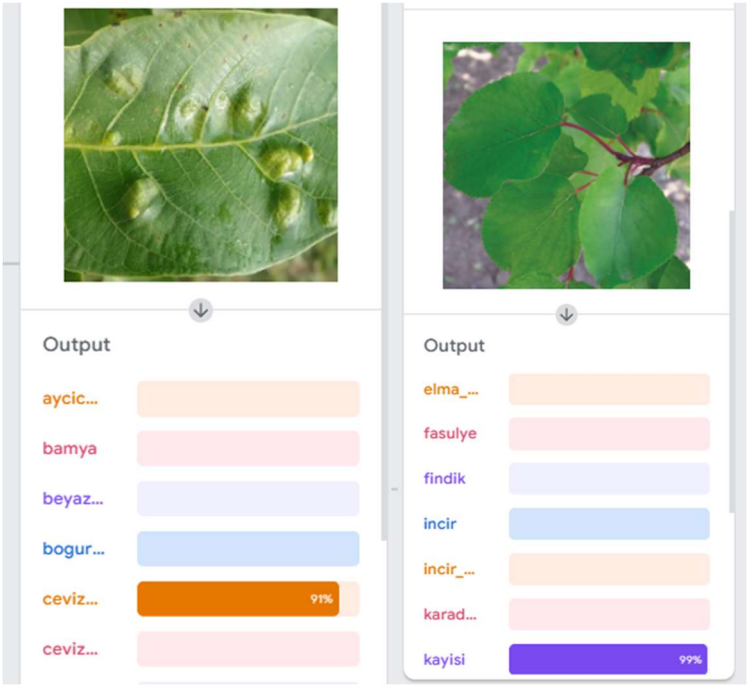


Figure 21 – Results Obtained from File-Based Testing

As shown in Figure 21, two images representing different classes were tested. The first image— a walnut leaf infected with pests—was classified as walnut_infested with 91% confidence. The second image—an apricot leaf—was classified as apricot with 99% confidence. Webcam-based testing was also conducted. Figure 16 presents the results from webcam evaluation.

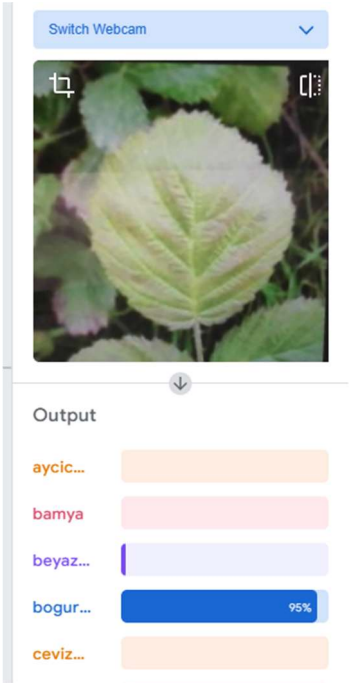


Figure 22 – Results Obtained from Webcam Testing

As seen in Figure 22, a blackberry leaf displayed on a mobile phone screen was shown to the webcam, and the model classified it as a blackberry leaf with 95% confidence. The model was observed to run at approximately 10 FPS during webcam testing. It was also observed that when no leaf was present, the model occasionally assigned low-confidence predictions to various classes.

Furthermore, the model produced misclassifications in certain cases. Examples of misclassified images are given in Figure 23.

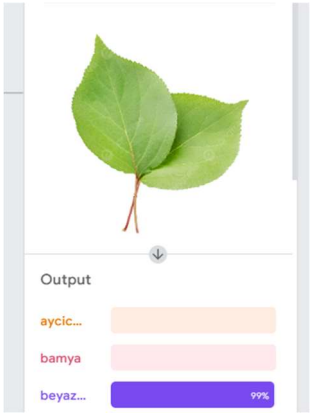


Figure 23 – Examples of Misclassified Images

The image shown in Figure 17 belongs to an apricot leaf, yet the model classified it as white mulberry with 99% confidence. This misclassification can be attributed to the morphological similarity between apricot and white mulberry leaves in single-leaf images. A sample white mulberry leaf image is shown in Figure 24.

Figure 24 – Sample Image from the White Mulberry Class

The resulting model was exported as a TFLite file for integration into a mobile application.

When the overall results and the developed model are evaluated, it can be concluded that a highly efficient dataset was constructed, based on the cross-validation outcomes obtained from the Orange data mining platform. As the initial evaluations were insufficient for comprehensive model assessment, the dataset was also trained on Teachable Machine, resulting in a model with high accuracy and low loss values. The confusion matrix showed no misclassifications.

To further support these findings, additional external images not included in the dataset were tested, and the model produced highly accurate predictions for these images as well. All these results indicate that a successful and robust dataset was created.

Additionally, the dataset can be further improved by incorporating images captured under different weather and lighting conditions.

REFERENCES

[1] TOB, "AGRICULTURAL GDP AND SHARE OF AGRICULTURE AT CURRENT PRICES," ed. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023.

[2] TurkStats, "City/district center, town/village population and annual population growth rate by province, 2021, 2022," ed. TUİK: TUİK, 2023.

[3] "Fresh Fruit and Vegetable Sector Report," Ministry of Trade: Republic of Türkiye, Ministry of Trade: Republic of Türkiye, 2023. [Online]. Available: https://ticaret.gov.tr/data/5b8700a513b8761450e18d81/Ya%C5%9F%20Meyve%20ve%20Sebze.pdf

[4] C. Bravo, D. Moshou, J. West, A. McCartney, and H. Ramon, "Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance," *Biosystems Engineering,* vol. 84, no. 2, pp. 137-145, 2003.

[5] S. Kumar and R. Kaur, "Plant disease detection using image processing-a review," *International Journal of Computer Applications,* vol. 124, no. 16, 2015.

[6] K. P. Ferentinos, "Deep learning models for plant disease detection and diagnosis," *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 145, pp. 311-318, 2018.

[7] S. P. Mohanty, D. P. Hughes, and M. Salathé, "Using deep learning for image-based plant disease detection," *Frontiers in plant science,* vol. 7, p. 1419, 2016.

[8] M. Mustafa, Z. Husin, W. Tan, M. Mavi, and R. Farook, "Development of automated hybrid intelligent system for herbs plant classification and early herbs plant disease detection," *Neural Computing and Applications,* vol. 32, no. 15, pp. 11419-11441, 2020.

[9] T. N. Tete and S. Kamlu, "Detection of plant disease using threshold, k-mean cluster and ann algorithm," in *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2017: IEEE, pp. 523-526.

[10] P. Moghadam, D. Ward, E. Goan, S. Jayawardena, P. Sikka, and E. Hernandez, "Plant disease detection using hyperspectral imaging," in *2017 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, 2017: IEEE, pp. 1-8.

[11] J. Han, J. Pei, and H. Tong, *Data mining: concepts and techniques*. Morgan kaufmann, 2022.

The Past, Present, and Future of Radar and Electronic Warfare Technology

Abdullah GÜÇLÜ[1], Nurettin DOĞAN[2*]

1Department of Defence Technologies, Institute of Science, Selçuk UNIVERSITY, Konya 42250, ORCID: 0009 0002 2040 3969
2Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Selçuk UNIVERSITY, Konya 42250, Türkiye ORCID: 0000 0002 8267 8469

[*](nurettin.dogan@selcuk.edu.tr)

Abstract – This study provides a comprehensive examination of the past, present, and future of radar technology by conceptualizing radar not as a single, independent sensing device but as an adaptive, multilayered electromagnetic system fundamentally shaped by its continuous interaction with electronic warfare. From its scientific origins in electromagnetic theory through its operational maturation during World War II and the signal-processing revolution of the Cold War, radar has evolved in direct response to increasingly sophisticated ECM threats; in parallel, advanced ECCM techniques emerged, ultimately forming the foundations of modern architectures such as AESA, MIMO, passive, and cognitive radar systems. The study demonstrates that DRFM-based deception, wideband noise jamming, low-observability technologies, and AI-enabled electronic warfare have collectively forced radar systems to develop capabilities such as frequency agility, adaptive beam shaping, waveform diversity, low-probability-of-intercept (LPI) strategies, environmental memory, and real-time optimization. Within this co-evolutionary dynamic, electronic warfare does not operate as an isolated domain but manifests as a set of mutually reinforcing disciplines that continuously reshape radar design across physical, signal-processing, system, and cognitive layers. The study also examines emerging technologies—including cognitive radar, quantum sensing, and AI-driven electronic attack and protection—revealing that future radar–EW competition will be governed not by raw spectral power but by algorithmic adaptability, cooperative sensing, and network-centric electromagnetic ecosystems. Overall, the findings indicate that the trajectory of radar technology cannot be understood independently of electronic warfare pressures and that radar's future will be defined by increasingly intelligent, autonomous, and integrated electromagnetic architectures.

Keywords – Radar, EW, ECM, ESM, ECCM, DRF

Introduction

Although radar technology emerged in the first half of the twentieth century as a relatively simple analog system designed to detect targets through the propagation and reflection of electromagnetic waves, it has since evolved far beyond the boundaries of a conventional physical sensor. Driven by rapidly shifting operational doctrines, dynamic threat environments, and continuously expanding mission requirements, radar systems have transformed into complex electromagnetic entities capable of interpreting their surroundings, discriminating among threats, optimizing their behavior in real time, executing multi-layered mission sets, and maintaining performance even under intense electronic attack. This transformation is not merely the result of increased TECHNICAL capacity; it reflects the unavoidable reality that the electromagnetic spectrum has become one of the most contested and strategically decisive domains of modern warfare [1]. Today's battlespace is an environment in which hundreds of platforms and thousands of sensors, operating across wide frequency bands, compete within the same electromagnetic spectrum. Interactions evolve rapidly across temporal, spatial, and spectral dimensions, while uncertainty is continuously regenerated. Under these conditions, information superiority is determined not only by firepower but also by sensing capability, data-processing efficiency, and the balance between electromagnetic stealth and resilience. Consequently, modern radar systems no longer function solely as target detectors; they serve as essential components for situation awareness, spectral analysis under electronic attack, inter-platform data exchange, survivability enhancement, and support for time-critical decision-making. Radar has therefore assumed the role of a comprehensive "operational decision-support system," far surpassing the traditional sensor paradigm.

A key driver of this evolution is the dramatic increase in electronic attack sophistication. The ability of DRFM-based deception systems to generate high-fidelity false signals, the use of wideband noise jammers to manipulate radar decision mechanisms through spectral masking, the increasingly low RCS characteristics of stealth platforms, and advances in electronic support measures (ESM) capable of precisely analyzing radar emissions, have rendered the classical design philosophy of "more power, better receiver sensitivity" insufficient. Modern radar design must instead address multidimensional electronic threats through frequency agility, spatial adaptivity, waveform diversity, low-probability-of-intercept characteristics, cognitive responsiveness, and mission-oriented optimization [1].

Thus, radar technology has never been a static engineering discipline; it has evolved in constant interaction with electronic warfare. Each new ECM capability has forced radar systems to reinvent themselves, while every new ECCM measure has expanded the architecture and operational flexibility of radar. Frequency agility, PRF diversity, pulse compression, adaptive beamforming, sidelobe cancellation, monopulse angle tracking, clutter modeling, and LPI techniques—all foundational elements of modern radar engineering—are direct responses to ECM advancements. In turn, ECM systems have continuously adapted, producing more sophisticated attack methods. This reciprocal dynamic constitutes one of the most compelling examples of "technological co-evolution" in contemporary defense science [2].

Radar's emerging identity as a "spectral actor" is further reinforced by the shift toward network-centric operations. Radar systems are no longer isolated sensors but nodes within distributed sensor networks that collectively generate a unified electromagnetic operating picture. By fusing data from other radars, ESM receivers, passive sensors, optical systems, and communication networks, modern radars contribute to coordinated mission planning, spectrum continuity, task allocation, and autonomous decision-making across platforms.

Understanding the evolution of radar technology is therefore both a historical necessity and a forward-looking analytical imperative. The classical radars of the past laid the foundation for today's multifunctional AESA and cognitive radar architectures, while current technological trends point toward future generations of quantum radars, autonomous sensing swarms, AI-enabled electronic attack and protection systems, and fully adaptive spectral ecosystems.

In conclusion, the development of radar technology is not solely the product of scientific innovation; it is the outcome of a continuous struggle for survival against electronic attack, a competition for electromagnetic dominance, and a strategic requirement imposed by information-centric modern warfare. For these reasons, radar is no longer merely a sensor—it is a "living" electromagnetic system, perpetually evolving under the pressure of electronic warfare, empowered by cognitive capabilities, and serving as a central component of multi-platform operations.

MATERIALS AND METHOD

This study adopts a non-experimental, theoretical, and integrative research methodology to examine the evolution of radar technology within the dynamic radar–ECM–ECCM interaction cycle. The method combines an analytical review of the historical and TECHNICAL progression from electromagnetic theory to modern cognitive and AI-enabled radar architectures with mathematical and signal-processing–based comparisons of contemporary systems such as AESA, MIMO, passive, and cognitive radars, focusing on their behavior under electronic attack. ECM and ECCM are treated not as isolated techniques but as mutually adaptive cycles that continuously reshape radar system design, and the study employs an interdisciplinary synthesis integrating electromagnetics, digital signal processing, control theory, information theory, and artificial intelligence. A systematic review of foundational radar

literature, modern electronic warfare studies, and emerging research on cognitive and quantum radar provides the empirical foundation for assessing how radar technologies evolve under persistent EW pressure and how future systems are likely to transition toward network-centric, multi-platform, learning-based electromagnetic architectures.

Historical Foundations of Radar Technology: The Intersection of Physics, Warfare, and Technological Innovation

The historical evolution of radar technology is often portrayed as the natural outcome of applying electromagnetic theory to military needs; however, the emergence of radar was in fact shaped by a unique and multifaceted convergence of factors—conceptual advances in physical sciences, the maturation of industrial production capabilities, the imperatives of military competition, the rapid development of electronic engineering, and the innovation pressure generated by wartime conditions. In the nineteenth century, James Clerk Maxwell mathematically predicted the existence of electromagnetic waves, and Heinrich Hertz subsequently verified them experimentally, laying the physical foundation upon which radar would later be built. Although the military use of electromagnetic waves did not yet possess a defined conceptual framework at that time, this scientific breakthrough provided the theoretical basis for the future of radar and articulated the physical principles underlying the radiation–reflection–measurement triad that would ultimately constitute the core of radar engineering [3].

In the first half of the twentieth century, the ability to generate and amplify electromagnetic waves with greater stability and power accelerated the advancement of radar. The invention of the cavity magnetron enabled the production of high-power microwave frequencies, allowing significant improvements in radar range, resolution, and accuracy. This technological leap occurred at a strategically critical moment. With the onset of World War II, radar shifted from a scientific curiosity to an operational necessity. Britain's Chain Home early-warning network, Germany's Freya systems, and the Allies' magnetron-based microwave radars fundamentally reshaped the tactical landscape. These systems provided unprecedented capabilities in detecting enemy platforms, improving the speed and accuracy of command-and-control processes, and optimizing the timing of air defense operations [4].

Yet the rapid advantage radar conferred on the battlefield also compelled adversaries to develop methods to degrade or deny radar effectiveness, marking the emergence of the first electronic countermeasures (ECM). Techniques such as chaff—clouds of metallic strips dispersed into the atmosphere—created extensive false reflections that obscured genuine targets. Likewise, low-power noise jammers eroded the signal-processing capacity of radar receivers, diminishing the visibility of echo signals and substantially degrading detection performance. These early ECM techniques demonstrated the inherent vulnerability of radar systems, revealing the extent to which unwanted sidelobe reception and spectral interference could compromise radar performance.

In response, radar engineering evolved rapidly. By the late 1940s and early 1950s, radar design began to shift from merely improving range and sensitivity toward developing mechanisms for operational survival under electronic attack. New antenna geometries were introduced to suppress sidelobes, MTI (Moving Target Indication) techniques were developed to separate moving targets from stationary clutter using Doppler processing, frequency-agile transmitters were implemented to prevent predictability, and increasingly complex waveforms were designed to mitigate the effects of noise jamming. This marked the first period in which radar engineering explicitly recognized the necessity of countering ECM, leading to the emergence of Electronic Counter-Countermeasures (ECCM) as a distinct field [5].

Throughout the Cold War, the radar–EW contest became progressively more technical, systematic, and strategically integrated. The development of DRFM-based deception jammers enabled not only the suppression of radar signals but also their high-fidelity replication and manipulation. This represented a watershed moment, as DRFM deception constituted a direct attack on the fundamental measurement principles of radar rather than a simple noise-based interference. In response, radar engineers were compelled to innovate: more advanced waveforms, adaptive filtering, monopulse angle estimation, sophisticated clutter modeling, and digital signal processing–based ECCM methods were

introduced. Consequently, radar evolved into a more advanced system across physical (antenna design, frequency planning, output power), signal-processing (pulse compression, Doppler filtering, CFAR algorithms), and architectural levels (multi-mode operation, frequency agility, adaptive beamforming) [6].

These developments demonstrate that the historical progression of radar cannot be explained by a linear sequence of engineering innovations. Instead, radar has evolved through a continuous and reciprocal cycle of adaptation driven by electronic warfare. Each improvement in radar capability has inspired new ECM strategies, and each new ECM technique has compelled radar engineers to devise increasingly sophisticated ECCM solutions. As a result, radar technology has advanced not linearly but cyclically, competitively, and under persistent operational pressure.

In sum, the historical foundations of radar reveal a technology that began with the application of electromagnetic wave theory but quickly transformed—under the influence of electronic warfare and evolving military doctrines—into a complex, multilayered, and continuously renewed technological ecosystem. Radar's true developmental trajectory has been shaped far more by the engineering struggle against electronic threats than by scientific curiosity alone, and this struggle continues to serve as the primary catalyst for innovation in radar systems today.

Cold War Era: The Signal Processing Revolution and the Rise of DRFM-Based Deception Systems

The period between 1950 and 1980 marks a decisive phase in which radar and electronic warfare (EW) technologies underwent profound transformation—not only in terms of hardware capacity but also through advances in signal processing, mathematical modeling, and the formalization of radar–ECM–ECCM interactions. During this era, the determining factors of radar performance expanded far beyond classical physical parameters such as antenna gain or transmitter power; rapid progress in computational technologies enabled radar signals to be mathematically analyzed, transformed, and interpreted, effectively integrating digital signal processing (DSP) into the core of radar system design. As a result, radar engineering evolved from a predominantly analog RF discipline into a complex systems-engineering problem grounded in digital computation [6].

One of the most significant breakthroughs of this period was the maturation of pulse compression techniques. Pulse compression enabled radar systems to transmit long-duration, high-energy pulses while achieving narrow, high-resolution pulses at the receiver, thereby optimizing two historically conflicting parameters—range and resolution—simultaneously. Chirp (LFM) modulation, Barker codes, and phase-coded modulation schemes enhanced radar SNR performance and increased resilience against jamming environments. Among these, chirp modulation became a foundational element of radar waveform design, as its linearly varying frequency facilitated efficient matched filtering, improved signal detectability, and preserved range resolution even under heavy jamming [7].

Parallel to these advances, the development of FFT-based Doppler processing enabled radars to estimate target velocity with unprecedented accuracy, making it possible to resolve targets in both range and Doppler domains. This innovation dramatically improved radar capability in cluttered environments, particularly for detecting moving targets embedded within strong ground reflections. Doppler filter banks laid the groundwork for the emergence of pulse-Doppler radars and became a cornerstone of modern processing chains optimized for motion-sensitive detection [7].

As radar systems became more capable, electronic warfare technologies escalated accordingly. By the height of the Cold War, EW had evolved far beyond simple noise jamming; it transformed into a sophisticated discipline capable of sampling, storing, modifying, and retransmitting radar pulses in real time—directly attacking the radar's underlying measurement principles. In this context, the emergence of Digital Radio Frequency Memory (DRFM) deception systems represents one of the most consequential leaps in the history of radar–EW competition [8].

DRFM technology allows the jammer to sample an incoming radar pulse with high phase coherence, store it, and retransmit it after applying precise delays, frequency shifts, or amplitude modifications. Unlike noise jamming, DRFM deception produces signals that are often indistinguishable from the radar's true echoes. Consequently, DRFM-based deception attacks systematically undermine radar measurement accuracy and can severely distort tracking behavior. Techniques such as Range Gate

Pull-Off (RGPO) and Velocity Gate Pull-Off (VGPO) shift the radar's tracking gates away from the true target by gradually introducing range or Doppler discrepancies. RGPO disrupts range estimation, while VGPO destabilizes Doppler-based velocity measurements; when used together, they can render radar tracking loops almost entirely ineffective [8].

The sophistication of DRFM deception required equally advanced ECCM strategies. One of the most influential ECCM developments of this period was monopulse angle tracking, which computes target angle using simultaneous amplitude and/or phase comparisons from multiple antenna channels within a single pulse. Because DRFM-based false targets typically lack the spatial coherency required to generate consistent angle information, monopulse techniques can reject such deception attempts by exposing their angular inconsistencies [9].

Another essential ECCM method was frequency agility, wherein each radar pulse is transmitted at a different frequency, complicating a jammer's ability to predict or coherently replicate the radar's waveform. By denying DRFM systems the spectral stability they require, frequency agility significantly reduces the effectiveness of coherent deception. Additionally, sidelobe reduction and refined antenna geometries diminished jammer coupling into the receiver, blocking many interference sources before they reached the signal processing stage [10].

One of the most transformative innovations of the era was the rise of adaptive beamforming. By dynamically adjusting the amplitude and phase weights across phased-array antennas, adaptive beamforming allowed radars to place deep nulls in the direction of a jammer while maintaining maximum gain toward the target. This enabled radars to maintain tracking and detection performance even in the presence of sophisticated jamming sources [10].

Taken together, the developments of the Cold War demonstrate that the radar–ECM–ECCM cycle was not a linear technological race but a tightly coupled and continuously evolving adaptive system. Each new ECM strategy forced a corresponding redesign of radar architecture, while each radar advancement compelled EW systems to adopt more refined and mathematically grounded deception methods. This reciprocal evolution established the theoretical and technological foundation for today's modern radar capabilities—particularly AESA architectures, MIMO radar frameworks, LPI waveforms, cognitive radar principles, and AI-enabled ECCM methodologies.

APPLICATION

Modern Radar Technologies: Spectral Awareness, Adaptability, and Cooperative Sensing

Modern radar technologies have diverged radically from the mechanically scanned, single-frequency, and functionally limited architectures that dominated the mid-20th century. Contemporary radar systems have evolved into multi-layered, adaptive, and autonomous electromagnetic ecosystems shaped by four converging technological pillars: the electronic agility and geometric flexibility of AESA architectures, the high spatial degrees of freedom provided by MIMO radar, the learning-based adaptive behavior of cognitive radar systems, and the increasingly algorithmic threat environment generated by artificial-intelligence-enabled electronic warfare (EW). Within this new paradigm, radar no longer performs merely detection and tracking; it generates spectral awareness, designs defensive strategies against electronic attack, fuses multisensor information, and executes real-time mission optimization. Thus, the modern radar has transitioned from a simple emitter–receiver device into a strategic decision-making entity within the electromagnetic battlespace.

At the center of this transformation lies the Active Electronically Scanned Array (AESA) architecture. Composed of hundreds or thousands of independently controlled transmit–receive modules, AESA antennas can reconfigure beam direction, beamwidth, polarization, pulse-repetition structure, and waveform modulation on microsecond time scales. This allows simultaneous execution of search, tracking, classification, imaging, and electronic protection tasks. AESA radars not only offer superior resolution and dynamic responsiveness but also generate critical ECM-resilient behaviors: adaptive sidelobe suppression, spatial null steering, frequency and PRF agility, jammer detection, and autonomous electronic protection responses. The ability to manipulate phase centers independently

further enables sophisticated adaptive beamforming techniques, significantly reducing the effectiveness of DRFM-based deception systems [11].

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) radar, by contrast, revolutionizes radar spatial resolution through its ability to create a virtual aperture far exceeding the physical bounds of the antenna array. Through multiple transmit–multiple receive signaling schemes, MIMO systems achieve high angular resolution, enhanced multi-target discrimination, precise jammer geolocation, and superior clutter-jammer suppression via space–time adaptive processing (STAP). Because DRFM deception cannot fully replicate the complex spatio-temporal structure of MIMO waveforms, MIMO radars inherently possess strong resilience to coherent deception. Furthermore, the increased degrees of freedom provided by MIMO architectures form an ideal computational substrate for cognitive radar optimization [12].

Passive radar represents [13] a fundamentally different sensing paradigm. By exploiting opportunistic illuminators such as FM broadcasts, DVB-T, or LTE signals, passive radar systems require no active transmission and thus exhibit extremely low detectability. Their bistatic and multistatic geometries offer unique advantages in localizing hostile emitters and tracking low-observability targets. Passive radar has become a critical component for persistent sensing in dense EW environments and for counter-LPI (Low Probability of Intercept) surveillance [14].

Cognitive radar systems constitute the most adaptive and learning-oriented tier of modern radar architectures. Operating within a closed cognitive loop—perception → evaluation → learning → decision → behavior optimization → renewed perception—these radars continuously model environmental variations, generate environmental memory structures (e.g., EDDB), and optimize waveform parameters in real time. Through adaptive CFAR, predictive tracking algorithms, and threat-driven decision processes, cognitive radars do not merely respond to adversarial actions; they anticipate them and proactively optimize their operational behavior. Integration with passive sensors, jammer classification algorithms, and autonomous ECCM generation enables cognitive radars to function as intelligent agents within the electromagnetic battlespace [15].

Meanwhile, electronic warfare has undergone a parallel transformation. AI-enabled EW systems no longer limit themselves to attacking radar waveforms; instead, they target the internal decision logic of radars themselves. These systems learn radar waveform generation patterns, craft adversarial perturbations, manipulate Doppler filter banks, deceive CFAR thresholding, and disrupt tracking algorithms by injecting statistically plausible false information [16]. At a more advanced level, intelligent EW platforms analyze and learn radar ECCM behaviors, enabling the construction of anti-ECCM strategies specifically designed to penetrate cognitive defenses. Modern EW has thus evolved from a power-centric jamming doctrine into a highly refined form of algorithmic warfare, aimed at infiltrating and destabilizing the radar's cognitive cycle.

Collectively, these technological developments transform modern radars from passive measurement devices into intelligent, multi-layered, strategy-producing electromagnetic systems. Key capabilities of today's radar architectures include:

- Low-probability-of-intercept (LPI) waveforms and reduced detectability,
- Wideband modulation enabling high-resolution sensing,
- Multi-beam, multi-channel simultaneous processing,
- Spectral awareness and agile spectrum management,
- Multi-sensor fusion (ESM, SAR, EO/IR, RF),
- Autonomous ECCM responses and jammer classification,
- Real-time mission-level optimization,
- Spatio-temporal adaptivity (STAP, DBF),
- Network-centric radar architectures enabling cooperative sensing.

These capabilities collectively redefine radar as a cognitive electromagnetic system—one that perceives, interprets, learns, adapts, and strategizes in direct response to the evolving electromagnetic threat landscape. In the modern battlespace, the radar is no longer a passive sensor but an active decision-support component and a strategic actor within the electromagnetic domain.

The Future of Radar: Cognitive Radar, Quantum Radar, and AI-Enabled Electronic Warfare

Next-generation radar technologies are evolving from reactive sensing instruments into predictive, self-optimizing electromagnetic systems capable of adapting their behavior through continuous learning. Cognitive radar represents the forefront of this transformation: operating through a closed cognitive loop—perception, learning, memory formation, prediction, and behavior optimization—it adjusts its waveform design, processing strategies, and decision logic in real time according to the evolving threat environment. This ability to anticipate rather than merely respond to adversarial actions marks a fundamental shift in radar engineering philosophy.

Parallel to these developments, quantum radar is emerging as a disruptive technology aimed at transcending the physical limitations inherent to classical radar systems. By exploiting quantum entanglement, squeezed states, and quantum metrology, quantum radar seeks to dramatically enhance detection performance against low-RCS targets, reduce susceptibility to classical jamming techniques, and achieve sensitivity levels approaching the quantum limit. Although still in early stages of maturation, quantum illumination–based radars offer the potential for unprecedented resilience in contested electromagnetic environments [17].

Simultaneously, artificial-intelligence-enabled electronic warfare (AI-EW) is reshaping the offense–defense relationship in the electromagnetic spectrum. AI-driven EW systems can autonomously:

- Identify and classify jammer types,
- Analyze and categorize DRFM-generated deceptive signals,
- Select and deploy context-dependent ECCM strategies,
- Predict spectrum usage and adversarial emissions,
- Optimize radar waveform parameters to maximize survivability and detection performance.

These capabilities transform EW from a primarily power-centric discipline into an algorithmic, adaptive, and predictive cyber-electromagnetic activity aimed at challenging even the most advanced cognitive radars.

Looking forward, radar–EW architectures will increasingly move beyond the paradigm of a single autonomous radar platform. The future battlespace will be defined by network-centric, multi-platform, cooperative electromagnetic ecosystems, in which distributed cognitive radars, passive sensors, electronic support systems, and AI-driven EW nodes jointly construct and defend a shared spectral battlespace. This convergence of cognitive processing, quantum sensing, and artificial intelligence marks the beginning of a new era—one in which radar is no longer merely a sensor, but a fully integrated, adaptive, and intelligent actor within the electromagnetic domain.

RESULTS AND DISCUSSION

An examination of nearly a century of radar development reveals a fundamental truth: radar has never evolved solely as a technological endeavor aimed at improving range, resolution, or sensitivity. Rather, its trajectory has been shaped primarily by the relentless pressure of electronic warfare, which has forced radar systems to continuously reinvent themselves, adopt new architectural paradigms in response to emerging threats, protect the integrity of their measurements under hostile conditions, and progressively acquire cognitive characteristics. The driving force behind radar's evolution has therefore not been merely the invention of new hardware or mathematical techniques, but the necessity to survive against increasingly sophisticated electronic attack.

As electronic warfare systems began targeting radar's core measurement processes—range estimation, angle resolution, Doppler analysis, and RCS-based classification—radar engineering was compelled to transcend traditional physical design boundaries and develop a multi-layered defense architecture. This architecture spans antenna geometries, waveform design, adaptive signal processing, data fusion, tracking-loop robustness, and ultimately AI-enabled cognitive ECCM strategies. In this context, the modern radar does not operate merely as a sensor; it functions as an autonomous information-processing system—capable of perceiving its environment, identifying threats, optimizing

its behavior, evaluating its own measurement reliability, switching operational modes dynamically, and even predicting adversarial tactics.

Today, the radar–EW competition is no longer defined by raw spectral power but by algorithmic superiority. As radar systems have become more cognitive, electronic warfare systems have become more algorithmic; and as EW has adopted learning-based attack strategies, radar has responded with increasingly sophisticated AI-driven ECCM. Consequently, the relationship between radar and EW must be understood not as a traditional technological contest, but as a mutual, iterative, and cognitively co-evolving process.

In this sense, radar and electronic warfare are not independent engineering domains but mutually dependent and continuously interacting components of a broader technological ecosystem. Their co-evolution unfolds through four fundamental dynamics:

- As radar advances, ECM advances.
- As ECM advances, ECCM advances.
- As ECCM advances, radar becomes more cognitive.
- As radar becomes more cognitive, EW becomes more algorithmic.

To overcome radar's behavior-driven, predictive, and learning-based protection mechanisms, modern electronic warfare has developed AI-powered offensive strategies capable of decoding radar behavior models, disrupting waveform optimization algorithms, corrupting Doppler and range coherence, and directly targeting radar decision-making loops. The outcome of this escalating interaction is unambiguous:

Radar and electronic warfare form an integrated technological architecture in which each system necessitates the evolution of the other; each becomes more complex, intelligent, adaptive, and autonomous precisely because the other exists.

Without the persistent pressure of electronic warfare, modern radar innovations—cognitive processing, MIMO-based high-resolution sensing, adaptive beamforming, LPI waveforms, AI-driven ECCM, and even quantum-metrology-based radar concepts—would never have emerged. Likewise, without these radar advancements, electronic warfare systems would not have achieved their current capabilities in high-fidelity deception, spectral denial, tracking-loop manipulation, and cognitive offensive operations.

Thus, the past, present, and future of radar technology represent far more than the chronological history of a sensing device. They embody a continuously evolving struggle for electromagnetic dominance, in which technical, tactical, architectural, and cognitive dimensions are tightly interwoven. Radar's evolution is therefore not merely a story of engineering advancement, but the manifestation of an enduring, unavoidable, and reciprocal competition within the electromagnetic battlespace.

REFERENCES

[1] Grant, R., The Radar Game, IRIS Independent Research, North Fort, Virginia, 1998.

[2] Schleher, D.C., Electronic Warfare in the Information Age, Artech House, Norwood, MA, 1999.

[3] Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, 3d ed. McGraw-Hill, New York, 2001.

[4] Richards, M.A., Scheer, J.A., and Holm, W.A., Eds., Principles of Modern Radar, Vol. 1: Basic Principles, SciTech Publishing, Raleigh, NC, 2010.

[5] Rahman, H., Fundamental Principles of Radar, CRC Press, Boca Raton, 2019

[6] Skolnik, M., Ed., Radar Handbook, 2d ed., Chapter 9, Electronic Counter-Countermeasures, McGraw-Hill, New York, 1990.

[7] Stimson, G.W., Introduction to Airborne Radar, 2d ed., Part VIII, Radar in Electronic Warfare, SciTech Publishing, Raleigh, NC, 1998.

[8] Van Brunt, L.B., Applied ECM, vol. 1, EW Engineering, Dunn Loring, VA, 1978.

[9] Zohuri, B., Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology, Springer, Switzerland, 2020.

[10] Neri, F., Introduction to Electronic Defense Systems, 2d ed., SciTech Publishing, Raleigh, NC, 2006.
[11] Sturdivant R., Quan C., Chang E., Systems Engineering of Phased Arrays, Artech House, Norwood, 2019.
[12] Bergin J., Guerci J.R., MIMO Radar Theory and Application, Artech House, Norwood, 2018.
[13] Griffiths H.D., Baker C.J., An Introduction to Passive Radar, Artech House, Norwood, 2019
[14] Pace P.E., Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar, Artech House, Norwood, 2009.
[15] Guerci, J.R., Cognitive Radar The Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach, Artech House, Norwood, MA, 2010.
[16] Martino, D.A., Introduction to Modern EW Systems, Artech House, Norwood, MA, 2012.
[17] Lanzagorta, M., Quantum Radar, Morgan & Claypool, 2011.