



5. KOCATEPE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ÖĞRENCİ SEMPOZYUMU

AFYONKARAHİSAR / 12-14 Mayıs 2026

Yer: Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi



5. KOCATEPE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ÖĞRENCİ SEMPOZYUMU

AFYONKARAHİSAR / 12-14 Mayıs 2026
Yer: Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

TAM METİN BİLDİRİ KİTABI

EDİTÖRLER:

Arş. Gör. Sami Serkan İŞOĞLU
Arş. Gör. Ardan Hüseyin EŞLİK



SEMPOZYUM KURULLARI

ONUR KURULU

Prof. Dr. Mehmet KARAKAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörü

YÜRÜTME KURULU

Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı

Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekan
Yardımcısı

Doç. Dr. Sadık KAĞA

Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekan
Yardımcısı

DÜZENLEME KURULU BAŞKANI

Arş. Gör. Sami Serkan İŞOĞLU

Afyon Kocatepe Üniversitesi



DÜZENLEME KURULU

Doç. Dr. Deniz AKIN ŞAHBAZ	Pamukkale Üniversitesi
Doç. Dr. Rukiye SAYGILI CANLIDİNÇ	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Burcu KALYONCUOĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Dr. Ayşegül TÜRK BAYDIR	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Dr. Nurgül ÖZMEN SÜZME	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Dr. Teslime EKİZ ÜNSAL	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Öğr. Gör. Dr. Oğuzhan ÖZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Abdulgafur ÇAPADIŞ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Ali Kemal AY	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Ardan Hüseyin EŞLİK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Melih ALTAY	Hacettepe Üniversitesi
Arş. Gör. Saliha ÇİFCİ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Arş. Gör. Yasemin ŞAHİN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Erhan Görkem ÖZCAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Görkem Anıl KAÇMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Mustafa Emir CİNGÖZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Şerif KIZGINDEMİR	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fatma ORUÇ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Ahmed YONES	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Hasan AKTAM	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Muhammed Saleck DAHİ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Mine ILGIN	Afyon Kocatepe Üniversitesi



BİLİM KURULU

Prof. Dr. Ahmet YILDIZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Cahit GÜRER	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Çağlar ÖZKAYMAK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Fatih Onur HOCAĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Gökhan GÖRHAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Harun DIRAMAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Halil KUMSAR	Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim BULDUK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim YILMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İrfan Celal ENGİN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail ZORLUER	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Sedat BÜYÜKSAĞIŞ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Levent ÖZCAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK	Süleyman Demirel Üniversitesi
Prof. Dr. Meltem DİLEK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Murat UYSAL	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa YILMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Ramazan ŞEVİK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Uçman ERGÜN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Tamer BAYBURA	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet Haşim YURTTAKAL	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Ali Ekrem ARITAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Alihsan ŞEKERTEKİN	İğdır Üniversitesi
Doç. Dr. Can BAŞARAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Deniz AKIN ŞAHBAZ	Pamukkale Üniversitesi
Doç. Dr. Dilek DEMİRBÜKER KAVAK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Emre AKARSLAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Erkan ÖZKAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi



Doç. Dr. Erman DUMAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Fatih BAYRAM	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Gökhan AKARCA	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Gökhan KÜRKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Gür Emre GÜRAKSIN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet Ali DERELİ	Giresun Üniversitesi
Doç. Dr. Metin BAĞCI	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Muhammed Fatih CAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa YALÇIN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Nizar POLAT	Harran Üniversitesi
Doç. Dr. Oğuzhan ALAGÖZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Saygın ABDİKAN	Hacettepe Üniversitesi
Doç. Dr. Uğur FİDAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Fatih YURAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Aslı KARABAŞOĞLU	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fatih SERTTAŞ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İlayet Hakkı ÇİZMECİ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kerem GENCER	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali UĞUR	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat HİÇYILMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KANIK	Fırat Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Naim KARASEKRETER	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nazan YILMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Gökberk NARİN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Özkan ASLAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Sadık KAĞA	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Senem GÜNER	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Şerife AK	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Tülay ALTAY	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Veli BAŞARAN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Bahadır KOCA	Afyon Kocatepe Üniversitesi



SEMPOZYUM PROGRAMI

	V. KOCATEPE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ÖĞRENCİ SEMPOZYUMU 12-14 MAYIS 2026 AFYONKARAHİSAR SÖZLÜ SUNUM PROGRAMI	
---	--	---

1. GÜN (12 MAYIS 2026 SALI) AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU

10:00	SAYGI DURUŞU İSTİKLAL MARŞI AÇILIŞ KONUŞMALARI Arş. Gör. Sami Serkan İŞOĞLU (V. KOGRENSEM Düzenleme Kurulu Başkanı) Prof. Dr. İsmail ZORLUER (Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı) DAVETLİ KONUŞMACI Doç. Dr. Sadık KAĞA "Fikirden Ürüne"
	ÇAY VE İKRAM ARASI Mühendislik Fakültesi Konferans Salonu Fuaye Alanı
12:00	ÖĞLE ARASI Mühendislik Fakültesi Önünde Yemek İkramı



13:30	PANEL “Mezun Kariyer Günleri”	
	Moderatör Prof. Dr. Uçman Ergün Konuşmacılar Eren Mahmut Kundak Ahmet Saygıner İsmail Kayadibi Aslıhan Şahan	Moderatör Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Gücek Konuşmacılar Özge Eryeşil Dede Soner Celep Yılmaz Merdivenci Zişan Memiş Nurşah Ceran



---SÖZLÜ SUNUM PLANI---

2. GÜN (13 MAYIS 2026 ÇARŞAMBA)

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (101) GIDA MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ
10:00	AFYONKARAHİSAR'DA ÜRETİLEN TOP (ROLL) EKMEKLERİN BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ (OMGM_040) Cafer Medetoğlu, Ayşe Janseli Denizkara, Harun Dıraman
10:15	ET, TAVUK VE BALIK ÜRÜNLERİNİN BİYOAKTİF BİLEŞENLERLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ (OMGM_037) Ayşenur Akdaş, Dilek Demirbükür Kavak, Ramazan Şevik
10:30	OZMOTİK KURUTMANIN MEYVE VE SEBZELERİN KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ (OMGM_038) Dilber Onur, Dilek Demirbükür Kavak
10:45	GIDALARIN MUHAFAZASINDA ORGANİK ASİTLERİN ANTİMİKROBİYAL ETKİ MEKANİZMALARI VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI (OMGM_039) Ayşenur Akdaş, Ramazan Şevik

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (102) BİLGİSAYAR-YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Doç. Dr. Ahmet Haşim YURTTAKAL
10:00	DERİN EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARINDA PERFORMANS, VERİMLİLİK VE AÇIKLANABİLİRLİK: SE-RESNET, MOBILENETV2 VE EFFICIENTNETB0 MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ (OMBM_012) Emir Kahraman, Ahmet Haşim Yurttakal
10:15	ÖĞRENCİ BAŞARISI TAHMİNİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE REGRESYON VE DENGESİZ SINIFLANDIRMA ANALİZİ (OMBM_001) Faruk Akbayrak, Ahmet Haşim Yurttakal
10:30	DERİN ÖĞRENME TABANLI TRAFİK İŞARETİ TANIMA: GTSRB VERİ SETİ ÜZERİNE BİR UYGULAMA (OMBM_018) Ilkhom Tabyldiev, Ahmet Haşim Yurttakal
10:45	OTONOM FİYATLANDIRMA İÇİN HİBRİT BİR YAKLAŞIM: AGENTİC AI VE PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME UYGULAMASI (OMBM_014) Merve Eda Yılmaz, Orhan Altınaydız, Ahmet Haşim Yurttakal, Fatih Özdiç

ÇAY VE İKRAM ARASI

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (101) HARİTA-JEOLOJİ-MADEN MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali UĞUR
11:15	ANNAR SEL ÖNLEME BARAJINDA (UMMAN, SALALAH) MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ SORUNLARI VE ÇÖZÜM YOLLARI (OMJM_57) Mehmet Akıllı, Ahmet Yıldız
11:30	ÇOK ZAMANLI UYDU GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK DEPREM ÖNCESİ VE SONRASI ARAZİ ÖRTÜSÜ DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ: DÜZCE İLİ 1999 DEPREMİ ÖRNEĞİ (OMHM_049) Behiye Yaylakçı, Ömer Gökberk Narin
11:45	GERÇEK ZAMANLI HASSAS NOKTA KONUMLAMA TEKNİĞİNİN (REAL TIME PRECISE POINT POSITIONING-RT-PPP) DOĞRULUĞUN ARAŞTIRILMASI (OMHM_046) Salih Kırılı, İbrahim Tiryakioğlu, Zafer Köse, Mehmet Ali Uğur
12:00	GÖRME ENGELLİLER İÇİN DOKÜNSAL HARİTA TASARIMI VE ÜRETİMİ (OMHM_043) Sedanur Kiyaklı, İbrahim Yılmaz
12:15	ÇİMENTO HAMMADDE SAHALARININ JEOKİMYASAL, MİNERALojİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN KLİNKER KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİ (OMJM_056) Tuğçe Demiralp, Metin Bağcı

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (102) BİLGİSAYAR-YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Doç. Dr. Ahmet Haşim YURTTAKAL
11:15	YOLCU SAYAR (OMBM_010) Yiğit Kıvanç Oral
11:30	AÇIK KAYNAKLI BÜYÜK DİL MODELLERİNİN KOD ÇALIŞMA SÜRESİ TAHMİN BECERİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ (OMYM_009) Yağmur Gül, Fatma Oğuzgüneşli, Caner Balım, Nevzat Olgun
11:45	VERİ ÖN İŞLEME VE HİBRİT ARAAMA OPTİMİZASYONLU RAG MİMARİSİ İLE KURUMSAL BİLGİ ERİŞİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ (OMBM_005) Emirhan Sezgin, Yiğit Civelekoğlu
12:00	IIOT SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA TABANLI VE GERÇEK ZAMANLI SALDIRI TESPİT SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ (OMYM_007) Hasan Can Köse, Deniz Tanır
12:15	STACKING ENSEMBLE LEARNING FOR HIGH-ACCURACY CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF DARKNET TRAFFIC USING THE CIC-DARKNET2020 DATASET (OMYM_016) Melda Esmâ Karakurt, Deniz Tanır



12:30	YERALTI TAŞKÖMÜRÜ MADENCİLİĞİNDE ÜRETİM VE HAVALANDIRMA İLİŞKİSİ (OMMM_041) Ebubekir Ahi, Fatih Bayram
-------	--

12:30	HTML ANALİZİ İLE PHİSHİNG TESPİTİ (OMYM_015) Nuray Türkcan
-------	--

ÖĞLE ARASI

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ ÖNÜNDE YEMEK İKRAMI

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (101) ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi Fatih SERTTAŞ
13:30	SANAL GERÇEKLİK VE SENSÖR TABANLI TEKNOLOJİLER İLE BİLİŞSEL GELİŞİMİ DESTEKLEYEN ADAPTİF BİR PLATFORM GELİŞTİRİLMESİ (OMEEM_034) Yüksel Oğuz, Uğur Fidan, Aslıhan Şahan
13:45	EĞİTİM KURUMLARINDA UÇ BİLGİ İŞLEM TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE OTONOM ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KARBON AYAK İZİ ANALİZİ (OMEEM_035) Caner Aylıkçı, İrem Özbek, Fatma Sude Efe, Sena Nur Demir, Hasan Yılmaz
14:00	ESP-NOW TABANLI BİR DAĞITIK AKILLI EV SİSTEMİ UYGULAMASI (OMEEM_031) Şerif Kızılgörmüş, Said Mahmut Çınar
14:15	ALTI SERBESTLİK DERECELİ TOP-PLAKA SİSTEMİNİN GÜRBÜZ KONTROLÜ (OMEEM_033) Yusuf Emre Akar, Alper Çetin, Emre Kemer
14:30	BETA TİPİ BİR STİRLİNG MOTORUNDA PİSTON YASLANMA YÜZEYLERİNİN AZALTILMASI İÇİN ÖZGÜN KRANK-BİYEL SİSTEMİ TASARIMI VE ANALİZİ (OMEEM_032) Polat Kağan Yılmaz, Semih Taştan
14:45	ENERJİ ETKİN OPTİMUM STOK SEVİYESİ BELİRLEME VE ÜRÜN STOK POLİTİKASI MODELİ GELİŞTİRME (OMEEM_030) Ecenaz Kılıç, Gülşen Aydın Keskin

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (102) BİLGİSAYAR-YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Arş. Gör. Dr. Nurgül ÖZMEN SÜZME
13:30	MODÜLER OTONOM ARAÇ YAZILIM MİMARİSİ (TMYM_016) Ece Gökçe, Gamze Demirci, Emre Atlıer Olca
13:45	E-TİCARETTE DEADSTOCK'U OLUŞMADAN ÖNLEME: TALEP TAHMİNİ, RİSK SKORU VE AGENTİK KARAR MOTORU İLE PROAKTİF STOK YÖNETİMİ (TMBM_001) Egemen Tunçarslan, Ahmet Kadayıfçı, Emre Atlıer Olca
14:00	E-TİCARET SEKTÖRÜNDE YAPAY ZEKA TABANLI DEAD STOCK RİSK TAHMİN SİSTEMİ (TMYM_008) Muzafer Demirhan, Berkecan Hamdi Akyüz, Yavuz Yaman, Emre Atlıer Olca
14:15	Byte-Düzeyleyici Temsil ve Çok Katalı Dikkat Mekanizması Kullanılarak Derin Öğrenme Tabanlı Zararlı Yazılım Tespiti (OMYM_008) Alptekin Zengin, Deniz Tanır
14:30	AI-POWERED DEAD STOCK PREDİCTION AND PREVENTION SYSTEM (TMBM_002) Bülent Bora Balcı, Mehmet Şenadlı, Necati Dolar, Emre Atlıer Olca
14:45	TREND FARKINDALIĞINA SAHİP YAPAY ZEKÂ TABANLI DEAD STOCK RİSK TAHMİNİ: BİR AIDEATHON VAKA ÇALIŞMASI (OMYM_021-TMYM_015) Yağmur Gülse Özel

ÇAY VE İKRAM ARASI

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (101) ELEKTRİK-ELEKTRONİK-İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi Veli BAŞARAN
------	---

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (102) BİLGİSAYAR-YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi İnciye Hakkı Çizmeci
15:15	E-TİCARET STOK YÖNETİMİ İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ ÖLÜ STOK TAHMİN SİSTEMİ (TMYM_004) Eren Can Gezer, Elif Şimşek, Afnan Mohamad
15:30	A FİNİTE-STATE-MACHINE APPROACH TO AN ARDUİNO-BASED AUTONOMOUS PATROL SYSTEM (TMYM_018) Eren Can Gezer, Emre Atlıer Olca



15:45	DENİZYOLU TAŞIMACILIĞINDA EMİSYON KONTROL ALANLARININ TÜRKİYE İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ (OMEEM_051) Zerrin İmeci, Kader Tütün, Olgay Okşay
16:00	SÜRDÜRÜLEBİLİR YOL KAPLAMALARI İÇİN ASFALT KARIŞIMLARDA DOĞAL LİFLERİN KULLANILABİLİRLİĞİ (OMIM_048) Mamadou Pathe Diallo, Adriel Kenne Bokagne, Mamoudou Abdourahman Suidas, Cahit Güre, Burak Enis Korkmaz, Ayfer Elmacı Korkmaz
16:15	SÜRDÜRÜLEBİLİR ALTYAPI İÇİN YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: OTTA TÜRÜ SATHİ KAPLAMALAR (OMIM_047) S. Fazel Ahmad Pozhan, Cahit Güre, Burak Enis Korkmaz, Ayfer Elmacı Korkmaz
16:30	SOĞUK BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN KAPLAMALARDA KULLANILMASI İLE İLGİLİ SON GELİŞMELER (OMIM_042) Tuğçe Akıllı Töner, Cahit Güre, Betül Nerkiz, S. Fazel Ahmad Pozhan

15:45	PERAKENDE SEKTÖRÜNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ATIL STOK (DEAD STOCK) TAHMİNİ VE OPTİMİZASYONU (TMYM_006) Eren Daban, İbrahim Baran Akfırat, Emre Atlier Olca
16:00	DEAD STOCK MANAGEMENT (TMBM_003) İrem Nisa Özlü, Duru Kaynak, Tuba Nur Tahtacı, Emre Atlier Olca
16:15	E-TİCARETTE ÖLÜ STOK RİSKİNİN YAPAY ZEKÂ TABANLI TAHMİNİ VE YÖNETİMİ (TMYM_014) Melih Küçük, Esmâ Şen, İbrahim Kartal, Emre Atlier Olca
16:30	CONSTRAINT SATİSFACİON PROBLEM YAKLAŞIMIYLA ZERO TRUST ORTAMLARINDA OTOMATİK YETKİLENDİRME VE ERİŞİM OPTİMİZASYONU (OMYM_011) Nefise Buse Uzun, Cevat Özarpa

ÇAY VE İKRAM ARASI

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (101) İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK
17:00	DOLGU BARAJLARDA SET YIKILMASI (BREACHİNG) SÜREÇLERİNİN AMPİRİK YÖNTEMLER VE SAYISAL MODELLEME İLE İNCELENMESİ (TMIM_017) Soner Celep, Murat Kilit
17:15	TÜRKİYE VE YEMEN KAMU İHALE KANUNLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ (OMIM_045) Raad Mohammed Fadhl Al-Mabrazi, Şerife Ak
17:30	YÜKSEK SICAKLIK KOŞULLARINDA SİNERJİLENEN SİLİS DUMANI KATKILI TUĞLALARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI (OMIM_050) Mohamad Eid Almohamad, Erhan Kahraman

SAAT	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ KONFERANS SALONU (102) BİLGİSAYAR-YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ OTURUMU OTURUM BAŞKANI: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Bahadır Koca
17:00	TÜRK E-TİCARET SEKTÖRÜ İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ ÖLÜ STOK TAHMİN SİSTEMİ (TMBM_013) Nafiz Meriç Yıldırım, Muhammed Enes Altun, Emre Atlier Olca
17:15	DEAD STOCK RİSK RADAR: YAPAY ZEKÂ TABANLI STOK ATIL KALMA RİSK TAHMİN SİSTEMİ (TMYM_005) Nurşeyda Doğan, Melahat Eda Acar, Eren Altın, Mehmet Güzel, Emre Atlier Olca
17:30	AKIŞKAN STOK: YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ATIL STOK TAHMİN VE YÖNETİM SİSTEMİ (TMBM_011) Tuna Şen, Emre Atlier Olca
17:45	E-TİCARETTE ATIL STOK YÖNETİMİ İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ DİNAMİK ENVANTER OPTİMİZASYONU (TMYM_007) Enver Yılmaz, Ece Gökçe
18:00	STOCKRESCUE AI: A DECİSİON SUPPORT SYSTEM FOR DEAD STOCK MANAGEMENT USİNG INTELLİGENT BUNDLING (OMYM_020-TMYM_010) Selen Bingöl, Simay Aydın, İdil Öztürk, Emre Atlier Olca
18:15	AI-POWERED DEAD STOCK RİSK PREDİCTION AND MANAGEMENT SYSTEM FOR E-COMMERCE (TMBM_012) Berkin Yenidede, Akif Eren Erverdi, Emirhan Dellal, Emre Atlier Olca



---POSTER SUNUM PLANI---
2. GÜN (14 MAYIS 2026 ÇARŞAMBA)
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

SIRA NO	POSTER BİLDİRİ ADI VE YAZARLAR	BÖLÜM
1	GÖZ KIRPMA İLE İLETİŞİM SİSTEMİ: FELÇLİ HASTALAR İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ GÖZ KIRPMA TANIMA VE KOMUT SİSTEMİ (OMBM_002) Sena Altıntop, Ahmet Haşim Yurttakal	BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
2	SİBER GÜVENLİK VE YAPAY ZEKA: XAI DESTEKLİ HİBRİT MODELLERİN SİBER TEHDİT TESPİTİNDEKİ OPERASYONEL PERFORMANSI (OMBM_017) Kübra Rüveyda Arslan, Cevat Özarpa	BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
3	DÖKÜM KUSURLARININ TESPİTİ İÇİN TRANSFER ÖĞRENME VE AÇIKLANABİLİR DERİN ÖĞRENME TABANLI BİR YAKLAŞIM (OMBM_036) Sema Kurt, Ahmet Haşim Yurttakal	BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
4	ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ SİSTEMLERİNDE MAKİNE ÖĞRENME İLE SALDIRI TESPİTİ (OMYM_006) Deniz Demirbaş, Deniz Tanır	YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ
5	AI-DRIVEN DEAD STOCK PREDICTION AND INVENTORY OPTIMIZATION USING MACHINE LEARNING (OMYM_013) Eren Can Gezer, Elif Şimşek, Afnan Mohammed	YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ
6	AI-POWERED DEAD STOCK PREDICTION SYSTEM FOR E-COMMERCE (OMYM_019-TMYM_009) Gökhan Mert Demirok, Ethem Gülşahin, Emre Atlıer Olca	YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ
7	TİTANYUM BİYOMALZEMELER İÇİN ANTİBAKTERİYEL, HİDROKSİAPATİT BAZLI FİLM TASARIMI (OMBYM_022) Esra Nida Demir, Zeynep Malak, Berzan Barmaz, Gizem Fatma Ergüner, Ayşe Janseli Denizkara, Sadık Kağa	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
8	GSR SENSÖRÜ VE KAMERA İLE CİLT TİPİ ANALİZİ (OMBYM_023) Meryem Kahraman, Dilara Tozlu, Nihal Selin Bahşiş, Uçman Ergün	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
9	YAPAY ZEKA TABANLI FENOTİP VE KLİNİK BİLGİLERE DAYALI KİŞİSELLEŞTİRİLMİŞ WARFARİN DOZAJ TAHMİN SİSTEMİ (OMBYM_024) Elbager Mukhtar, Mohammed Fadhl, Sezin Barın	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
10	DERMATOSKOPI APARATI İLE YAPAY ZEKA DESTEKLİ MELANOM KANSERİ ERKEN TEŞHİS VE TAKİP SİSTEMİ (OMBYM_025) Büşra Demir, Esra Baliz, Uçman Ergün	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
11	KANSER TÜMÖRLERİNİN ERKEN TEŞHİSİ AMACIYLA KUANTUM NOKTASI YÜKLÜ NANOPARÇACIKLARIN GELİŞTİRİLMESİ (OMBYM_026) Altırfi Ahmed Abdalgadir Yousif, Tualib Ally Shoko, Gizem Fatma Ergüner, Sadık Kağa	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
12	POSTÜR VE YÜRÜME BOZUKLUKLARI ANALİZ VE ÖLÇÜM SİSTEMİ (OMBYM_027) Rema İsmâel, Zaid Alduray, Nour İsmâiel	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
13	GRAFEN OKSİT (GO) KATKILI BİYOUYUMLU MONOFİLAMENT İP ASKI TASARIMI VE WET SPİNNİNG YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ (OMBYM_028) Zehra Kaya, Gizem Fatma Ergüner, Sadık Kağa	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
14	FENİLKETONÜRİ HASTALIĞINDA FENİLALANİN MİKTARINI HESAPLAYAN UYGULAMANIN GELİŞTİRİLMESİ (OMBYM_055) Kader Demir, Levent Özcan	BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ
15	DURGUN SU KÜTLELERİ İÇİN ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJENİ ARTIRAN OTONOM YÜZEY HAVALANDIRMA SİSTEMİ (OMEEM_029) Melisa Yozgatlı, Salihcan Orha, Murat Furat	ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
16	HİDROKSİAPATİT KATKILI ALEV GECİKTİRİCİ KABLO MALZEMESİNİN GELİŞTİRİLMESİ (OMKM_052) Selin Eren, Arda Sancar, Mihriban Ablak, Arzu Yakar	KİMYA MÜHENDİSLİĞİ



17	ATIK DENTAL ZİRKONYA VE TİTANYUM DİOKSİT KATKILI BİYOSERAMİK SENTEZİ (OMMBM_053) Cemile Betül Emrullahoğlu Abi, F. Başak, Erdiç Abi	MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
18	FARKLI HAMMADDE KAYNAKLARINDAN ALÜMİNA-MÜLLİT KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU (OMMBM_054) Cemile Betül Emrullahoğlu Abi, Erdiç Abi	MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
19	BEÇ AGREGA HAZIRLAMA VE BİTÜMÜN AGREGA FRAKSİYONLARINA İLAVE YÖNTEMLERİNİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM PERFORMANSINA ETKİSİ (OMIM_044) Sibel Binici, Edris Anwer Ali, Osamah S. M. Noman, İdriss Fongang Soh, Yazen Asali, Huzaifa Ismael M. Ahmed, Nashwan Qaderi, Meryem Almohammadalkadi, Zaher Mohsen, Burak Enis Korkmaz, Ayfer Elmacı Korkmaz, Cahit Gürer	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ



TAM METİN BİLDİRİLER



İÇİNDEKİLER

Sayfa

<i>E-Ticarette Deadstock'u Oluşturmadan Önleme: Talep Tahmini, Risk Skoru ve Agentik Karar Motoru ile Proaktif Stok Yönetimi.....</i>	<i>2</i>
<i>Dolgu Barajlarda Set Yıkılması (Breaching) Süreçlerinin Ampirik Yöntemler ve Sayısal Modelleme ile İncelenmesi.....</i>	<i>8</i>
<i>Altı Serbestlik Dereceli Top-Plaka Sisteminin Gürbüz Kontrolü.....</i>	<i>14</i>
<i>Constraint Satisfaction Problem Yaklaşımıyla Zero Trust Ortamlarında Otomatik Yetkilendirme ve Erişim Optimizasyonu</i>	<i>28</i>
<i>Eğitim Kurumlarında Uç Bilgi İşlem Tabanlı Görüntü İşleme ile Otonom Enerji Verimliliği ve Karbon Ayak İzi Analizi.....</i>	<i>39</i>
<i>Enerji Etkin Optimum Stok Seviyesi Belirleme ve Ürün Stok Politikası Modeli Geliştirme ...</i>	<i>50</i>
<i>Göz Kırpma ile İletişim Sistemi: Felçli Hastalar İçin Yapay Zeka Destekli Göz Kırpma Tanıma ve Komut Sistemi</i>	<i>54</i>
<i>Derin Öğrenme Tabanlı Trafik İşareti Tanıma: GTSRB Veri Seti Üzerine Bir Uygulama</i>	<i>57</i>
<i>Gıdaların Muhafazasında Organik Asitlerin Antimikrobiyal Etki Mekanizmaları ve Endüstriyel Uygulamaları.....</i>	<i>62</i>
<i>ESP-NOW Tabanlı Bir Dağıtık Akıllı Ev Sistemi Uygulaması</i>	<i>68</i>
<i>Yüksek Sıcaklık Koşullarında Sinterlenen Silis Dumanı Katkılı Tuğlaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması</i>	<i>75</i>
<i>Et, Tavuk ve Balık Ürünlerinin Biyoaktif Bileşenlerle Zenginleştirilmesi.....</i>	<i>89</i>
<i>Postür ve Yürüme Bozuklukları Analiz ve Ölçüm Sistemi.....</i>	<i>94</i>
<i>Afyonkarahisar'da Üretilen Top (Roll) Ekmeklerin Bazı Fiziksel Özellikleri</i>	<i>106</i>
<i>Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin (Real Time Precise Point Positioning-RT-PPP) Doğruluğunun Araştırılması.....</i>	<i>116</i>
<i>Sanal Gerçeklik ve Sensör Tabanlı Teknolojiler ile Bilişsel Gelişimi Destekleyen Adaptif Bir Platform Geliştirilmesi.....</i>	<i>121</i>
<i>Ozmotik Kurutmanın Meyve ve Sebzelerin Kalitesi Üzerindeki Etkileri</i>	<i>126</i>



E-Ticarette Deadstock'u Oluşmadan Önleme: Talep Tahmini, Risk Skoru ve Agentic Karar Motoru ile Proaktif Stok Yönetimi

Egemen Tunçarslan ^{1*}, Ahmet Kadayıfçı¹, Emre Atlıer Olca¹

¹ Maltepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

* Sorumlu yazar: egementuncarslan@gmail.com

Özet

Deadstock (satılamayan veya atıl kalan stok), e-ticaret işletmeleri için sermaye bağlanması, depolama maliyetleri ve marj kaybı gibi önemli operasyonel sorunlara yol açmaktadır. Talep tahminlerindeki belirsizlikler, kampanya etkilerinin doğru öngörülememesi ve tedarik sürelerinin yeterince dikkate alınmaması, deadstock oluşumunu artıran başlıca etkenlerdir. Mevcut yaklaşımlar çoğunlukla deadstock oluşuktan sonra uygulanan reaktif tasfiye stratejilerine dayanmaktadır.

Bu çalışmada, deadstock'u oluşmadan önce tespit etmeyi amaçlayan proaktif bir stok yönetim sistemi önerilmektedir. Sistem; geçmiş satış verileri, stok hareketleri, fiyat ve kampanya bilgileri ile iade oranlarını bir araya getirerek SKU bazında talep tahmini yapmakta ve bu çıktılar üzerinden 0-1 aralığında normalize edilmiş bir deadstock risk skoru hesaplamaktadır. Hesaplanan risk skoru, agentic bir karar motoru aracılığıyla yeniden sipariş, markdown ve stok transferi gibi önleyici aksiyonlara dönüştürülmektedir. Çalışma, prototip mimari ve değerlendirme planı ile e-ticarette proaktif deadstock önlemeye yönelik uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Deadstock, e-ticaret, talep tahmini, stok optimizasyonu, markdown optimizasyonu, risk skoru, agentic sistemler.

Preventing Deadstock in E-Commerce Before It Happens: Proactive Inventory Management Using Demand Forecasting, Risk Scoring, and an Agentic Action Engine

Abstract

Deadstock —unsellable or idle inventory— poses a significant cost burden for e-commerce businesses by tying up capital and reducing margins. Inaccurate demand forecasting, limited modeling of promotion effects, and insufficient consideration of supply lead times are among the main drivers of deadstock formation. Most existing approaches remain reactive, focusing on liquidation after excess inventory has already accumulated.

This paper proposes a proactive inventory management system that aims to prevent deadstock before it occurs. The system combines historical sales data, inventory movements, pricing and promotion information, and return rates to generate SKU-level demand forecasts and a normalized deadstock risk score between 0 and 1. An agentic decision layer translates the risk score into preventive operational actions such as adjusting replenishment, applying controlled markdowns, or executing stock transfers. The study presents a prototype architecture and an evaluation plan, offering a practical roadmap for proactive deadstock prevention in e-commerce operations.

Key words: Deadstock; e-commerce; demand forecasting; inventory optimization; markdown optimization; risk scoring; agentic systems

1. Giriş

Deadstock; hızlı değişen talep, kampanya etkileri, tedarik süreleri ve ürün çeşitliliğinin artmasıyla özellikle e-ticaret ve moda perakendesinde kritik bir maliyet kalemine dönüşmüştür (Silver et al 1998). Atıl stok, sermayeyi bağlamanın yanı sıra depolama, iade ve fırsat maliyeti yaratır; işletmeler çoğu zaman marjı aşındıran indirimlere veya tasfiyeye yönelir. Bu nedenle deadstock yönetimi, yalnızca “fazla stok” değil; talep tahmini, yeniden sipariş, fiyatlandırma ve kanal yönetimi bileşenlerinin birlikte ele alındığı çok değişkenli bir optimizasyon problemidir.

Literatürde overstock/deadstock yönetiminde (i) talep tahmini (zaman serisi ve aralıklı talep modelleri), (ii) envanter kontrolü (ör. servis seviyesi hedefleri, newsvendor türevi kararlar), (iii) markdown optimizasyonu [8] ve (iv) stok transferi/kanal yönetimi yaklaşımları öne çıkmaktadır. Ancak pratikte yalnızca fiyat kırma odaklı çözümler, deadstock oluşuktan sonra devreye girdiği için proaktif önleme hedefini kaçırmaktadır. Bu çalışma, deadstock'u oluşmadan önce risk sinyalleriyle yakalayıp aksiyona dönüştüren bir prototip platform ve karar motoru tasarlamayı hedefler.

Katkılarımız üç noktada toplanır: (1) SKU-bazlı talep tahmini ile stok kapsamı mantığını birleştiren pratik bir risk skoru formülasyonu, (2) risk skorunu operasyonel kısıtlarla birlikte aksiyona çeviren agentic aksiyon motoru (Think–Plan–Act–Reflect), (3) modüler bir backend mimarisi ve ölçülebilir bir değerlendirme planı.

2. Materyal ve Metot

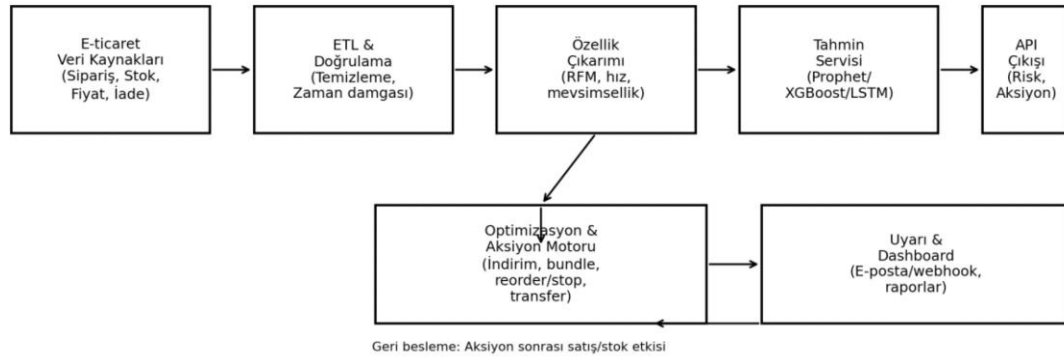
Bu bölümde, önerilen proaktif deadstock önleme sisteminin geliştirilmesinde kullanılan veri kaynakları, yöntemsel yaklaşım ve yazılım mimarisi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Sistem, e-ticaret operasyonlarından elde edilen çoklu sinyalleri bir araya getirerek talep tahmini, risk skoru hesaplama ve aksiyon üretme adımlarını bütüncül bir karar destek çerçevesi içinde ele almaktadır.

2.1. Materyal

Platformun çalışabilmesi için gerekli olan minimum veri seti, e-ticaret operasyonlarının temel bileşenlerini kapsayacak şekilde dört ana grupta toplanmıştır. Birinci grup, sipariş geçmiş verilerinden oluşmakta olup SKU bazında satış adetleri, satış tarihleri ve satış kanalları gibi alanları içermektedir. Bu veriler, talep serilerinin oluşturulması, trend ve mevsimsellik bileşenlerinin yakalanması açısından temel girdiyi sağlamaktadır.

İkinci grup, stok hareketlerine ilişkin verilerdir. Depo bazlı giriş ve çıkış kayıtları, mevcut stok seviyeleri ve stok devir hızına ilişkin bilgiler, ürünlerin elde kalma süresinin ve stok kapsamının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Üçüncü grup olan fiyat ve promosyon verileri ise ürün bazında fiyat değişimleri, indirim türleri ve kampanya takvimlerini içermektedir. Bu sinyaller, kampanyaların talep üzerindeki etkisinin modellenmesi ve markdown önerilerinin oluşturulması açısından kritik

öneme sahiptir. Son olarak iade ve iptal oranları ile tedarik parametreleri (lead time, minimum sipariş miktarı gibi) sisteme entegre edilerek net talep düzeltmeleri yapılmakta ve yeniden sipariş kararlarının daha gerçekçi bir zeminde alınması sağlanmaktadır.



Şekil 1. Proaktif deadstock önleme platformu mimarisi

Tablo 1: Veri kaynakları ve platformda kullanımı

Veri kaynağı	Örnek alanlar	Güncelleme	Platformdaki kullanım
Sipariş geçmişi	SKU, adet, tarih, kanal	Günlük/Saatlik	Talep serisi, trend/mevsimsellik
Stok hareketleri	Stok, giriş/çıkış, depo	Gerçek zamanlı	Kapsama süresi, yaş/elde kalma
Fiyat & kampanya	Fiyat, indirim tipi, kampanya	Kampanya bazlı	Promo etkisi, markdown önerisi
İade/iptal	İade oranı, iptal	Günlük	Net talep düzeltmesi, risk artırıcı
Tedarik param.	Lead time, MOQ	Değiştikçe	Sipariş kararı, servis seviyesi

2.2 Metot

Metot iki ana bileşenden oluşur: (i) SKU-bazlı talep tahmini, (ii) tahmin çıktıları ve operasyonel sinyaller ile deadstock risk skorunun hesaplanması ve aksiyon önerimi. Talep tahmininde ürün tipine göre farklı modellerin seçilebildiği bir çerçeve kullanılır. Düzenli talebi olan SKU'larda mevsimsellik yakalayan zaman serisi modelleri (ör. Prophet) veya gradyan artırma tabanlı modeller (ör. XGBoost) tercih edilebilirken; aralıklı (intermittent) talepte Croston türevleri (SBA/TSB) [1] ile uyumlu baz modeller kullanılabilir.

Deadstock risk skoru, belirli bir ufukta (H gün) beklenen talep ile mevcut eldeki stokun karşılaştırılması üzerine kuruludur. Basitleştirilmiş bir formülasyon aşağıdaki gibidir:

$$\text{Risk} = \sigma(w_1 \cdot (\text{Cover}_H - 1) + w_2 \cdot \text{Age} + w_3 \cdot \text{ReturnRate} - w_4 \cdot \text{Margin} + w_5 \cdot \text{PromoBoost})$$

Burada Cover_H = mevcut stok / H-gün talep tahmini, Ag = ürünün elde kalma yaşı (gün), ReturnRate = iade oranı, Margin = brüt marj ve PromoBoost = yaklaşan kampanya etkisini temsil eder. $\sigma(\cdot)$ sigmoid fonksiyonudur ve skor 0-1 aralığına sıkıştırılır.

2.3 Agentic Aksiyon Motoru

Platformun ayırt edici yönü, risk skorunu “öneri” seviyesinde bırakmayıp operasyonel aksiyonlara dönüştürmesidir. Aksiyon motoru, Think–Plan–Act–Reflect (Düşün–Planla–Uygula–Yansıt) döngüsü ile çalışır (Russel and Norvig, 2021): (1) Bağlam toplama (Think): Seçilen SKU için talep tahmini, risk bileşenleri ve stok verileri toplanır. (2) Aday plan üretimi (Plan): Risk skoruna bağlı olarak aksiyon uzayı daraltılır (ör. yeniden siparişi durdur, markdown yap). (3) Kısıt denetimi ve yürütme (Act): Üretilen plan, işletme kurallarına (fiyat alt sınırı, marj koruma vb.) göre doğrulanır. (4) Refleksiyon / güvenlik kontrolleri (Reflect): Motor, önerinin tutarlılığını yeniden kontrol eder.

2.4 Yazılım Mimarisi (Backend)

Sistemin yazılım altyapısı, modüler ve ölçeklenebilir bir yapı sağlamak amacıyla Flask tabanlı REST mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Mimari, API, servis, veri erişim (repository), model ve yardımcı araçlar (utils) katmanlarından oluşmakta olup her bir bileşenin bağımsız olarak geliştirilmesine ve ölçeklenmesine olanak tanımaktadır.

Talep tahmini servisi, risk skoru hesaplama servisi ve agentic aksiyon motoru birbirinden ayrık servisler olarak tasarlanmıştır. Bu ayırım, sistemin ilerleyen aşamalarda farklı tahmin modelleri veya karar stratejileri ile genişletilebilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca bu mimari yapı, gerçek üretim ortamlarında sistemin kademeli olarak devreye alınmasına ve performans darboğazlarının izole edilmesine katkı sağlamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, gerçek üretim ortamına ait uzun dönemli ve etiketlenmiş verilere erişimin sınırlı olması nedeniyle, önerilen sistemin performansı prototip çıktıları ve simülasyon temelli bir ölçüm planı üzerinden değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, midterm kapsamındaki bir çalışma için sistemin uygulanabilirliğini ve potansiyel operasyonel katkısını göstermeyi amaçlamaktadır. Değerlendirme süreci, talep tahmini doğruluğu, risk skorunun ayırt ediciliği ve üretilen aksiyonların operasyonel etkileri olmak üzere üç ana eksenle ele alınmıştır.

Talep tahmini bileşeni için, düzenli talep gösteren ürünlerde sMAPE, MAPE ve RMSE; aralıklı talebe sahip SKU'larda ise MAE gibi metriklerin kullanılması önerilmektedir. Bu metrikler, farklı talep profillerine sahip ürünler arasında model performansının karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Tahmin çıktılarının stok kapsamı hesaplamasında doğrudan kullanılması, tahmin hatalarının deadstock risk skoruna yansımaları sağlayarak risk skorunun ileriye dönük belirsizliği de içeren dinamik bir yapıya kavuşmasına katkıda bulunmaktadır.

Deadstock risk skoru, sürekli bir değer üretmesi nedeniyle bir sınıflandırma problemi olarak değerlendirilebilir. Bu kapsamda, geçmiş dönemlerde deadstock adayları olarak etiketlenen ürünler üzerinden ROC-AUC ve F1 skoru gibi metriklerle risk skorunun ayırt ediciliği ölçülebilir. Risk skorunun ikili bir çıktı yerine 0–1 aralığında dereceli bir sinyal üretmesi, işletmelerin sert eşiklere bağlı kalmadan kademeli ve esnek kararlar alabilmesini mümkün kılmaktadır.

Agentic aksiyon motoru, risk skoruna bağlı olarak yeniden siparişin durdurulması, kontrollü markdown uygulanması veya stok transferi gibi farklı aksiyonları önermektedir. Bu aksiyonların operasyonel etkisi, simülasyon ortamında fazla stokta kalınan gün sayısı, stokta bağlanan sermaye ve ürün yaşı gibi metrikler üzerinden analiz edilebilir. İlk bulgular, proaktif aksiyonların reaktif tasfiye yaklaşımlarına kıyasla stok yaşını ve sermaye bağlanma süresini azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, aksiyonların gerçek satış performansına etkisinin ölçülmesi için gelecekte A/B testleri ile desteklenen saha çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, e-ticaret operasyonlarında önemli bir maliyet unsuru olan deadstock problemini reaktif tasfiye yaklaşımları yerine proaktif önleme perspektifiyle ele alan bütüncül bir karar destek sistemi önerilmiştir. Geliştirilen yaklaşım, SKU bazlı talep tahmini ile stok kapsamı mantığını birleştirerek deadstock riskini erken aşamada tespit etmeyi ve bu riski operasyonel aksiyonlara dönüştürmeyi hedeflemektedir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca tahmin doğruluğuna odaklanan geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek, tahmin çıktılarının doğrudan karar süreçlerine entegre edilmesini sağlamaktadır.

Önerilen sistemde, geçmiş satış verileri, stok hareketleri, fiyat ve promosyon bilgileri ile iade oranları birlikte değerlendirilerek 0–1 aralığında normalize edilmiş bir deadstock risk skoru hesaplanmaktadır. Bu risk skoru, yeniden sipariş kararları, kontrollü markdown uygulamaları ve stok transferleri gibi farklı aksiyonları tek bir çerçeve altında ele almayı mümkün kılmaktadır. Ayrıca agentik karar motoru sayesinde, üretilen aksiyonların işletme kısıtları ile uyumlu olup olmadığı kontrol edilmekte ve yüksek etkili kararlar için insan onayı gibi güvenlik mekanizmaları sisteme entegre edilebilmektedir.

Çalışmanın midterm kapsamı ve gerçek üretim verisine erişimdeki kısıtlar nedeniyle, sistemin performansı prototip çıktıları ve simülasyon temelli ölçümler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, proaktif aksiyonların stokta kalma süresi ve sermaye bağlanma maliyeti gibi temel operasyonel metriklerde iyileşme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, gerçek satış verileri ile uzun dönemli etkilerin ölçülmesi ve müşteri davranışına olan yansımaların analiz edilmesi, bu çalışmanın önemli sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Gelecek çalışmalar kapsamında, sistemin gerçek üretim ortamlarında test edilmesi, risk skorunun çevrimiçi öğrenme mekanizmaları ile güncellenmesi ve aksiyonların satış performansına etkisinin A/B testleri ile ölçülmesi planlanmaktadır. Ayrıca dinamik fiyatlandırma ve markdown kararlarının pekiştirmeli öğrenme yaklaşımları ile desteklenmesi, önerilen platformun karar alma yetkinliğini daha da artıracak önemli bir araştırma yönü olarak değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] J.D. Croston, Forecasting and stock control for intermittent demands. *Operational Research Quarterly*, 23(3), (1972) 289–303.
- [2] A. A. Syntetos, J. E. Boylan, The accuracy of intermittent demand estimates. *International Journal of Forecasting*, 21(2), (2005) 303–314.
- [3] R.J. Hyndman, G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*. OTexts. (2018).
- [4] E. A. Silver, D. F. Pyke, R. Peterson, *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. John Wiley & Sons. (1998).
- [5] P.H. Zipkin, *Foundations of Inventory Management*. McGraw-Hill. (2000).
- [6] M. L. Fisher, A. Raman, Reducing the cost of demand uncertainty through accurate response to early sales. *Operations Research*, 44(1), (1996) 87–99.
- [7] F. Caro, J. Gallien, Inventory management of a fast-fashion retail network. *Operations Research*, 58(2), (2010) 257–273.
- [8] W. Elmaghraby, P. Keskinocak, Dynamic pricing in the presence of inventory considerations. *Management Science*, 49(7), (2003) 1010–1027.
- [9] S. Makridakis, E. Spiliotis, V. Assimakopoulos, Statistical and machine learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLOS ONE*, 13(3), e0194889. (2018).

[10] S. Russell, P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson. (2021).



Dolgu Barajlarda Set Yıkılması (Breaching) Süreçlerinin Ampirik Yöntemler ve Sayısal Modelleme ile İncelenmesi

Soner CELEP ¹, Murat KİLİT ^{2*}

¹ Devlet Su İşleri 181. Şube Müdürlüğü, Afyonkarahisar, Türkiye, soner.celep@usr.aku.edu.tr

^{2*} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye
mkilit@aku.edu.tr

Özet

Dolgu barajlarda set yıkılması (breaching), gövde malzemesinin kısa sürede erozyona uğraması ve rezervuar suyunun mansap bölgesine kontrolsüz biçimde boşalması nedeniyle yüksek taşkın riski oluşturan kritik bir süreçtir. Bu çalışmada dolgu ve heyelan barajlarında gözlenen yıkılma mekanizmaları, literatürde yaygın kullanılan ampirik yöntemler ve sayısal modelleme yaklaşımları açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada özellikle Froehlich (2008), Peng ve Zhang (2012) ve Zhong vd. (2021) tarafından verilen veri setleri ve model kabulleri dikkate alınmış; yarık derinliği, ortalama yarık genişliği, yan şev oranı ve yıkılma süresi gibi temel breaching parametrelerinin taşkın hidrografi üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Tarihsel kayıtlar, dolgu baraj yıkılmalarında üstten aşma ve borulanma/sızma mekanizmalarının baskın olduğunu göstermektedir. Bulgular, ampirik denklemlerden elde edilen tekil sonuçların doğrudan tasarım değeri olarak kullanılmasının önemli belirsizlikler doğurabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle HEC-RAS ve benzeri sayısal modellerde farklı breaching senaryolarının birlikte değerlendirilmesi, pik debi ve taşkın varış zamanı tahminlerinin güvenilirliğini artırmaktadır. Çalışma, taşkın risk yönetimi ve acil durum planlamasında en kötü durum senaryolarını içeren duyarlılık analizlerinin zorunlu bir mühendislik adımı olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Dolgu barajlar; Baraj yıkılması, Breaching parametreleri, HEC-RAS

Investigation of Embankment Dam Breaching Processes Using Empirical Methods and Numerical Modeling

Abstract

Breaching of embankment dams is a critical failure process in which rapid erosion of the dam body may release a large reservoir volume toward downstream areas and generate severe flood hazards. This study evaluates the failure mechanisms observed in embankment and landslide dams by considering empirical prediction approaches and numerical modeling practices. The analysis focuses on the datasets and model assumptions proposed by Froehlich (2008), Peng and Zhang (2012), and Zhong et al. (2021), with particular attention to breach depth, average breach width, side-slope ratio, and breach formation time. Historical dam-failure records indicate that overtopping and piping/seepage are the dominant failure mechanisms for embankment dams. The results show that single deterministic values obtained from empirical equations may lead to considerable uncertainty in flood-hydrograph estimation.

Therefore, numerical models such as HEC-RAS should be implemented with multiple breach scenarios rather than a single representative case. The comparison of fast and slow breach-formation conditions demonstrates that small variations in breach formation time can substantially change the peak discharge and the timing of the flood wave. The study emphasizes that sensitivity analyses, including conservative worst-case scenarios, should be treated as an essential component of dam-break modeling, flood-risk management, and emergency action planning.

Keywords: embankment dams, dam breach, breaching parameters, HEC-RAS

1. Giriş

Dolgu barajlarında üstten aşma (overtopping), rezervuar su seviyesinin baraj kretini aşmasıyla başlayan ve mansap şevinde erozyonun hızlanması sonucunda yarığın kısa sürede derinleşip genişlemesine neden olan en kritik yıkılma mekanizmalarından biridir. Tarihsel vaka kayıtları, dolgu baraj yıkılmalarında üstten aşmanın başlıca nedenlerden biri olduğunu göstermektedir [2,3]. Bu nedenle, üstten aşmaya bağlı yarık oluşumu, yıkılma süresi ve pik taşkın debisinin doğru tahmin edilmesi, mansap taşkın tehlikesinin değerlendirilmesi ve acil durum planlaması açısından büyük önem taşımaktadır. Baraj yıkılması olayları, özellikle dolgu barajlarda setin kademeli olarak aşınması sonucu geliştiğinde, mansap bölgelerinde ani ve yıkıcı taşkınlara neden olabilmektedir. Bu süreçte oluşan yarık geometrisi ve yıkılma süresi, taşkın hidrografının pik debisini ve taşkın dalgasının varış zamanını doğrudan belirler. Bu nedenle dolgu baraj güvenliği çalışmalarında breaching parametrelerinin güvenilir biçimde tahmin edilmesi, yalnızca akademik bir modelleme problemi değil, aynı zamanda can ve mal güvenliği açısından kritik bir mühendislik gerekliliğidir.

Literatürde breaching süreçlerinin tahmini için iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır. Birinci yaklaşım, tarihsel baraj yıkılma vakalarına dayalı ampirik denklemlerin kullanılmasıdır. İkinci yaklaşım ise yıkılma geometrisini ve akım yayılımını HEC-RAS gibi sayısal modellerle temsil etmektir. Bu çalışmada söz konusu iki yaklaşım birlikte değerlendirilmiş; özellikle ampirik parametrelerdeki belirsizliğin taşkın hidrografi üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Literatür Veri Setleri ve Yıkılma Modları

Çalışmanın materyalini, dolgu ve heyelan barajlarında raporlanan yıkılma vakalarına ilişkin literatür verileri oluşturmaktadır. Bu kapsamda Froehlich (2008), Peng ve Zhang (2012) ve Zhong vd. (2021) çalışmalarında verilen vaka bilgileri, yıkılma modları ve breaching parametreleri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Tarihsel kayıtlar, dolgu barajlarda üstten aşma ile borulanma/sızma mekanizmalarının baskın olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Tarihsel kayıtlara göre dolgu baraj yıkılma modları

Veri tabanı	Vaka sayısı	Üstten aşma	Borulanma / sızma	Kaymalar	Diğer
Middlebrooks (1953)	206	%30	%38	%15	%17
Foster vd. (2000)	128	%48	%46	%6	-
Zhang vd. (2016)	176	%58	%37	%5	-
Mevcut inceleme	3504	%48	%35	%4	%13

2.2. Ampirik Breaching Modelleri

Baraj yıkılması analizlerinde ampirik breaching modelleri, geçmiş yıkılma vakalarından elde edilen gözlemsel verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu modeller genellikle yarık genişliği, yarık derinliği, yıkılma süresi ve pik çıkış debisi gibi temel parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılır. Fiziksel tabanlı modeller yıkılma mekanizmasını daha ayrıntılı temsil edebilse de ampirik modellerin daha az veri gerektirmesi ve pratik mühendislik uygulamalarında hızlı sonuç vermesi nedeniyle hâlen yaygın biçimde tercih edildiği belirtilmektedir [3].

Dolgu barajlar için geliştirilen ampirik modellerde baraj yüksekliği, rezervuar hacmi, başlangıç su seviyesi, yıkılma modu, baraj tipi, yarık derinliği ve malzeme aşınabilirliği gibi değişkenler dikkate alınmaktadır. Literatürde Kirkpatrick, SCS, USBR, MacDonald ve Langridge-Monopolis, Froehlich, Xu ve Zhang gibi araştırmacılar tarafından pik debi, ortalama yarık genişliği ve yıkılma süresini tahmin etmeye yönelik çok sayıda bağıntı önerilmiştir. Bu modellerde özellikle Froehlich tarafından geliştirilen yaklaşımlar, dolgu baraj yıkılmalarında yarığın trapez/yamuk formda geliştiği varsayımına dayanmakta ve ortalama yarık genişliği ile yıkılma süresinin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır [1,3].

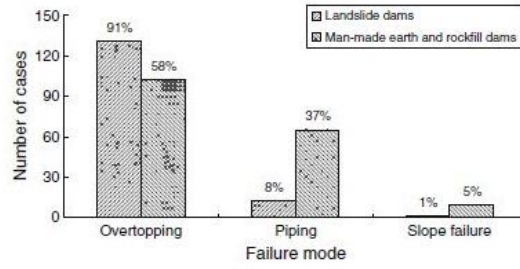
Heyelan barajları için geliştirilen ampirik modeller ise yapay dolgu barajlardan farklı olarak daha düzensiz geometriye, heterojen malzeme yapısına ve geniş taban alanına sahip doğal birikim kütlelerini temsil etmektedir. Peng ve Zhang (2012), 1239 heyelan barajı vakasını derlemiş ve bunlardan 52 yıkılma vakasına ait ayrıntılı verileri kullanarak heyelan barajlarının breaching parametrelerini tahmin etmeye yönelik ampirik modeller geliştirmiştir. Bu modellerde pik debi, yarık derinliği, yarık üst genişliği, yarık taban genişliği ve yıkılma süresi temel çıktı parametreleri olarak ele alınmıştır. Model girdileri ise baraj yüksekliği, baraj yüksekliği/genişliği oranı, baraj şekil katsayısı, göl şekil katsayısı ve malzeme aşınabilirliği şeklinde tanımlanmıştır [2].

Peng ve Zhang (2012) tarafından yapılan karşılaştırmalar, yapay dolgu barajlar için geliştirilen ampirik modellerin heyelan barajlarına doğrudan uygulanmasının güvenilir sonuçlar vermeyebileceğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, heyelan barajlarının çoğunlukla daha geniş ve heterojen malzeme yapısına sahip olması, yarığın her zaman baraj tabanına kadar ilerlememesi ve yıkılma süresinin yapay dolgu barajlara göre daha uzun gerçekleşebilmesidir. Bu nedenle heyelan barajlarında breaching parametreleri tahmin edilirken doğrudan dolgu baraj modelleri yerine, heyelan barajlarının kendine özgü geometrik ve malzeme özelliklerini dikkate alan bağıntıların kullanılması daha uygun görülmektedir [2,3].

Ampirik modellerin en önemli sınırlılığı, geçmiş vaka verilerine bağlı olmaları ve bu verilerdeki belirsizliklerin model sonuçlarına doğrudan yansımasıdır. Özellikle yıkılma süresi ve nihai yarık geometrisi, malzemenin dane dağılımı, kohezyonu, aşınabilirliği, baraj geometrisi ve rezervuar hacmine bağlı olarak geniş aralıklarda değişebilmektedir. Bu nedenle breaching analizlerinde tek bir ampirik değer yerine, farklı modellerden elde edilen parametrelerin karşılaştırılması ve duyarlılık analizleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, HEC-RAS gibi sayısal taşkın modellerinde daha güvenilir pik debi ve taşkın yayılım senaryolarının oluşturulmasına katkı sağlar.

Tablo 2. Heyelan barajlarında baraj yüksekliği ve yarık derinliği arasındaki ilişki

Parametre sınıfı	Baraj yüksekliği H_d (m)	Yarık derinliği H_b (m)	Yıkılma oranı H_b/H_d
Düşük yükseklikli	0-25	0-22	%80-%100
Orta yükseklikli	25-60	15-45	%60-%80
Yüksek barajlar	60-120+	30-80	%40-%65
Uç örnekler	>150	<100	<%50

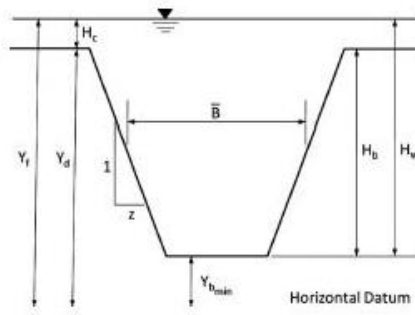


Şekil 1. Heyelan baraj ve yapay dolgu baraj yıkılma modlarının karşılaştırılması [2].

2.3. Sayısal Modelleme Yaklaşımı

Baraj yıkılması çalışmalarında sayısal modelleme yaklaşımı, ampirik bağıntılarla elde edilen yarık parametrelerinin hidrolik modele aktarılması ve yıkılma sonucunda oluşacak taşkın hidrografının zamana bağlı olarak hesaplanması esasına dayanmaktadır. Dolgu ve heyelan barajlarında yıkılma süreci; baraj geometrisi, rezervuar hacmi, başlangıç su seviyesi, malzeme özellikleri, yıkılma modu ve hidrolik sınır koşulları gibi çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu nedenle sayısal modeller, yalnızca nihai pik debiyi değil, aynı zamanda yarığın zamanla derinleşmesi, genişlemesi ve mansap bölgesinde oluşan taşkın dalgasının yayılımını değerlendirmek için de önemli bir araç olarak kullanılmaktadır [3]. Sayısal modelleme çalışmalarında öncelikle baraj gövdesi ve rezervuar sistemi tanımlanır. Bu aşamada baraj yüksekliği, kret kotu, rezervuar hacim-eğri ilişkisi, başlangıç su seviyesi, mansap topoğrafyası ve akım direnç katsayıları modele girilir. Daha sonra yıkılma modu üstten aşma veya borulanma/sızma olarak seçilir. Üstten aşma senaryosunda, rezervuar su seviyesinin baraj kretini aşmasıyla mansap şevinde yüzey erozyonu başlar; bu süreç zamanla yarığın derinleşmesine ve genişlemesine yol açar. Zhong vd. (2021), fiziksel tabanlı sayısal modellerin; rezervuar hacim eğrisi, baraj malzeme özellikleri, yüzey koşulları, giriş debisi ve tahliye yapıları gibi değişkenleri dikkate alarak yarık boyutlarının ve yıkılma hidrografının zamanla değişimini hesaplayabildiğini belirtmektedir.

Bu çalışmada sayısal modelleme yaklaşımı, ampirik breaching modellerinden elde edilen başlangıç parametrelerinin taşkın yayılım analizine aktarılması şeklinde ele alınmıştır. Froehlich, Peng ve Zhang gibi modellerden elde edilen yarık genişliği, yarık derinliği ve yıkılma süresi değerleri, modelde farklı senaryolar halinde tanımlanabilir. Böylece tek bir yıkılma kabulüne bağlı kalmak yerine, hızlı yıkılma, orta süreli yıkılma ve yavaş yıkılma gibi alternatif senaryolar oluşturularak pik debi ve taşkın yayılımı üzerindeki etkiler karşılaştırılabilir. Peng ve Zhang (2012), heyelan barajlarında yıkılma parametrelerinin; baraj yüksekliği, baraj genişliği, göl hacmi, baraj şekli ve malzeme aşınabilirliği gibi değişkenlerden etkilendiğini vurgulamaktadır. Bu durum, özellikle doğal ve heterojen yapıya sahip heyelan barajlarında tek bir sabit parametreyle modelleme yapılmasının güvenilir sonuç vermeyebileceğini göstermektedir. Sayısal modelleme yaklaşımı, ampirik breaching modellerinden elde edilen yarık genişliği, yarık derinliği ve yıkılma süresi gibi başlangıç parametrelerinin taşkın yayılım analizine aktarılmasına dayanmaktadır. Bu kapsamda Froehlich, Peng ve Zhang gibi modellerden elde edilen değerler, HEC-RAS ve benzeri programlarda farklı yıkılma senaryoları oluşturmak için kullanılabilir. Tek bir sabit senaryo yerine hızlı, orta süreli ve yavaş yıkılma senaryolarının karşılaştırılması, pik debi ve taşkın yayılımı üzerindeki belirsizliklerin daha gerçekçi değerlendirilmesini sağlar. Özellikle yıkılma süresi, rezervuarın boşalma hızını ve mansapta oluşacak pik debiyi doğrudan etkilediğinden en kritik parametrelerden biridir. Bu nedenle dolgu ve heyelan barajı yıkılma analizlerinde sayısal modelleme, ampirik bağıntılarla birlikte kullanılmalı ve sonuçlar duyarlılık analizleriyle desteklenmelidir.

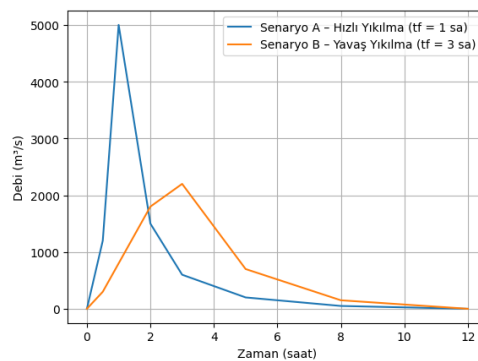


Şekil 2. Froehlich (2008) modelinde kullanılan idealize yamuk yarık kesiti.

Tablo 1’de verilen istatistikler, dolgu baraj yıkılmalarının büyük bölümünün suyun gövde malzemesini sürüklemesiyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Üstten aşma, hidrolik kapasite yetersizliği veya ekstrem yağışlar sonucunda gelişirken; borulanma ve sızma, gövde içindeki içsel erozyon süreçleriyle ilişkilidir. Bu durum, filtre zonları, kil çekirdek, drenaj elemanları ve rezervuar işletme emniyeti gibi tasarım bileşenlerinin önemini artırmaktadır.

Peng ve Zhang (2012) veri setinde heyelan barajlarının heterojen malzeme yapısı ve geniş taban alanı nedeniyle çoğu zaman kısmi yıkılma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Buna karşılık yapay dolgu barajlarda yarığın tabana kadar ilerleme olasılığı daha yüksektir. Bu farklılık, aynı rezervuar hacmi ve benzer baraj yüksekliği için bile pik debi tahminlerinde belirgin farklılıklara yol açabilir.

Frøehlich (2008) modelinin sağladığı yamuk kesit yaklaşımı, pratik uygulamalarda önemli bir başlangıç değeri sunmaktadır. Bununla birlikte modeldeki ortalama yarık genişliği ve yıkılma süresi değerleri regresyon verilerine bağlı olduğundan, malzeme kohezyonu, dane dağılımı, sıkışma koşulları ve rezervuar hacmi gibi saha koşullarıyla birlikte ele alınmalıdır. Özellikle yıkılma süresi, hidrografın tepe debisi üzerinde en hassas parametrelerden biridir.



Şekil 3. Yıkılma süresinin taşkın hidrografı ve pik debi üzerindeki temsili etkisi.

Şekil 3'te gösterildiği üzere hızlı gelişen yıkılma senaryoları daha dar tabanlı ve yüksek pik debili hidrograflar üretmektedir. Yavaş gelişen yıkılma koşullarında ise pik debi azalmakta, ancak taşkın süresi uzamaktadır. Bu nedenle taşkın risk yönetimi çalışmalarında yalnızca ortalama senaryo değil, en olumsuz ve en olası senaryoların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

4. Sonuç

- Tarihsel veriler, dolgu baraj yıkılmalarında üstten aşma ve borulanma/sızma mekanizmalarının baskın olduğunu göstermektedir.
- Heyelan barajlarında heterojen malzeme yapısı ve geniş taban alanı nedeniyle yarık derinliği çoğu zaman baraj yüksekliğinin tamamına ulaşmamaktadır.
- Froehlich (2008) ve Peng ve Zhang (2012) gibi ampirik modeller, sayısal modelleme için yararlı başlangıç parametreleri vermekle birlikte önemli belirsizlikler içermektedir.
- HEC-RAS ve benzeri modellerde tek bir ampirik senaryo yerine çoklu senaryo ve duyarlılık analizi yaklaşımı kullanılmalıdır.
- Acil durum planlamasında kısa yıkılma sürelerinin oluşturacağı yüksek pik debiler en kritik mühendislik senaryosu olarak dikkate alınmalıdır.
- Üstten aşma durumunda su akımı, öncelikle baraj kreti ve mansap şevinde kayma gerilmesi oluşturarak yüzey erozyonunu başlatmakta; erozyonun geriye doğru ilerlemesiyle yarık derinliği ve genişliği hızla artmaktadır. Bu nedenle overtopping senaryolarında kret kotu, mansap şevi ve malzeme aşınabilirliği model sonuçları üzerinde belirleyici parametrelerdir [3].
- Üstten aşma kaynaklı yıkılmalarda erozyon, baraj kreti ve mansap şevinde başlayarak geriye doğru ilerlemekte ve yarığın kısa sürede derinleşip genişlemesine neden olmaktadır. Bu nedenle overtopping senaryolarında kret kotu, mansap şevi, malzeme aşınabilirliği ve olası tahliye/dolusavak önlemleri taşkın pik debisinin belirlenmesinde kritik parametreler olarak dikkate alınmalıdır.

Kaynaklar

- [1] D. C. Froehlich, Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), (2008) 1708-1721. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708))
- [2] M. Peng, L. M. Zhang, Breaching parameters of landslide dams. *Landslides*, 9(1) (2012) 13-31. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0271-y>
- [3] Q. Zhong, L. Wang, S. Chen, Z. Chen, Y. Shan, Q. Zhang, Q. Ren, S. Mei, J. Jiang, L. Hu, J. Liu, Breaches of embankment and landslide dams: State of the art review. *Earth-Science Reviews*, 216 (2021) 103597. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103597>



Altı Serbestlik Dereceli Top-Plaka Sisteminin Gürbüz Kontrolü

Yusuf Emre AKAR^{1*}, Alper ÇETİN², Emre KEMER³

^{1*} Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, yusuf.e.akar64@gmail.com

² Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, alpercetin8801@gmail.com

³ Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, emre.kemer@usak.edu.tr

Özet

Yüksek yük taşıma kapasitesi, rijit yapısı ve milimetrik konumlandırma yetenekleri sayesinde Stewart Platformları; havacılık simülatörlerinden tıp alanındaki cerrahi robotlara, savunma sanayisindeki hassas yönlendirme sistemlerinden endüstriyel imalata kadar pek çok kritik alanda büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, altı serbestlik dereceli (6-DOF) bir Stewart Platformu üzerine yerleştirilen top-plaka (ball-and-plate) sistemi aracılığıyla, platform üzerindeki bir topun konumunun otonom ve hassas bir şekilde kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Proje sürecinde öncelikle, sistemin altı eksenli karmaşık kinematik ve dinamik yapısı analiz edilmiş; ardından topun doğrusal olmayan hareket dinamiklerini açıklayan matematiksel model ile durum-uzay (state-space) denklemleri detaylı bir şekilde çıkarılmıştır. Konum algılayıcı geri besleme mekanizması olarak, geleneksel kamera tabanlı sistemlerin yerine rezistif dokunmatik ekran kullanılmıştır. Bu yenilikçi yaklaşım sayesinde, görüntü işleme algoritmalarında sıkça karşılaşılan yüksek işlemci yükü, gecikme ve ortam ışığına duyarlılık gibi temel sorunlar aşarak kontrolcüye çok daha hızlı ve verimli bir analog veri akışı sağlanmıştır. Sistemin dinamik dengesini sağlamak ve yörünge takibini optimize etmek amacıyla, klasik PID, durum-uzay tabanlı LQR ve integral etkili LQI kontrol stratejileri MATLAB/Simulink ortamında ayrı ayrı modellenerek karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Yapılan dinamik simülasyon çalışmaları sonucunda, LQI kontrol algoritmasının dışarıdan gelen bozucu etkilere ve sistemin eylemsizliğine rağmen, kalıcı durum hatasını ortadan kaldırarak topu hedeflenen referans yörüngelerinde (daire, kare, sekiz) sıfıra yakın hata ile başarıyla dengelediği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan kapalı döngü gürbüz kontrol mimarisinin askeri ve endüstriyel hassas stabilizasyon projelerinde güvenle kullanılabileceğini açıkça göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Stewart Platformu, Top-Plaka Sistemi, Gürbüz Kontrol, LQI Algoritması, Rezistif Dokunmatik Panel

Robust Control of a Six Degrees of Freedom (6-DOF) Ball-and-Plate System

Abstract

Due to their high load-bearing capacity, rigid structure, and millimetric positioning capabilities, Stewart Platforms hold significant importance in numerous critical fields, ranging from aviation simulators and surgical robots to precision targeting systems in the defense industry and industrial manufacturing. This study aims to autonomously and precisely control the position of a ball on a ball-and-plate system integrated into a six-degree-of-freedom (6-DOF) Stewart Platform. During the project, the complex kinematic and dynamic structure of the six-axis system was first analyzed; then, the mathematical models and state-space equations describing the non-linear motion dynamics of the ball were derived in detail. As the position-sensing feedback mechanism, a resistive touch screen was utilized instead of traditional camera-based systems. Through this innovative approach, fundamental issues commonly encountered in image processing algorithms, such as high processor load, latency, and sensitivity to ambient light, were overcome, providing a much faster and more efficient analog data flow to the controller. To establish the dynamic stability of the system and optimize trajectory tracking, classical PID, state-space-based LQR, and integral-action LQI control strategies were individually modeled and comparatively tested in the MATLAB/Simulink environment. As a result of the dynamic simulation studies, it was observed that the LQI control algorithm successfully balanced the ball on targeted reference trajectories with near-zero error by eliminating steady-state error, despite external disturbances and system inertia. The obtained results clearly indicate that the designed closed-loop robust control architecture can be safely utilized in high-precision stabilization projects.

Keywords: Stewart Platform, Ball-and-Plate System, Robust Control, LQI Algorithm, Resistive Touch Panel

1. Giriş

Günümüzde endüstriyel otomasyon ve robotik teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, üretim ve hizmet sektörlerinde daha stabil ve hassas sistemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Geleneksel endüstride yaygın olarak tercih edilen 2 ve 3 eksenli mekanizmalar, kısıtlı hareket kabiliyetleri nedeniyle üç boyutlu uzaydaki karmaşık sarsıntıları sönmölemek mekanik olarak yetersiz kalmaktadır. Özellikle havacılık, mikro-cerrahi ve otonom sistemler gibi kritik alanlarda, dış bozuculara karşı milisaniyeler içinde tepki veren anlık dengeleme yeteneği en temel mühendislik gereksinimlerinden biri haline gelmiştir.

Stewart platformları, bu tür hassas konumlandırma ve dengeleme problemlerini çözmek için geliştirilmiş 6 serbestlik dereceli paralel kinematik mekanizmalardır. Bu platformlar, yükü tek bir noktaya bindirmek yerine altı bağımsız aktüatör koluna dağıtarak üstün bir mekanik dayanım ve nerdeyse kusursuz hareket sağlar.

Literatürdeki top-plaka sistemlerinin büyük bir çoğunluğunda, konum algılayıcı olarak harici kameralar ve görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. Ancak görüntü işleme tabanlı bu donanımların; ortam ışığındaki değişimlere karşı duyarlılık, gölge problemleri ve işlemci yükünden kaynaklanan yüksek veri işleme gecikmeleri gibi operasyonel dezavantajları bulunur. Bu dezavantajları gidermek ve kontrol döngüsünü hızlandırmak amacıyla, aydınlatmadan bağımsız ve anlık analog veri akışı sağlayabilen rezistif dokunmatik ekranların doğrudan konum sensörü olarak kullanılması, sistem performansını ciddi şekilde artırmaktadır.

Literatürde, 6 serbestlik dereceli paralel mekanizmaların doğrusal olmayan karmaşık yapısını ortaya koyan kinematik ve dinamik modellemeleri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır [1]. Stewart platformu üzerine yerleştirilmiş top ve plaka sistemlerinin dengelenmesi problemi, geleneksel ve modern kontrol teorilerinin test edildiği popüler bir araştırma konusudur [2]. Bu bağlamda, platformun yörünge takip hassasiyetini artırmak ve bozucu etkilere karşı kararlılığını sağlamak amacıyla

literatürde farklı kontrol algoritmaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [3], [4]. Özellikle geleneksel PID denetleyicilerin eylemsizlik etkilerini sönümlemedeki yetersizliklerine karşı, gelişmiş modern kontrol algoritmaları ve öngörülü yöntemler kullanılarak sistemin yörünge takip performansının belirgin şekilde artırılabilirdiği kanıtlanmıştır [5].

Literatürdeki bu temel bulguları referans alan bu çalışmada, kamera tabanlı sensörlerin sınırlarını aşmak amacıyla 6 eksenli bir Stewart top-plaka platformu tasarlanmış ve PID, LQR, LQI kontrolcülerinin sistem üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Projenin amacı, hareketli tabla üzerindeki serbest bir topu dış bozucu etkilere karşı otonom şekilde merkezde tutmak ve önceden belirlenen yörüngelerde yönlendirmektir. Bu doğrultuda, kamera yerine dokunmatik ekran kullanılarak elde edilen daha az gecikmeli koordinat verileri, PID, LQR ve LQI kontrol algoritmalarıyla işlenmiş ve 6 adet servo motorun eşzamanlı hareketine dönüştürülmüştür.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde, tasarlanan 6 serbestlik dereceli Stewart top dengeleme platformunun donanımsal bileşenleri, kinematik altyapısı ve kapalı çevrim kontrol sistemine uygulanan analiz yöntemleri detaylandırıldı.

2.1. Mekanik Tasarım ve Kullanılan Malzemeler

Piyasada otonom konumlandırma ve aktif denge sistemleri tasarlamak için birçok farklı donanım ve sensör seçeneği bulunmaktadır. Bu çalışmada amacımız, 6 serbestlik dereceli bir Stewart platformu inşa etmek ve platformun üzerine konulan topu düşürmeden merkezde dengelemek veya topun platform yüzeyinde geometrik yörüngeleri otonom olarak takip etmesini sağlamaktır. Sistem, topun anlık hareketlerine milisaniyeler içinde tepki vermek zorundadır. Bu dinamik gereksinimleri karşılamak amacıyla; piyasada yaygın olarak bulunabilen, yüksek hızlı reaksiyon süresine sahip servo motorlar ve bu motorların ürettiği dairesel gücü üst tablaya mekanik olarak aktaracak aktüatör kolları seçilmiştir. Altı adet motorun senkronize çalışması sayesinde platform, uzaydaki tüm eksenlerde istenilen eğim açısını saniyenin küçük bir kesitinde alabilmektedir.

Sistemin en kritik noktası olan topun nerede olduğunu anlama aşamasında ise geleneksel yöntemlerin dışına çıkmıştır. Bu tür projelerde genellikle kamera tabanlı görsel sensörler tercih edilse de kameraların önemli dezavantajları vardır: ortamdaki ışığın azalması veya platforma gölge düşmesi sistemin kör olmasına yol açabilir. Daha da önemlisi, kameranın aldığı görüntüleri mikrodenetleyicinin kare kare analiz edip topun piksel koordinatlarını bulmaya çalışması ciddi bir işlemci yükü ve gecikme yaratır. Görüntü işleme algoritmalarının ortaya çıkardığı bu zorlukları aşmak için kameraya alternatif olarak bu çalışmada rezistif dokunmatik panel kullanılmıştır. Bu tercih sayesinde ortam koşullarından bağımsız bir şekilde, topun X ve Y eksenindeki konumu karmaşık matematiksel hesaplama gerektirmeden, sifıra yakın bir gecikmeyle kontrolcüye iletilmektedir. Rezistif ekran, topun fiziksel ağırlığıyla yüzeye yaptığı mekanik baskıyı anında analog voltaj değişimine çevirir böylece topun pozisyonu kolaylıkla hesaplanabilir.

Projenin mekanik iskeletinin oluşturulması aşamasında ise deneme-yanılma maliyetlerini düşürmek ve parçaları özel ölçülerde üretebilmek için bilgisayar destekli tasarım yöntemlerine başvurulmuştur. Bu doğrultuda Autodesk Fusion 360 yazılımı kullanılarak alt gövde, üst hareketli tabla ve motor bağlantı aparatlarının 3 boyutlu modelleri tasarlanmıştır. Sistemin inşasında kullanılan tüm ana materyaller, sahip oldukları teknik özellikler ve mekanizma içindeki görevleri Tablo 1’de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Sistem Tasarımında Kullanılan Donanım Bileşenleri ve Görevleri

Malzeme	Teknik Özellik / Model	Adet	Sistemdeki Görevi
Servo Motor	Tower Pro MG996 – RC 180° Servo Motor	6	6 eksenli Stewart platformunun hareket tahrikini sağlamak; kontrolcüden gelen sinyallere göre platformun eğim açılarını ayarlamak.
Ekran Okuyucu Kart	Green Touch Resistif Dokunmatik Ekran Okuyucu Kart	1	Dokunmatik panelden gelen analog değişimlerini okuyarak dijital koordinat verisine dönüştürmek ve mikrodenetleyiciye iletmek.
Ekran	10.2 Inch AMT Resistive Touch Panel	1	Dengeleme sistemi üzerindeki topun anlık konumunu algılayan kapalı çevrim geribildirim sensörü olarak işlev görmek.
Geliştirme Kartı	ESP32-WROOM-32 32S Wifi Bluetooth Çift Çekirdek	1	Sistemin ana işlem birimi; konum sensöründen alınan verileri işleyip kontrol algoritmalarını çalıştırarak motorlar için gerekli tetikleme sinyallerini üretmek.
Aktüatör Bağlantı Çubuğu	12 cm uzunluğunda metal mil	6	Servo motor kolları ile üst platform arasındaki doğrusal mekanik bağlantıyı ve güç aktarımını sağlamak.
Küresel Aktüatör Bağlantı Çubuk Başlığı	3D Baskı (3 cm uzunluk, 5 mm iç çap, 7 mm küresel delik)	12	Hareketli parçalar arasındaki açısal esnekliği sağlayarak platformun serbestlik derecesinkısıtlamadan kinematik hareketine olanak tanımak.
Pertinaks	Delikli Pertinaks	1	Geliştirme kartı, servo motor güç dağıtımı ve sinyal hatları için temel elektronik devre altyapısını oluşturmak.
3D Baskı Malzemesi	Petg Filament		Platformun alt tabanı, üst tepsisi ve motor tutucu yuvaları gibi yapısal mekanik parçalarının özel ölçülerde üretimi.

2.2. Metot

Bu çalışmada, Stewart platformu üzerindeki topun anlık konumu kapalı çevrim, kontrol mimarisi ile denetlenmiştir. Sistemin çalışma mantığı; topun dinamik hareket denklemlerinin matematiksel olarak çıkarılması, konum verisinin filtrelenerek okunması, kontrol algoritmalarının oluşturulması ve motorlara ters kinematik ile komut gönderilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

2.2.1. Sistemin Dinamik Modeli ve Transfer Fonksiyonu

Platform üzerindeki topun hareketini kontrol edebilmek için öncelikle sistemin matematiksel modeli Newton-Euler denklemleri ile hesaplanmıştır. Topun X eksenindeki hareketini tanımlayan genel dinamik denklem şu şekildedir:

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right)\ddot{x}_b - m_b(x_b\alpha^2 + y_b\dot{\alpha}\dot{\beta}) + m_bg \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

Burada mbtopun kütesini, Ibeylemsizlik momentini, rb topun yarıçapını, g yerçekimi ivmesini ve platformun X eksenindeki eğim açısını temsil etmektedir. Sistemi doğrusal hale getirebilmek için iki önemli varsayım yapılmıştır:

1-Platformun çalışma açıları küçük olduğundan, küçük açı yaklaşımı kullanılmış ve $\sin(\alpha) \approx \alpha$ kabul edilmiştir.

2-Platformun çok yüksek hızlarda dönme hareketi yapmayacağı öngörülerek, açısal hızların karesi ve çarpımları ($2\approx 0$ ve ≈ 0) sıfıra çok yakın kabul edilerek ihmal edilmiştir.

Bu kabuller altında denklem sadeleştirildiğinde topun ivmesi şu hali alır:

$$\ddot{x}_b = -\left(\frac{m_b g}{m_b + I_b / r_b^2}\right) \alpha \quad (2)$$

Kullanılan top içi dolu bir küre olduğu için eylemsizlik momenti $I_b = 25 m_b r_b^2$ olarak formüle dahil edilmiştir. Kütle ve yarıçap değerleri sadeleştirildiğinde, topun doğrusal ivmesi ile platformun eğim açısı arasındaki ilişki şu denkleme dönüşür:

$$\ddot{x}_b = \frac{5}{7} g \alpha \quad (3)$$

Yerçekimi ivmesi $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ olarak alındığında ivme denklemi $\ddot{x}_b = 7.007 \alpha$ olarak hesaplanmıştır. Geleneksel PID kontrolcülerin simülasyon ve tasarımında kullanılmak üzere, bu diferansiyel denklemin Laplace dönüşümü alınarak sistemin s düzlemindeki transfer fonksiyonu şu şekilde elde edilmiştir:

$$\frac{x_b(s)}{\alpha(s)} = \frac{7.007}{s^2} \quad (4)$$

PID algoritmaları bu transfer fonksiyonu üzerinden olarak tasarlanırken; LQR ve LQI kontrolcülerini için platformun hareketini bir bütün olarak ele alan matris tabanlı Durum-Uzay ayrıca oluşturulmuştur.

Durum-Uzay denklemini oluşturmak için, sistemin durum vektörü olarak; $X = (x, \dot{x}, y, \dot{y})$ ve plakanın açıları; α ve β kontrol girdisi olarak ele alınırsa, sistemin durum uzayı gösterimi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (5)$$

$$Y = CX \quad (6)$$

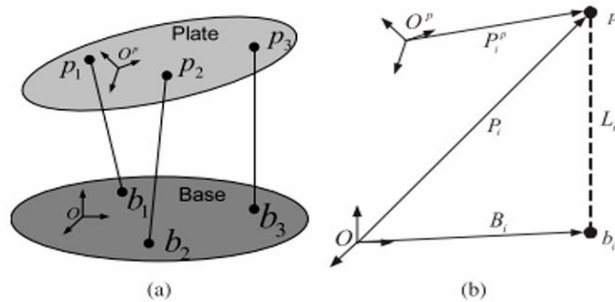
Burada sistem matrisleri aşağıdaki gibidir:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = -\frac{5}{7}g \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

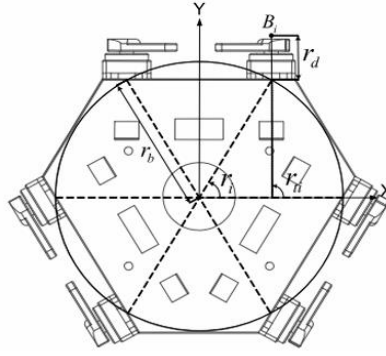
Yukarıdaki sistem tamamen kontrol edilebilir ve gözlemlenebilirdir. Bunun nedeni, kontrol edilebilirlik matrisi ile gözlemlenebilirlik matrisinin rank değerlerinin her ikisinin de ele alınan sistem durumunun boyutuna eşit olacak şekilde olmasıdır.

2.2.2. Ters Kinematik Analizi

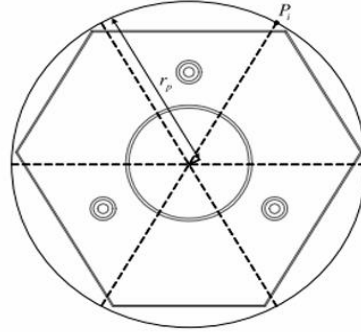
Plakanın açıları olan α ve β , daha önce elde edilen sistemin girişleri olduğundan, altı adet servo motorun gerekli açılarını belirlemek için ters kinematik analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Altı eksenli top dengeleme robot platformu, servo motorlara dayanan altı adet döner aktüatör kullanılmaktadır. Ters kinematik denklemleri Şekiller 1-4'de verilen parametreler kullanılarak oluşturulmuştur.



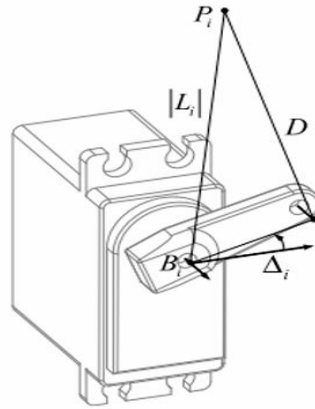
Şekil 1. Sistemin koordinatları ve ters kinematik için kullanılan vektörler gösterimi [6]



Şekil 2. Bivektörü ve açılarının gösterimi



Şekil 3. Üst plaka ve P_i vektörünün gösterimi



Şekil 4. L_i değişken ve sabit parametrelerin gösterimi [6]

$$R_b = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta - \cos \alpha & \cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}, T_b = \begin{bmatrix} x_{0P} \\ y_{0P} \\ z_{0P} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_i = R_b P_i^p + T_b \quad (9)$$

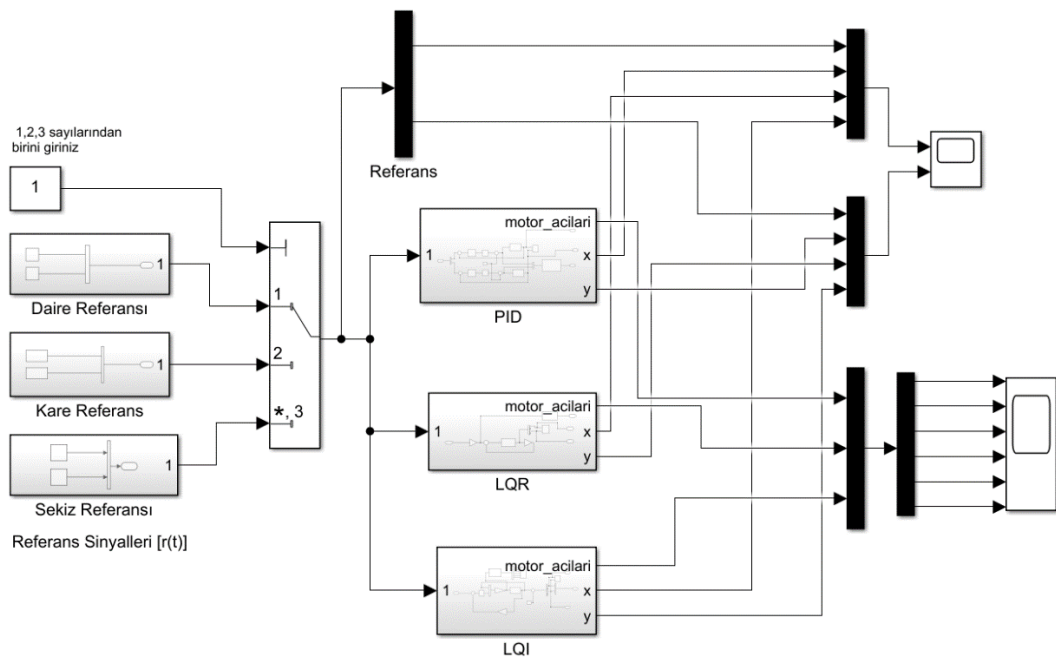
$$L_i = P_i - B_i \quad (10)$$

Tasarlanan LQR denetleyicisi için sistemin durum-uzay temsili kullanılarak, kontrol maliyeti ile yörünge hatası arasındaki dengeyi sağlayan maliyet fonksiyonu Denklem 8’de tanımlanmıştır. Bu fonksiyonu minimize eden ve sistemin kararlılığını garanti altına alan optimal kazanç matrisinin K hesaplanma yöntemi Denklem 9’da sunulmuştur. LQI kontrolcü tasarımında ise, bu matematiksel yapıya bir integral durum değişkeni dahil edilerek oluşturulan genişletilmiş durum-uzay modeli Denklem 10’da gösterilmiştir. Bu entegrasyon sayesinde, LQR’ın sağladığı dinamik performans korunurken, kalıcı durum hataları tamamen ortadan kaldırılarak referans yörüngelerin sifıra yakın hata ile takibi başarılmıştır.

2.2.3. Simülasyon Modeli

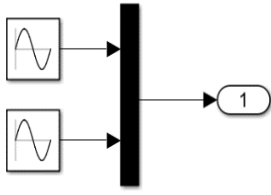
Elde edilen matematiksel dinamik model ve ters kinematik denklemlerinin doğrulamasını yapmak, ayrıca kontrol algoritmalarının PID, LQR, LQI fiziksel donanıma uygulanmadan önceki teorik limitlerini belirlemek amacıyla Şekil 5'teki MATLAB/Simulink ortamında bir sistem modeli oluşturulmuştur.

Oluşturulan bu simülasyon modelinde; topun hareketini temsil eden transfer fonksiyonu ve durum-uzay matrisleri, geri besleme döngüsü ve kontrolcü blokları birbirine entegre edilmiştir. Kontrolcülerden çıkan düzeltici ve eğim açıları, sanal sisteme uygulanarak topun hedeflenen X ve Y koordinatlarına ne kadar sürede ve yüzde kaç aşım ile oturduğu analiz edilmiştir.

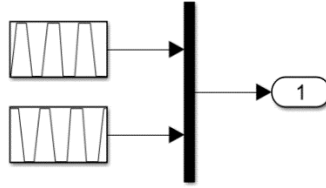


Şekil 5. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan sistem modeli

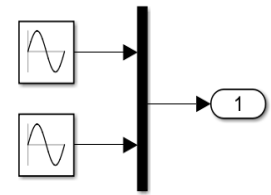
Sistemin modüler yapısını ve kontrol hiyerarşisini göstermek adına; referans yörünge üreteçlerine ait alt sistem blok diyagramları Şekil 6, 7 ve 8’de; denetim algoritmalarına (PID, LQR, LQI) ait kontrolör yapıları ise sırasıyla Şekil 9, 10 ve 11’de verilmiştir.



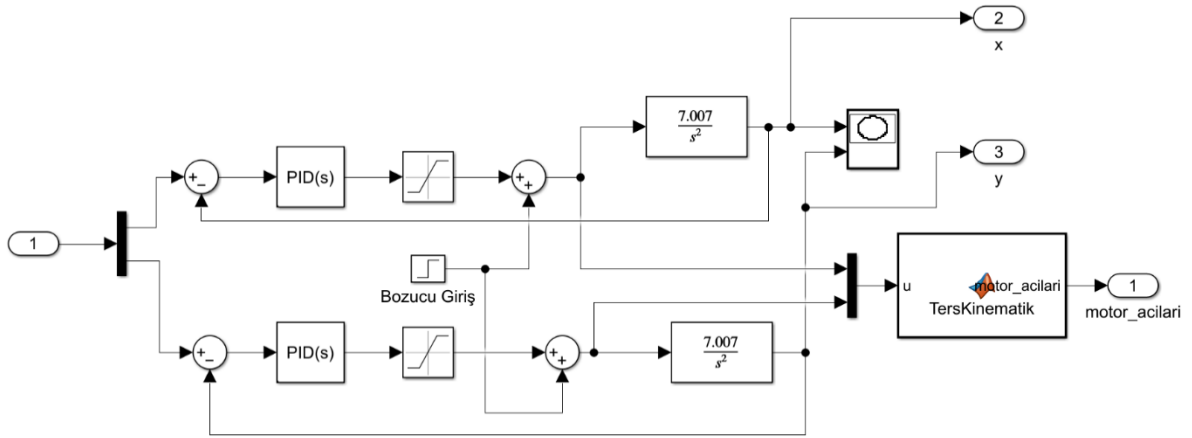
Şekil 6. Daire Referansı



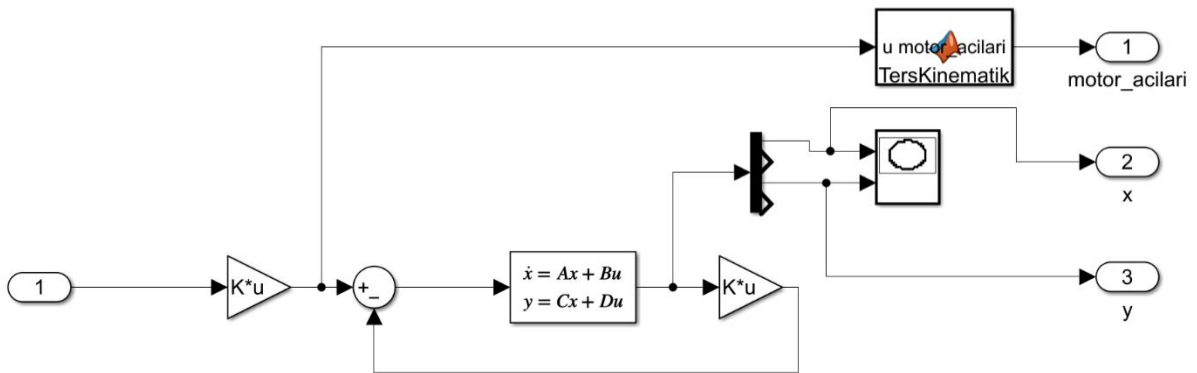
Şekil 7. Kare Referansı



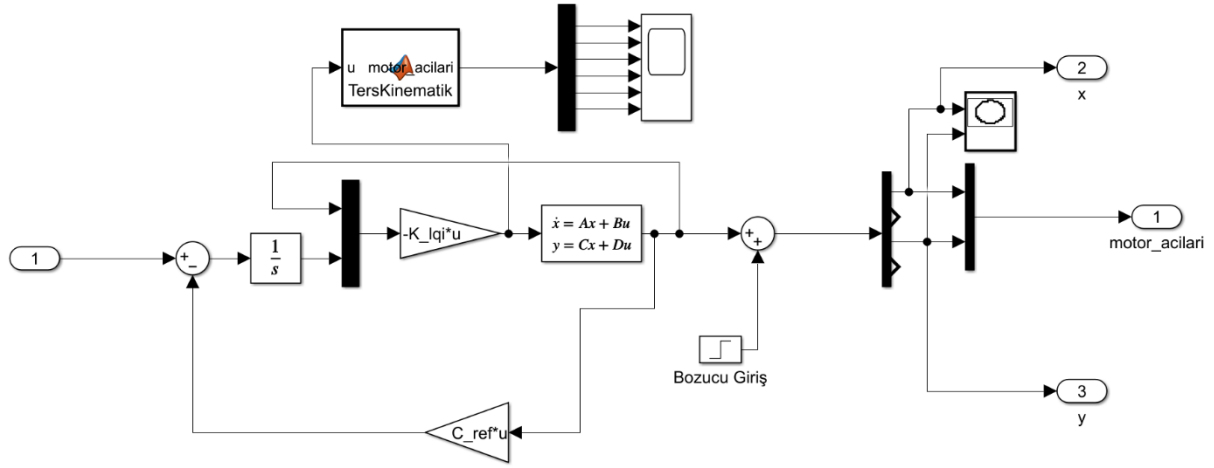
Şekil 8. Sekiz Referansı



Şekil 9. PID Kontrolör Tasarımı



Şekil 10. LQR Kontrolör Tasarımı



Şekil 11. LQI Kontrolör Tasarımı

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, MATLAB/Simulink ortamında matematiksel modeli kurulan 6 serbestlik dereceli Stewart platformunun kapalı çevrim kontrol performansına ait elde edilen simülasyon bulguları sunulmuş ve tartışılmıştır. Sistemin anlık dinamik davranışını ve bozucu etkilere karşı kararlılığını analiz etmek amacıyla; geleneksel PID, durum-uzay tabanlı LQR ve integral etkili LQI kontrol algoritmaları test edilmiştir. Geliştirilen kontrol algoritmalarının dengeleme başarıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir:

Dinamik Yörünge Takibi: Topun platform üzerinde belirlenen geometrik referansları (daire, kare ve sekiz) takip etme hassasiyeti ve sürekli hal hatası analizi.

3.1. Simülasyon Sonuçları

MATLAB/Simulink ortamında modellenen 6 serbestlik dereceli Stewart platformunun kapalı çevrim kontrol başarısı, dinamik yörünge takip testleri ile analiz edilmiştir. Bu testlerin temel amacı; geleneksel PID, durum-uzay tabanlı LQR ve integral etkili LQI kontrol algoritmalarının, sisteme referans olarak verilen matematiksel geometrileri (daire, kare ve sekiz) izleme yeteneklerini ve X-Y eksenlerindeki anlık konum hatalarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Her üç kontrolcüye ait X-Y düzlemindeki iki boyutlu harita çıktıları ve zaman eksenli yörünge takip sapmaları (Scope); dairesel yörünge için Şekil 12 ve 13'te, kare yörünge için Şekil 14 ve 15'te, sekiz yörüngesi için ise Şekil 16 ve 17'de detaylı olarak sunulmuştur.

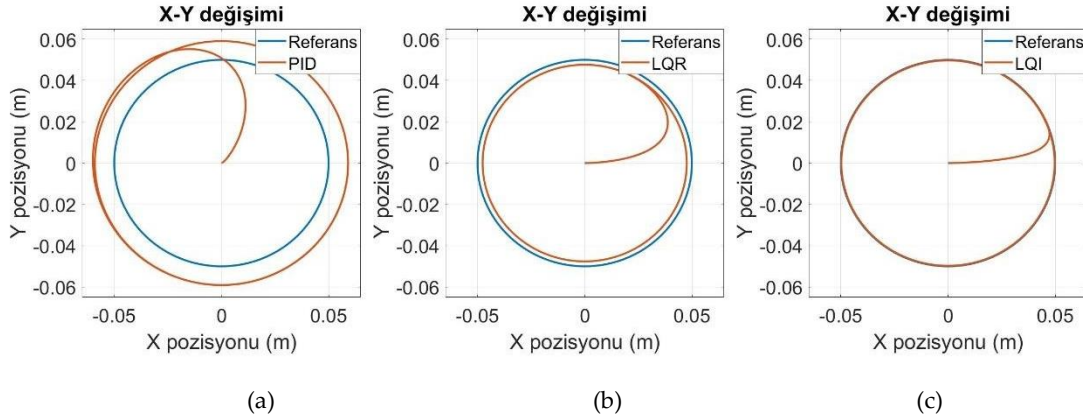
3.1.1. Dairesel Yörünge Takibi

Şekil 12 ve Şekil 13'te sunulan dairesel yörünge simülasyon çıktıları incelendiğinde, sistemin sürekli değişen trigonometrik referanslara verdiği dinamik tepkiler görülmektedir.

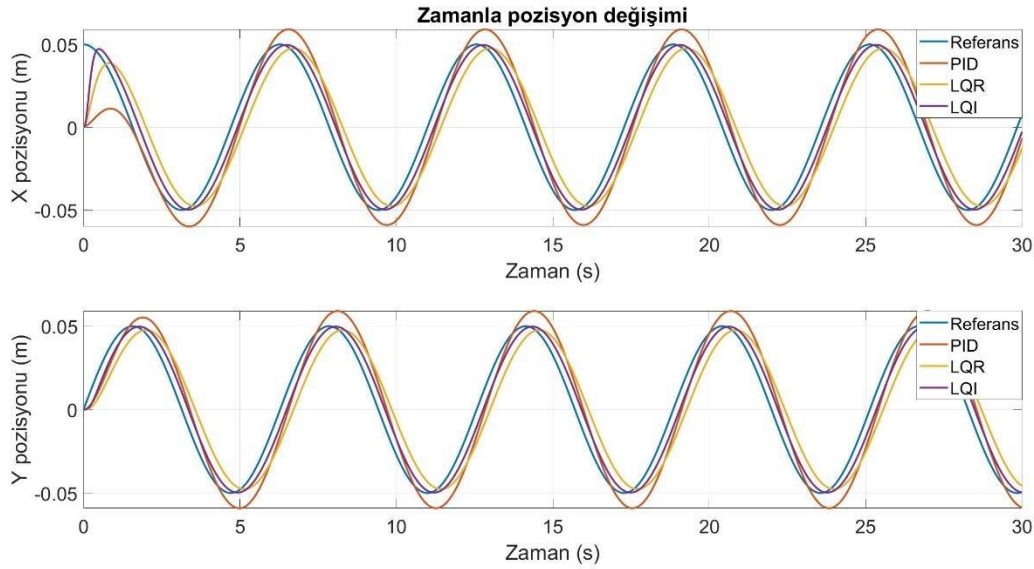
PID Kontrolcü: Sürekli yön değiştiren ivmeli referans sinyaline yetişmekte zorlanarak faz gecikmesi yaşamıştır. Bu durum, Şekil 12-a'daki X-Y haritasında dairenin referans ekseninden kaymasıyla ve Şekil 13'teki Scope grafiğinde mavi çizginin sarı referansı geriden takip etmesiyle net bir şekilde görülmektedir.

LQR Kontrolcü: Durum geri beslemesi sayesinde faz gecikmesini büyük ölçüde telafi etmiş (Şekil 13, turuncu çizgi) ve topu referans çizgiye yaklaştırmıştır. Ancak eylemsizlikten kaynaklı olarak Şekil 12-b'de merkezden dışa doğru minimal bir kalıcı durum hatası gözlemlenmiştir.

LQI Kontrolcü: İntegral eyleminin hata birikimini sıfırlama yeteneği sayesinde bu ofset değerini tamamen ortadan kaldırmıştır. Şekil 13'te LQI (yeşil çizgi) referans ile kusursuz bir örtüşme sağlarken, Şekil 12-c'de ideal dairesel form sıfır sapma ile çizilmiştir.



Şekil 12. Dairesel referans yörüngesinin X-Y düzlem geometrik şekilleri (a) PID, (b) LQR, (c) LQI



Şekil 13. Dairesel yörünge için X ve Y eksenlerindeki grafikleri.

3.1.2 Kare Yörünge Takibi

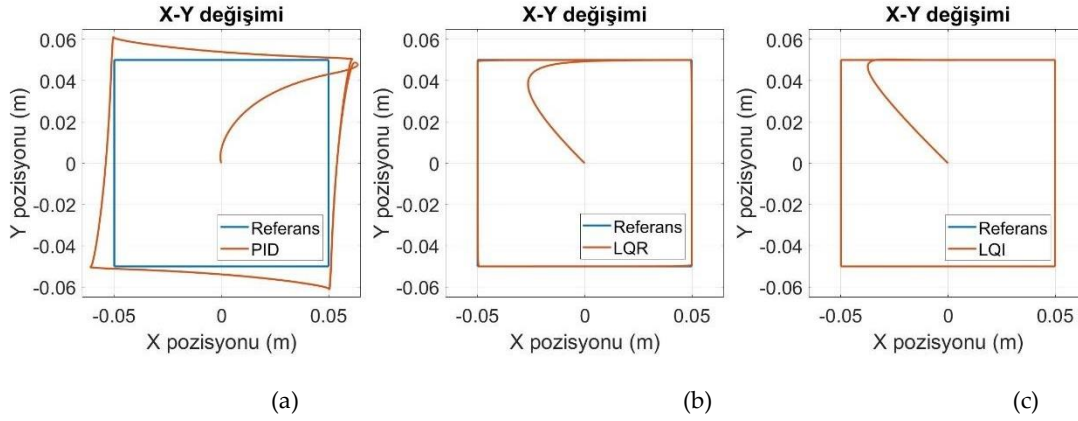
Sistemin ani yön değişimlerine ve sert referans geçişlerine verdiği tepkiyi ölçmek amacıyla kare yörünge testi gerçekleştirilmiştir. Kare yörünge, köşelerdeki süreksizlikler nedeniyle eylemsizlik momentinin kontrolcü üzerindeki etkisini en net gösteren referans türüdür. Şekil 14 ve Şekil 15'te sunulan kare yörünge simülasyon çıktıları incelendiğinde, denetim algoritmalarının geçici rejim davranışları arasındaki farklar belirginleşmektedir.

PID Kontrolcü: Karenin köşelerindeki ani referans değişimlerine (basamak etkisi) karşı sistemin eylemsizliğini sönmölemekte yetersiz kalmıştır. Şekil 14-a'daki X-Y haritasında görüldüğü üzere köşelerde ciddi savrulmalar yaşanmış, Şekil 15'teki mavi çizgide ise yüksek oranda aşım ve yerleşme süresini uzatan şiddetli salınımlar gözlemlenmiştir.

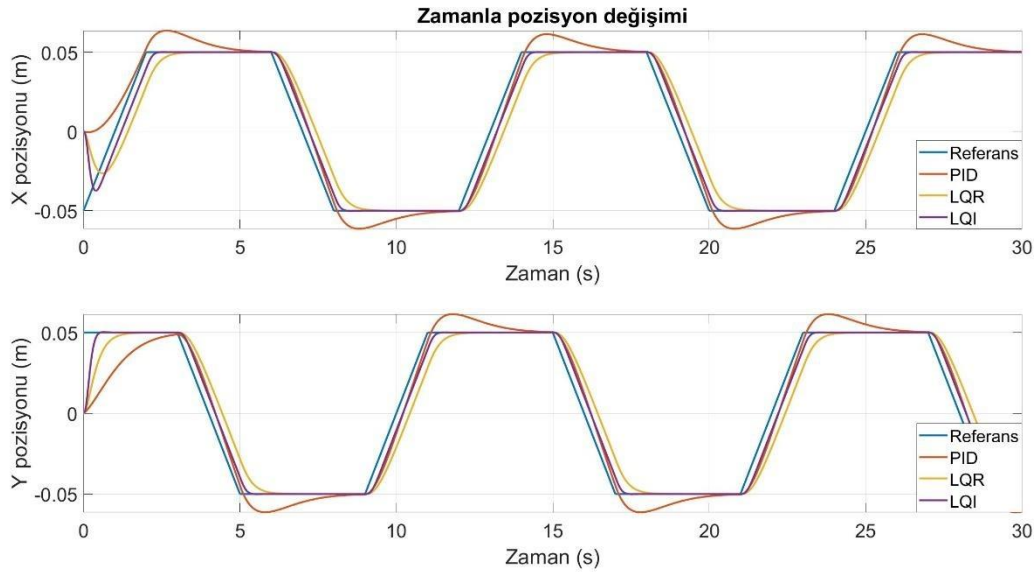
LQR Kontrolcü: Durum geri beslemesi sayesinde PID'ye oranla çok daha kararlı bir tutum sergilemiş ve salınımları hızla sönmölemiştir. Ancak, X-Y haritasında (Şekil 14-b) köşelerdeki keskin

dönüşlerde hafif yuvarlanmalar meydana gelmiş ve Scope verisinde (Şekil 15, turuncu çizgi) referansın çok az gerisinde kalarak küçük bir kalıcı durum hatası oluşturmuştur.

LQI Kontrolcü: Yapısındaki integral bloğu sayesinde kalıcı durum hatasını tamamen ortadan kaldırmıştır. Şekil 15'te yeşil (LQI) çizginin sarı referans sinyaline tam uyum sağladığı, Şekil 14-c'deki X-Y haritasında ise köşelerin eylemsizlik savrulması yaşanmadan otonom olarak "keskin" bir doğrulukla dönüldüğü kanıtlanmıştır. Bu bulgular, LQI algoritmasının ani yön değişimlerinde dahi gürbüz bir performans sunduğunu göstermektedir.



Şekil 14. Kare referans yörüngesinin X-Y düzlem haritaları; (a) PID, (b) LQR, (c) LQI



Şekil 15. Kare yörünge için X ve Y eksenlerindeki grafikleri.

3.1.3. Sekiz (Lemniskat) Yörünge Takip Performansı

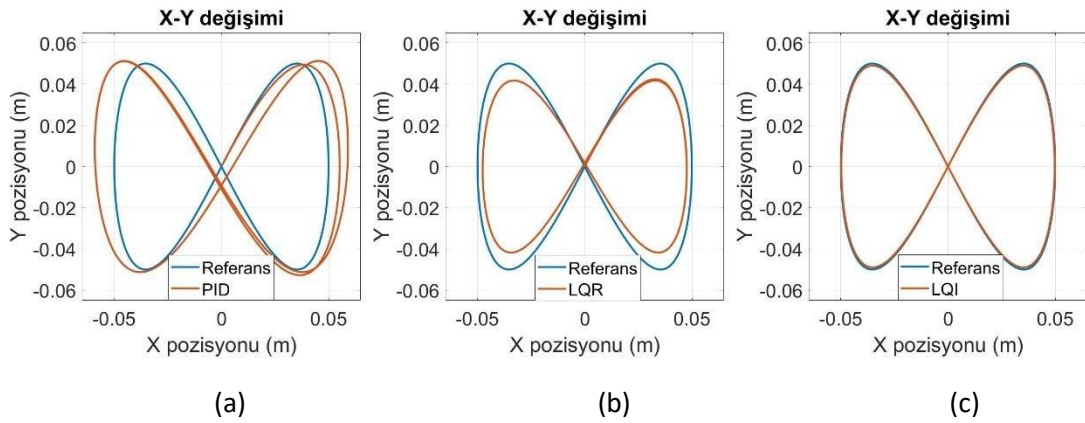
Sistemin sürekli değişen ivme ve değişken eğrilik yarıçaplarına sahip karmaşık rotalardaki başarısını ölçmek amacıyla sekiz (lemniskat) yörünge testi uygulanmıştır. Bu test, X ve Y eksenlerine uygulanan referans sinyallerinin çapraz etkileşimini kontrolcünün dinamik gürbüzlüğüne analiz etmek için kritik öneme sahiptir. Şekil 16 ve Şekil 17'de yer alan veriler doğrultusunda, karmaşık yörünge takibinde algoritmaların sergilediği performanslar şu şekilde özetlenmiştir:

PID Kontrolcü: Sürekli değişen yön ve ivme değerlerine uyum sağlamakta belirgin bir zorluk yaşamıştır. Şekil 16-a'daki X-Y haritasında görüldüğü üzere, özellikle merkezdeki çapraz geçiş noktalarında ve dönüş kavislerinde referans geometriden sapmalar meydana gelmiştir. Şekil 17'deki

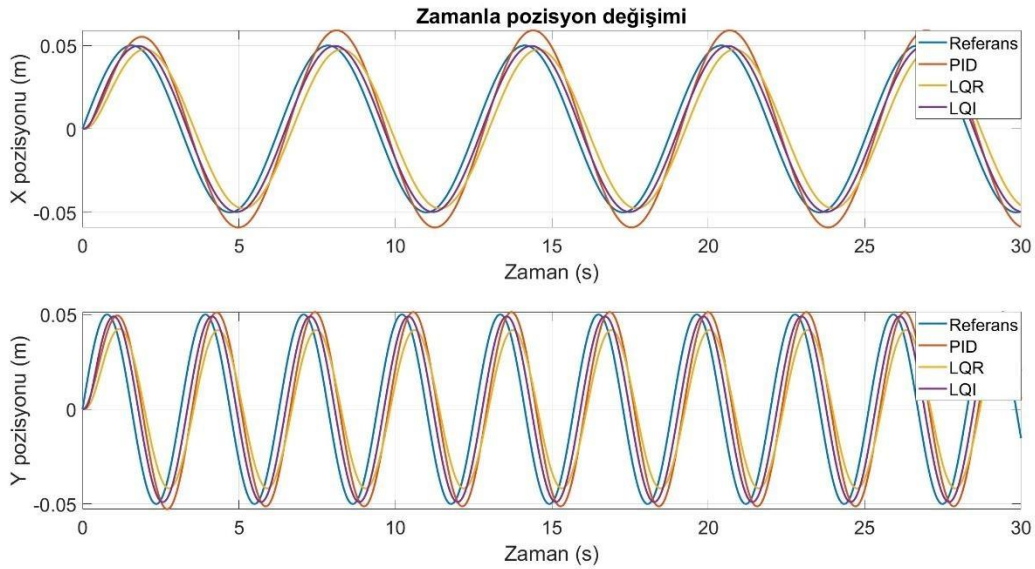
Scope çıktısında (mavi çizgi), PID'nin referans sinyalini belirgin bir faz gecikmesiyle takip ettiği ve bu durumun yörünge formunda bozulmalara yol açtığı saptanmıştır.

LQR Kontrolcü: Durum-uzay geri beslemesi sayesinde PID'nin yaşadığı salınım ve gecikme problemlerini büyük oranda minimize etmiştir. Şekil 16-b'de görüldüğü üzere sekiz formu genel hatlarıyla korunmuş olsa da kavis noktalarında sistemin non-lineer dinamikleri nedeniyle referans çizgi ile gerçekleşen yörünge arasında dar bir ofset hatası oluşmuştur.

LQI Kontrolcü: Karmaşık yörünge takibinde en üstün performansı sergilemiştir. Şekil 17'deki zaman-hata grafiğinde yeşil (LQI) çizginin, değişken frekanslı referans sinyalleriyle tam bir örtüşme sağladığı izlenmektedir. Şekil 16-c'de sunulan X-Y haritası, LQI kontrolcüsünün integral etkisi sayesinde çapraz geçişlerdeki ani dinamik değişimleri ve değişken eğrilikleri sıfıra yakın hata ile yönettiğini kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar, LQI algoritmasının Stewart platformu gibi ileri derece serbestliğe sahip sistemlerde yüksek hassasiyetli kontrol kapasitesini doğrulamaktadır.



Şekil 16. Sekiz (lemniskat) referans yörüngesinin X-Y düzlem haritaları; (a) PID, (b) LQR, (c) LQI



Şekil 17. Sekiz (lemniskat) yörüngesi için X ve Y eksenlerindeki grafikleri.

4. Sonuç

Bu çalışmada, üç boyutlu uzayda anlık dengeleme ve yüksek hassasiyetli konumlandırma gereksinimlerine yenilikçi bir çözüm sunmak amacıyla 6 eksenli bir Stewart platformu tasarlanmış ve üzerine entegre edilen top-plaka (ball and plate) sisteminin yörünge takip performansı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen düşük gecikmeli koordinat verileri sayesinde sistemin dinamik tepki

süresi kısaltılmış ve uygulanacak kontrol algoritmalarının sınırları çok daha net bir şekilde test edilebilir hale gelmiştir.

Sistemin donanımsal altyapısı kurgulandıktan sonra, 6 eksenli paralel kinematik yapının ve üzerinde serbestçe hareket eden topun doğrusal olmayan karmaşık matematiksel modeli çıkarılmıştır. Elde edilen bu denklemler, MATLAB/Simulink ortamında durum-uzay temsiline dönüştürülerek kontrol edilebilir formata getirilmiştir.

Tasarlanan model üzerinde endüstride en yaygın kullanıma sahip olan klasik PID, durum-uzay tabanlı optimal denetleyici LQR ve integral etkili LQI kontrolcü algoritmaları kurgulanmıştır. Bu üç farklı algoritmanın kapalı çevrim yörünge takip performansları; sistemin limitlerini farklı şekillerde zorlayan dairesel, kare ve sekiz (lemniskat) referans geometrileri kullanılarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen dinamik simülasyon testleri sonucunda, geleneksel PID kontrolcünün 6 eksenli platformun yüksek eylemsizlik momentini sönmlemede yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle kare yörünge testinde köşelerdeki ani yön değişimleri (basamak etkisi) esnasında PID kontrolcünün, X ve Y eksenleri arasındaki çapraz kuplaj etkileşimlerini yönetemeyerek yüksek aşım (overshoot) ve belirgin bir faz gecikmesi ürettiği gözlemlenmiştir. PID'nin bu yetersizliğine karşın, optimal kontrol teorisi üzerine inşa edilen durum geri beslemeli LQR algoritması, sistemin durum değişkenlerini matris olarak hesaba kattığı için PID'ye kıyasla platformu çok daha hızlı bir şekilde kararlı hale getirmiş ve salınımları sönmlemiştir. Ancak LQR kontrolcü, enerji ve hata arasındaki optimal dengeyi kursa da, yapısında bir integral mekanizması barındırmadığı için, sistemin fiziksel eylemsizliğinden kaynaklanan ve özellikle dairesel ile sekiz yörüngelerinde belirginleşen küçük ama sürekli bir kalıcı durum hatası üretmiştir. Buna karşın, kontrolcü tasarımında sistemin genişletilmiş durum matrisine bir integral durum değişkeni eklenerek kurgulanan LQI algoritması, hem PID'nin hem de LQR'ın tüm bu dezavantajlarını gidermeyi başarmıştır. LQI kontrolcüsü, integral etkisi sayesinde sistemdeki geçmiş hata birikimlerini hafızasında tutarak ve sürekli olarak sıfırlayarak en üstün performansı sergilemiştir. En karmaşık frekans değişimlerinin yaşandığı sekiz (lemniskat) yörüngesindeki çapraz geçişlerde ve kare yörüngesinin sert köşelerinde dahi top, LQI denetleyicisi ile referans çizgisinden sapmamış; kalıcı durum hatası tamamen ortadan kaldırılarak ideal yörünge ile örtüşme sağlanmıştır.

Sonuç olarak; donanımsal kısıtlamaların dokunmatik ekranla, yazılımsal kısıtlamaların ise optimal integral kontrol ile aşıldığı bu çalışmada, tasarlanan LQI denetleyicisinin etkinliği kanıtlanmıştır. Geliştirilen LQI algoritmasının, 6 eksenli Stewart platformu ve top-plaka gibi doğrusal olmayan, eylemsizliği yüksek karmaşık mekanik sistemlerde dış bozuculara karşı son derece gürbüz (robust), otonom ve yüksek hassasiyetli bir kontrol mimarisi sunduğu başarıyla ortaya konmuştur.

İlerleyen çalışmalarda, sistemin dış bozucu etkenlere ve parametre belirsizliklerine karşı direncini daha da artırmak adına Fuzzy (Bulanık) Mantık temelli kontrolörler ve H (H-sonsuz) gibi gürbüz kontrol teorileri üzerine derinlemesine analizlerin yapılması hedeflenmektedir. Bu sayede, 6-DOF Stewart platformlarının endüstriyel hassas konumlandırma ve savunma sanayii uygulamalarındaki kullanım potansiyelinin genişletilmesi öngörülmektedir.

Kaynaklar

- [1] T. J. Anderson, Kinematic Analysis and Simulation of 6-DOF Parallel Manipulators. Technical Research Report (2015).
- [2] R. Kumar, S. Singh, Ball and Plate System: Modeling and Control Using Various Techniques. International Journal of Applied Research (IJAR), 4(6) (2018) 230-235.

- [3] A. Yılmaz, M. Çelik, Stewart Platformu İçin Farklı Kontrol Algoritmalarının İncelenmesi. Journal of Innovative Science and Engineering (JISE), 6(1) (2022) 45-58.
- [4] S. M. R. S. Noorani, Comparison Between Different Methods of Control of 6-DOF Stewart Platform. Mechanical Systems and Signal Processing. (2019).
- [5] L. Zhang, H. Wang, Embedded Model Predictive Control for Enhancing Tracking Performance of Stewart Platforms. IEEE Transactions on Industrial Electronics. (2020).
- [6] F. Dal Cero, Ball and Plate MPC Control of a 6 DOF Stewart Platform. (2022).



Constraint Satisfaction Problem Yaklaşımıyla Zero Trust Ortamlarında Otomatik Yetkilendirme ve Erişim Optimizasyonu

Nefise Buse Uzun^{1*}, Cevat Özarpa²

^{1*}Ankara Medipol Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siber Güvenlik ABD,
nefise.uzun@std.ankamedipol.edu.tr

²Ankara Medipol Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siber Güvenlik ABD,
cevat.ozarpa@ankamedipol.edu.tr

Özet

Bu çalışmada kurumsal erişim kontrolü problemi, Kısıt Sağlama Problemi (Constraint Satisfaction Problem — CSP) çerçevesiyle yeniden modellenmiş ve Zero Trust mimarisine uygun, otomatik yetkilendirme üreten bir sistem geliştirilmiştir. Geleneksel RBAC yaklaşımlarında ölçek büyüdükçe politika çakışmalarının ve aşırı yetkilendirme risklerinin yönetimi giderek karmaşık hale gelmektedir. Bu durum özellikle büyük ölçekli kurumsal yapılarda iç tehdit ve yetkisiz erişim risklerini artırmaktadır. Önerilen modelde her (departman, sunucu) çifti bir CSP değişkeni olarak tanımlanmış; iş gereksinimleri alt sınır, güvenlik politikaları ise üst sınır kısıtları olarak kodlanmıştır. Kısıtlar; rol tabanlı erişim tavanları, Görevler Ayrılığı (SoD) kuralları ve Zero Trust kaynak izolasyon gereksinimleri olmak üzere üç katmanda modellenmiştir. 7 departman ve 8 sunucudan oluşan 56 değişkenli kurumsal ağ senaryosunda, MRV (Minimum Remaining Values) sezgisel yöntemiyle güçlendirilmiş, Backtracking algoritması uygulanmıştır. Sistem; 21 iş gereksinimi ve 13 güvenlik kısıtını eş zamanlı sağlayan geçerli erişim matrisine yalnızca 91 denemede ulaşmıştır. Teorik arama uzayı $4^{56} \approx 5,19 \times 10^{33}$ olasılık olmasına karşın kısıt yayılımı bu uzayı önemli ölçüde daraltmıştır. Düz Backtracking algoritmasına kıyasla çok daha az arama adımıyla çözüme ulaşılması, MRV sezgisel yönteminin pratik etkinliğini somut olarak ortaya koymaktadır. Üretilen erişim matrisi Least Privilege ilkesine uygun çözümler üretmekte; kritik kaynak izolasyonunu ve erişim tavanlarını otomatik olarak uygulamaktadır. Simüle edilen hatalı atama senaryolarında sistem, politika ihlallerini gerçek zamanlı olarak tespit edip reddetmiştir. Sonuçlar, CSP tabanlı yaklaşımın manuel RBAC yönetimine denetlenebilir, ölçeklenebilir ve tutarlı bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Kısıt Sağlama Problemi, Zero Trust, Erişim Kontrolü, Least Privilege, MRV sezgisel yöntemi, RBAC

Abstract

In this study, the enterprise access control problem is remodeled using the Constraint Satisfaction Problem (CSP) framework, and a system that automatically generates authorization, suitable for a Zero Trust architecture, is developed. In traditional RBAC approaches, managing policy conflicts and overauthorization risks becomes increasingly complex as the scale grows. This situation particularly increases the risks of internal threats and unauthorized access in large-scale enterprise structures. In the proposed model, each pair (department, server) is defined as a CSP variable; business requirements are coded as lower bounds, and security policies as upper bounds. Constraints are modeled in three layers:

role-based access ceilings, Separation of Duties (SoD) rules, and Zero Trust resource isolation requirements. In a 56-variable enterprise network scenario consisting of 7 departments and 8 servers, a Backtracking algorithm enhanced with the MRV (Minimum Remaining Values) heuristic method was applied. The system reached a valid access matrix that simultaneously satisfies 21 business requirements and 13 security constraints in only 91 attempts. Although the theoretical search space is $4^{56} \approx 5.19 \times 10^{33}$ possibilities, constraint propagation significantly narrowed this space. Reaching a solution with far fewer search steps compared to the straightforward backtracking algorithm concretely demonstrates the practical effectiveness of the MRV heuristic method. The generated access matrix produces solutions compliant with the Least Privilege principle; it automatically applies critical resource isolation and access ceilings. In simulated misassignment scenarios, the system detected and rejected policy violations in real time. The results show that the CSP-based approach offers a controllable, scalable, and consistent alternative to manual RBAC management.

Keywords: Constraint Management Problem, Zero Trust, Access Control, Least Privilege, MRV Heuristic, RBAC

1. Giriş

Kurumsal bilgi sistemlerinin ölçeği büyüdükçe erişim kontrolü, sistem yöneticilerinin sezgisel kararlarıyla yönetilemez hale gelmektedir. Yüzlerce kullanıcı, onlarca sunucu ve sürekli değişen iş rolleri; manuel yetkilendirme süreçlerinde kaçınılmaz olarak aşırı yetkilendirme (over-privileging) hatasına zemin hazırlar. Bu hata, bir kullanıcıya iş görevi için gerekenden fazla erişim hakkı tanınması anlamına gelir ve iç tehdit ile yanal hareket (lateral movement) saldırıları için doğrudan bir açık oluşturur. Verizon 2024 Veri İhlali Araştırma Raporu'na göre, onaylanan ihlallerde kimlik bilgisi kötüye kullanımı en yaygın ilk saldırı yöntemi olmaya devam etmektedir [1].

Bu sorunun çözümü olarak önerilen Sıfır Güven mimarisi (Zero Trust Architecture), "hiçbir kullanıcıya veya varlığa örtük olarak güvenilmemesi, her erişim talebinin sürekli doğrulanması" ilkesine dayanmaktadır [2]. CISA Zero Trust Olgunluk Modeli v2.0, bu ilkenin hayata geçirilebilmesi için erişim kontrol uygulamasının mümkün olduğunca ayrıntılı ve otomatik hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır [3]. RBAC gibi statik erişim kontrol modelleri, rol hiyerarşisi büyüdükçe politika çakışmalarının ve SoD ihlallerinin tespitini sistematik değil, büyük ölçüde idari denetim ve manuel incelemeye bırakmakta; bu durum özellikle ölçek aşırı yetkilendirme risklerinin artmasına neden olabilmektedir. [4, 5].

Bu çalışmada erişim kontrolü problemi, yapay zekâ ve matematiksel optimizasyon alanından gelen Kısıt Sağlama Problemi (Constraint Satisfaction Problem — CSP) çerçevesiyle yeniden modellenmektedir. Tıpkı bir Sudoku bulmacasında her hücreye yalnızca kurallara uyan değer yerleştirilmesi gibi, her kullanıcıya yalnızca güvenlik politikalarıyla tutarlı olan yetki düzeyi atanmaktadır. Backtracking araması ve MRV (Minimum Remaining Values) heuristiğiyle desteklenen bu yaklaşım; politika çakışmalarını otomatik olarak tespit etmekte, tanımlanan kısıt modeli altında least privilege ilkesine uygun çözümler üretmektedir ve insan hatasına olan bağımlılığı en aza indirmeyi hedeflemektedir.

Mevcut literatürde CSP'nin güvenlik politikası bağlamında kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır [6, 7]. Ancak bu çalışmalar çoğunlukla çok-alanlı politika müzakeresi veya soyut güvenlik optimizasyonuna odaklanmaktadır. Önerilen model ise MRV sezgisel yöntemiyle güçlendirilmiş backtracking algoritmasını doğrudan Zero Trust atamasına uygulayan, pratik ve uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır.

2. Teorik Altyapı

2.1. Kısıt Sağlama Problemi

Kısıt Sağlama Problemi (CSP), bir değişkenler kümesinin her birine, belirli kısıtları eş zamanlı olarak sağlayacak şekilde değer atanmasını gerektiren matematiksel bir çerçevedir [8]. Biçimsel olarak bir CSP üç bileşenle tanımlanır:

$$CSP = (X, D, C)$$

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — değer atanacak değişkenler kümesi

$D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ — her değişkenin alabileceği olası değerlerin etki alanı

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ — değişkenler arasındaki geçerlilik koşulları

Bir çözüm, tüm kısıtları eş zamanlı olarak karşılayan tam bir değer atamasıdır. CSP çözümlerinin temel gücü, kısmi atamaların arama sırasında sürekli budanmasıdır; bu sayede arama uzayı, kaba kuvvet aramaya kıyasla çarpıcı biçimde küçülür [9].

2.2. Erişim Kontrolünün CSP Olarak Modellenmesi

Kurumsal erişim kontrolü problemi, CSP bileşenlerine şu şekilde eşlenmektedir:

Değişkenler (X): Her (departman, sunucu) çifti bir CSP değişkeni oluşturur. Bu çalışmada 7 departman ve 8 sunucudan oluşan sistem tanımlanmış olup toplam 56 değişken mevcuttur:

$$X = \{ (di, sj) \mid di \in Dept, sj \in Sunucu \}, \quad |X| = 56$$

Etki Alanı (D): Her değişkenin alabileceği izin düzeyleri dört değerden oluşur. Değerler Least Privilege ilkesine uygun olarak kısıtlıdan geniş doğru sıralanmıştır:

$$Di = \{ No - Access < Read < Write < Execute \} \quad (2)$$

Kısıtlar (C): Kurumun güvenlik politikalarından türetilen kurallar iki bileşenden oluşmaktadır:

İş Gereksinimleri (alt sınır kısıtları): Her departmanın görevini yerine getirebilmesi için zorunlu minimum erişim düzeyini tanımlar. Bu çalışmada 21 minimum erişim kuralı tanımlanmıştır. Örnek: Yazılım departmanı Kod Sunucusu'nda en az Execute, Finans departmanı Ödeme Sunucusu'nda en az Write yetkisine sahip olmak zorundadır.

Güvenlik Politikaları (üst sınır ve ikili kısıtlar): 13 kısıt kuralı (K1–K13) üç kategoride modellenmiştir:

Rol Tabanlı Kısıtlar (K1–K6): Departman bazında maksimum yetki tavanı. Örnek: "Yönetim departmanı Kod Sunucusu'na erişemez (K6)."

Görevler Ayrılığı — SoD (K7–K9): Çıkar çatışması doğurabilecek yetki kombinasyonlarını yasaklar. Örnek: "İşlem yapan (Write) aynı zamanda onay veremez (Execute) (K8)."

Zero Trust ve Kritik Kaynak Kısıtları (K10–K13): Önemli sunucuların izolasyonu. Örnek: K13 kuralı, her sunucuda en fazla 1 adet Execute yetkisi tanımlanmasına izin vererek kritik sistemleri koruma altına alır.

Bu üç kategorinin birlikte modellenmesi, tekil politika kontrollerinin yakalayamadığı bileşik ihlallerin — örneğin K9'daki İK departmanının Bordro-Write ile Müşteri-Write kombinasyonu gibi ikili SoD ihlallerinin — otomatik olarak engellenmesini sağlar.

2.3 CSP Tabanlı Yaklaşımın Erişim Kontrolü Açısından Değerlendirilmesi

Önerilen kısıt tabanlı yaklaşımın yeteneklerini literatürde yer alan geleneksel erişim kontrol modellerinden ayırt edebilmek amacıyla karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Bu karşılaştırmada; kural çakışmalarının tespiti, güvenlik politikalarının dinamik olarak üretilebilmesi ve sistem ölçeklenebilirliği gibi temel ölçütler dikkate alınmıştır. Mevcut yaklaşımların sınırlılıklarını ve CSP tabanlı modelin sağladığı operasyonel avantajları özetleyen karşılaştırma sonuçları Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Erişim kontrol yaklaşımlarının karşılaştırılması

Özellik	Manuel RBAC	ABAC	CSP Tabanlı (Bu Çalışma)
Kural çakışması tespiti	X İnsan kontrolüne bağlı	Kısmi	✓ Otomatik ve garanti
SoD ihlali kontrolü	X	Kısmi	✓ Kısıt olarak modellenir
Least Privilege garantisi	X	X	✓ Algoritmik
Politika üretimi	Manuel	Manuel	✓ Otomatik
Ölçeklenebilirlik	Düşük	İyi	İyi
Denetlenebilirlik	Zayıf	Orta	✓ Tam izlenebilir

Çok-alanlı RBAC uygulamalarında rol adlandırma çakışmaları, platform-alan yönetim çatışmaları ve çapraz alan paylaşım güçlükleri, literatürde uzun süredir çözülmemiş temel problemler olarak varlığını sürdürmektedir [6]. XACML tabanlı erişim kontrol yaklaşımları formal doğrulama imkânı sunmakla birlikte, bu yöntemler doğası gereği yalnızca mevcut politikaların tutarlılığını denetlemekle sınırlı kalmakta ve politika üretimini otomatikleştirme konusunda yetersiz kalmaktadır [7]. Bu durum, modern kurumsal sistemlerde giderek artan dinamik kullanıcı yapıları, çok alanlı politika etkileşimleri ve görevler ayrılığı (SoD) gibi karmaşık kısıtlar göz önüne alındığında, mevcut yaklaşımların ölçeklenebilirlik ve uygulanabilirlik açısından ciddi sınırlamalar taşıdığını ortaya koymaktadır [10]. Nitekim güncel çalışmaların büyük çoğunluğu politika doğrulama ve ihlal tespiti problemlerine odaklanmakta, ancak bu yaklaşımlar erişim kontrol problemini bütüncül olarak ele almak yerine yalnızca tanımlanmış kuralların kontrolü ile sınırlı kalmaktadır [11].

Buna karşılık kısıt tabanlı yaklaşımlar, erişim kontrol problemini doğrudan bir arama ve optimizasyon problemi olarak formüle ederek literatürdeki politika üretimi problemlerine alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle SoD gibi yüksek derecede bağımlı ve bileşik güvenlik kısıtlarının matematiksel olarak modellenmesi ve çözülmesine yönelik güncel çalışmalar, bu tür problemlerin ancak kısıt çözme ve optimizasyon teknikleriyle etkin biçimde ele alınabileceğini açıkça göstermektedir. Bu bağlamda CSP modeli, iş gereksinimlerini alt sınır, güvenlik politikalarını ise üst sınır kısıtları olarak tek bir formel yapı altında birleştirerek yalnızca doğrulama değil, aynı zamanda otomatik politika üretimi problemini de çözebilen bütünlük bir yaklaşım sunmaktadır.

Önerilen model bu yönüyle literatürde yaygın olan “policy verification” paradigmasını aşarak, doğrudan “constraint-driven policy generation” problemine odaklanmakta ve erişim kontrolü alanında CSP tabanlı politika üretimine yönelik bir yaklaşım önermektedir. Ayrıca CSP yaklaşımı, çözüm uzayını sistematik biçimde değerlendirerek güvenlik kısıtlarıyla uyumlu ve düşük yetki seviyelerine öncelik veren erişim politikalarının üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellik, Zero Trust mimarisinde önem taşıyan minimum yetki ilkesini desteklemekte ve CSP tabanlı yaklaşımın erişim politikalarının formel ve otomatik üretimi açısından uygulanabilir bir çerçeve sunabileceğini göstermektedir.

3. YÖNTEM VE MODELLEME

3.1 Sistem Yapısı ve Değişken Uzayı

Bu çalışmada 7 departman (AR-GE, Finans, Hukuk, İK, Satış, Yazılım, Yönetim) ve 8 sunucudan (Araştırma, Bordro, Hukuk, Kod, Müşteri, Ödeme, Proje, Yönetim Sunucusu) oluşan kurumsal ağ senaryosu modellenmiştir. Modellemede kullanılan sistem parametrelerinin özeti Şekil 1’de sunulmaktadır. Her (departman, sunucu) çifti bir CSP değişkeni oluşturduğundan toplam değişken sayısı 56’dır. Teorik kaba kuvvet arama uzayı $4^{56} \approx 5,19 \times 10^{33}$ olasılıktan oluşmaktadır. Bu değer, pratik olarak hesaplanamayacak büyüklükte bir arama uzayına karşılık gelmektedir. 21 iş gereksinimi kısıtı, değişkenlerin büyük bölümünün minimum değerini doğrudan belirlemekte; güvenlik politikaları ise kalan çözüm uzayını budamaktadır. Kısıt yayılımının arama uzayını önemli ölçüde daralttığı, yapay

zekâ literatüründe iyi bilinen bir durumdur [11]. Bu budamanın algoritmalar üzerindeki etkisi ise 3.4 bölümünde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Departman : 7
Sunucu : 8
Değişken ($|X|$): 56 (7×8)
Kaba kuvvet : $4^{56} = 5,192,296,858,534,827,628,530,496,329,220,096$ olasılık
Kısıt kuralı : 13 (K1–K13)
İs gereksinimi: 21

Şekil 1. Sistem parametreleri

3.2 Kısıt Fonksiyonu Tasarımı

Kısıt fonksiyonunun kısmi atamalar üzerinde çalışacak biçimde tasarlanması temel bir mühendislik kararıdır. Algoritmanın her adımında yalnızca o ana kadar atanmış değişkenler değerlendirilir; henüz atanmamış değişkenler kontrol dışında tutulur. Bu yaklaşım *fail-first* (erken başarısızlık) ilkesini hayata geçirerek geçersiz dalların mümkün olan en erken aşamada budanmasını sağlar [9].

Kısıt kuralları K1–K13 üç öncelik katmanında işlenir:

1. katman — İş gereksinimleri: 21 minimum yetki kuralı. Atanmış bir değişken minimum seviyenin altındaysa dal anında budanır.

2. katman — Rol ve alan kısıtları (K1–K6): Departman bazında erişim yasakları ve maksimum yetki tavanları. Örneğin K5 gereği Hukuk departmanı yalnızca Hukuk ve Müşteri sunucularına erişebilir; diğer tüm sunucularda No-Access zorunludur.

3. katman — SoD, Zero Trust ve yapısal kısıtlar (K7–K13): İkili ve çok değişkenli ilişkiler. Kritik kısıt olan K13, her sunucuda en fazla bir departmanın Execute yetkisine sahip olabileceğini belirtir. Bu kısıt, değişkenler arasında doğrudan bir rekabet ilişkisi yaratarak MRV heuristiğinin etkisini belirginleştiren temel mekanizmadır.

3.3 Arama Stratejisi ve Değer Sıralaması

Problemin çözümünde kullanılan temel mekanizma, Kısıt Sağlama Problemlerinin (Constraint Satisfaction Problems — CSP) çözümünde yaygın olarak tercih edilen Backtracking Search algoritmasıdır. Bu yöntem, her adımda bir değişkene (departman–sunucu çifti) uygun bir değer (erişim yetkisi) atayarak ilerleyen derinlik öncelikli bir arama stratejisidir. Atama sürecinde herhangi bir kısıt ihlali tespit edildiğinde algoritma son işlemi geri alır ve alternatif dalları denemeye devam eder.

Önerilen modelin çalışma mantığını özetleyen sözde kod Algoritma 1’de sunulmaktadır. Bu temel yapı üzerinden, değer sıralama stratejilerinin çözüm performansı üzerindeki etkisi iki farklı yaklaşım aracılığıyla incelenmiştir:

- **Düz Backtracking:** Değerleri belirli bir hiyerarşiye göre doğrudan dener (açgözlü sıra).
- **MRV Destekli Yaklaşım:** Değişken ve değer seçimlerini daha stratejik biçimde önceliklendirerek arama uzayını daha verimli yönetir.

```
BACKTRACKING-CSP(atama, değişkenler, değer_sırası):
    EĞER |atama| == |değişkenler| İSE
        DÖNDÜR atama                                // Çözüm tamamlandı

    değişken ← SEÇ(atanmamış, kullan_mrv)

    HER izin İÇİN değer_sırası:                        // LP: No-Access→Read→Write→Execute
        atama[değişken] ← izin

        EĞER kısıtlar_geçerliyse(atama) İSE
            sonuç ← BACKTRACKING-CSP(atama, değişkenler, değer_sırası)
            EĞER sonuç ≠ BAŞARISIZ İSE
                DÖNDÜR sonuç

        atama[değişken] ← SİL                            // Geri al (backtrack)

    DÖNDÜR BAŞARISIZ
```

Algoritma 1. Backtracking-CSP: Kısmi Atama Tabanlı Geriye Dönük Arama

Değer sıralaması iki algorithmada farklılık göstermekte olup bu fark sonuçlara doğrudan yansımaktadır:

- **Düz Backtracking:** Açgözlü sıra Execute → Write → Read → No-Access şeklindedir. Her değişken için öncelikle en yüksek yetki seviyesi denenir; bu durum, K13 gibi rekabetçi kısıtlarla birleştiğinde kitleme (deadlock) durumlarının oluşmasına neden olabilmektedir.
- **MRV Backtracking:** Least Privilege odaklı sıra No-Access → Read → Write → Execute şeklindedir. Öncelikle en düşük yetki seviyesi denenmekte, yalnızca bu seviyenin kısıtları sağlayamaması durumunda daha yüksek yetkilere geçilmektedir. Böylece algoritma, Least Privilege ilkesine uygun erişim atamaları üretmektedir.

3.4 MRV Yöntemiyle Sezgisel Optimizasyon ve Arama Performansına Etkisi

Klasik geri izleme (backtracking) algoritmaları genellikle değişkenleri sabit bir sırayla seçerken, bu çalışma performansı artırmak amacıyla Minimum Kalan Değerler (Minimum Remaining Values- MRV) sezgisini kullanmaktadır. MRV, arama sürecinde “önce başarısız olma (fail-first)” ilkesine dayanmaktadır. Bu strateji, çözülme olasılığı en düşük olan değişkenleri önceliklendirerek, arama ağacında derine inmeden önce olası kısıt ihlallerinin daha erken tespit edilmesini sağlar.

MRV mekanizmasının değişken seçim sürecindeki işleyişi Algoritma 2’de verilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle çok sayıda kısıt içeren karmaşık ağ senaryolarında arama uzayını etkin bir şekilde daraltarak toplam deneme sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır.

```
MRV-SEÇ(atanmamış_değişkenler, atama):
    EN_AZ ← ∞

    HER değişken İÇİN atanmamış_değişkenler:
        sayaç ← 0
        HER izin İÇİN {No-Access, Read, Write, Execute}:
            EĞER kısıtlar_geçerliyse(atama ∪ {değişken: izin}):
                sayaç ← sayaç + 1

        EĞER sayaç < EN_AZ İSE:
            EN_AZ ← sayaç
            seçilen ← değişken

    DÖNDÜR seçilen
```

Algoritma 2. MRV-SELECT: Minimum Kalan Değerler Değişken Seçimi

MRV stratejisinin çalışma prensibi, arama ağacının üst seviyelerinde olası hataları tespit ederek kilitlenme etkisini (lock-in effect) önlemektir [9].

Bu çalışmada MRV'nin etkinliğini belirleyen kritik mekanizma K13 kısıtıdır. Her bir sunucu üzerinde yalnızca bir departmanın Execute (çalıştırma) yetkisine sahip olabilmesi, bazı (departman, sunucu) çiftleri için değer alanını tek bir seçeneğe indirgemektedir. Örneğin, Software departmanının Code Server üzerindeki Execute gereksinimi, bu değişken için başka hiçbir geçerli değer kalmamasına neden olur. MRV bu değişkeni erken aşamada tespit ederek öncelikli olarak çözer; böylece diğer departmanlar aynı sunucu üzerinde Execute yetkisi almaya çalışmaz ve K13 çatışması önlenmiş olur.

Basit geri izlemede ise değişkenler alfabetik sıraya göre işlendiği için R&D departmanı Software departmanından önce gelir ve Code Server üzerinde Execute yetkisini ilk olarak almaya çalışır. Bu durum, sonraki adımlarda Software departmanı için çözülemez bir durum oluşturur ve binlerce geri izleme adımı gerektiren bir kilitlenmeyi (deadlock) tetikler. Bu karşılaştırma sonuçları Şekil 2'de sunulmuş olup, MRV tabanlı geri izleme yaklaşımının hem deneme sayısını hem de geri izleme maliyetini dramatik şekilde azalttığı açıkça görülmektedir.

Ölçüt	Düz Backtracking MRV Backtracking	
Değişken sayısı	56	56
Değer sırası	Execute önce	No-Access önce
Toplam deneme sayısı	978,305	91
Geri adım sayısı	978,249	35
Çalışma süresi (ms)	~22728	~110
Deneme azalma oranı	—	~10,751×

Şekil 2. Düz Backtracking ve MRV Backtracking algoritmasının karşılaştırması

4. Bulgular ve Değerlendirme

4.1 Erişim Kontrol Matrisi

MRV heuristiğiyle güçlendirilmiş backtracking algoritması, 21 iş gereksinimi ve 13 güvenlik kısıtını eş zamanlı olarak sağlayan çözüme 91 denemede ulaşmıştır. Üretilen erişim kontrol matrisi Şekil

3'te sunulmaktadır. Elde edilen matris hem minimum iş gereksinimlerini hem de Zero Trust güvenlik politikalarını aynı anda karşılamaktadır.

CSP COZUMU – ERISIM KONTROL MATRISI (MRV + Least Privilege)

	Arastirma	Bordro	Hukuk	Kod	Musteri	Odeme	Proje	Yonetim
AR_GE	E:Execute	X:No-Access	X:No-Access	R:Read	X:No-Access	X:No-Access	W:Write	X:No-Access
Finans	X:No-Access	R:Read	X:No-Access	X:No-Access	R:Read	W:Write	R:Read	X:No-Access
Hukuk	X:No-Access	X:No-Access	E:Execute	X:No-Access	R:Read	X:No-Access	X:No-Access	X:No-Access
IK	X:No-Access	W:Write	X:No-Access	X:No-Access	R:Read	X:No-Access	X:No-Access	X:No-Access
Satis	X:No-Access	X:No-Access	X:No-Access	R:Read	W:Write	X:No-Access	X:No-Access	X:No-Access
Yazilim	R:Read	X:No-Access	X:No-Access	E:Execute	X:No-Access	X:No-Access	E:Execute	X:No-Access
Yonetim	R:Read	R:Read	X:No-Access	X:No-Access	R:Read	R:Read	X:No-Access	E:Execute

X=No-Access R=Read W=Write E=Execute
Renkler: No-Access Read Write Execute

Şekil 3. Erişim Kontrol Matrisi Çıktısı

Şekil 3 incelendiğinde, departmanlara yalnızca görevlerini yerine getirebilmeleri için gerekli minimum yetkilerin tanımlandığı görülmektedir. Böylece Least Privilege ilkesi sistematik biçimde uygulanmıştır. Gereksiz yetki artışına izin verilmemiş, tüm erişimler kısıtlar çerçevesinde optimize edilmiştir. Execute yetkisi yalnızca kritik operasyon gerektiren sunucularda atanmıştır. Bu kapsamda AR-GE departmanı Araştırma Sunucusu'nda, Hukuk departmanı Hukuk Sunucusu'nda, Yazılım departmanı Kod ve Proje Sunucuları'nda, Yönetim departmanı ise Yönetim Sunucusu'nda Execute yetkisine sahiptir. Bu dağılım, iş sürekliliği ile güvenlik gereksinimleri arasında dengeli bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Tablo 2'de detaylı yetki raporundan alınan bir kesit sunulmuş olup iki departman (AR-GE, Finans) için sunucu bazlı yetki seviyelerini örneklemektedir.

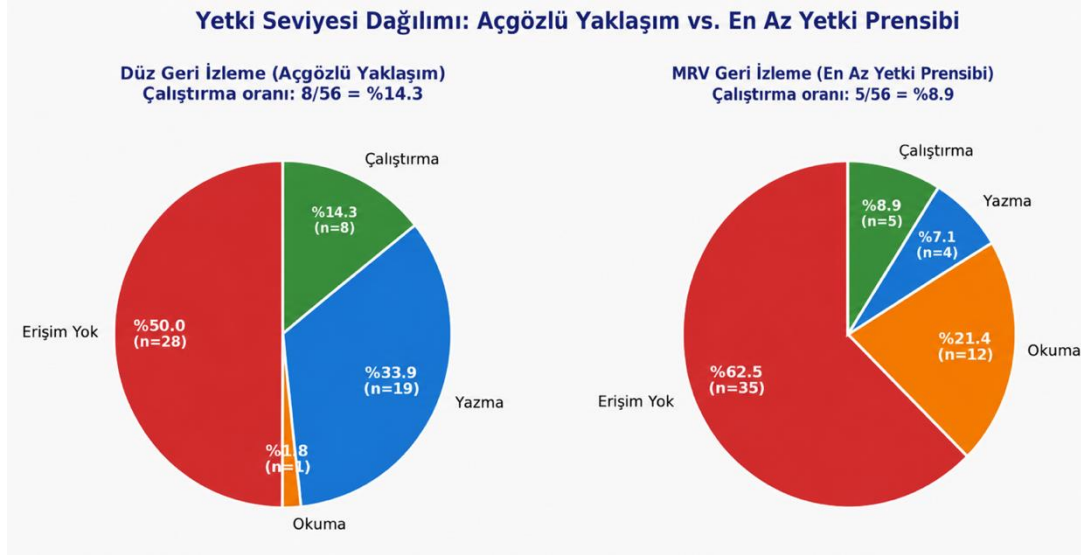
Tablo 2. Detaylı Yetki Raporundan Kesit (AR-GE ve Finans Departmanları)

Departman	Sunucu	Yetki Seviyesi	Açıklama
AR-GE	Araştırma Sunucusu	Execute	İş gereksinimi
AR-GE	Kod Sunucusu	Read	İş gereksinimi
AR-GE	Proje Sunucusu	Write	İş gereksinimi
AR-GE	Bordro Sunucusu	No-Access	Rol kısıtı
AR-GE	Ödeme Sunucusu	No-Access	Rol kısıtı
Finans	Bordro Sunucusu	Read	İş gereksinimi
Finans	Müşteri Sunucusu	Read	İş gereksinimi
Finans	Ödeme Sunucusu	Write	İş gereksinimi
Finans	Proje Sunucusu	Read	İş gereksinimi
Finans	Kod Sunucusu	No-Access	Rol kısıtı

Tablo 2 incelendiğinde, AR-GE departmanına yalnızca araştırma ve geliştirme faaliyetleri için gerekli yetkilerin tanımlandığı görülmektedir. Finans departmanına ise ödeme ve kayıt süreçleriyle ilişkili sistemlerde sınırlı erişim verilmiştir. Yetki gerektirmeyen tüm kaynaklarda No-Access atanması, sistemin Least Privilege ilkesini başarıyla uyguladığını göstermektedir. Ayrıca K13 kısıtı gereği her sunucuda en fazla bir adet Execute yetkisi bulunmaktadır. Böylece aynı kritik kaynak üzerinde birden fazla yüksek yetkili kullanıcının bulunması engellenmiş, iç tehdit ve yanlış kullanım riski azaltılmıştır.

Yetkilendirme seviyelerinin üretilen erişim matrisi içerisindeki dağılımı Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Stratejik Backtracking algoritması, değer sıralamasında Execute yetkisini önceliklendirdiği için, kısıtların izin verdiği tüm hücrelerde yüksek yetki atama eğilimindedir. Bu nedenle çözümde iş gereksinimi bulunmayan üç ek (departman, sunucu) çiftine Execute yetkisi atanmış ve Execute oranı %14,3'e ulaşmıştır.

Buna karşılık MRV Backtracking algoritması, En Az Yetki (Least Privilege) odaklı değer sıralaması sayesinde her değişkene yalnızca kısıtların gerektirdiği minimum yetki seviyesini atamaktadır. Execute yetkisi yalnızca IS_GER tarafından açıkça gerekli görülen beş çifte (%8,9) verilmiş, geri kalan atamaların büyük çoğunluğu ise No-Access (%62,5) olarak belirlenmiştir. Bu durum, MRV sezgisinin yalnızca performans avantajı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda En Az Yetki prensibini algoritmik olarak da güvence altına aldığını somut biçimde göstermektedir.



Şekil 4. Ayrıcalık düzeylerinin dağılımı: Doğrudan Geri İzleme (Açgözlü) ve MRV Geri İzleme (En Az Ayrıcalıklı) yöntemlerinin karşılaştırılması.

Sonuç olarak üretilen erişim matrisi, manuel yönetilen klasik RBAC yapılarında sık görülen aşırı yetkilendirme risklerini azaltmakta ve denetlenebilir, tutarlı bir yetki yapısı sunmaktadır.

4.2 İhlal Tespiti Senaryosu

Önerilen CSP modelinin yalnızca uygun erişim matrisi üretmekle kalmayıp hatalı yetkilendirmeleri de tespit edebildiğini göstermek amacıyla çeşitli yanlış erişim senaryoları simüle edilmiştir. Bu senaryolar, manuel erişim yönetiminde sık karşılaşılan insan hatalarını temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Simülasyon kapsamında rol dışı erişim tanımlamaları, görevler ayrılığı (SoD) ihlalleri, kritik sunuculara yetkisiz erişim talepleri ve aynı sunucu üzerinde birden fazla Execute yetkisi verilmesi gibi durumlar test edilmiştir. Sisteme uygulanan tüm hatalı atamalar, kısıt fonksiyonu tarafından otomatik olarak reddedilmiştir. Örneğin Finans departmanına Ödeme Sunucusu üzerinde Execute yetkisi verilmesi K7 kuralını, İK departmanına aynı anda Bordro ve Müşteri sistemlerinde yazma yetkisi verilmesi K9 kuralını ihlal etmektedir. Benzer şekilde Yönetim dışındaki departmanların Yönetim Sunucusu'na erişim talepleri K10 kısıtı nedeniyle reddedilmiştir. Ayrıca aynı sunucu üzerinde birden fazla departmana Execute yetkisi atanması girişimleri K13 kuralı kapsamında otomatik olarak engellenmiştir. Bu durum kritik sistem kaynaklarının korunması açısından önemli bir güvenlik avantajı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, CSP tabanlı yaklaşımın yalnızca yetki dağıtımı yapan pasif bir model olmadığını; aynı zamanda yanlış yapılandırmaları gerçek zamanlı tespit eden bir güvenlik mekanizması olduğunu göstermektedir. Bu özellik, manuel yönetilen sistemlerde sık görülen konfigürasyon hatalarının önlenmesi açısından önemli avantaj sunmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada kurumsal erişim kontrolü problemi, Kısıt Sağlama Problemi (Constraint Satisfaction Problem – CSP) yaklaşımı kullanılarak yeniden modellenmiş ve Zero Trust mimarisine uygun, otomatik yetkilendirme üreten bir çözüm geliştirilmiştir. Önerilen modelde erişim hakları;

departmanlar, sunucular, iş gereksinimleri ve güvenlik politikaları birlikte değerlendirilerek matematiksel kısıtlar biçiminde tanımlanmıştır. Geliştirilen sistemde 7 departman ve 8 sunucudan oluşan örnek kurumsal yapı üzerinde toplam 56 erişim değişkeni için çözüm üretilmiştir. MRV sezgisel yöntemiyle güçlendirilmiş backtracking algoritması, 21 iş gereksinimi ve 13 güvenlik kuralını eş zamanlı sağlayan geçerli erişim matrisine yalnızca 91 denemede ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, klasik düz backtracking yaklaşımına kıyasla daha düşük arama maliyeti ve daha verimli çözüm performansı sağlandığını göstermektedir. Üretilen erişim matrisi incelendiğinde, departmanlara yalnızca görevlerini yerine getirebilmeleri için gerekli minimum yetkilerin verildiği görülmüştür. Böylece Least Privilege ilkesi doğrudan algoritmik olarak uygulanmış, gereksiz ve aşırı yetkilendirme riskleri ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca aynı sunucu üzerinde birden fazla Execute yetkisinin engellenmesi, görevler ayrılığı (SoD) kurallarının korunması ve kritik sistemlere yetkisiz erişimin reddedilmesi ile güvenlik politikalarının tutarlı biçimde uygulandığı doğrulanmıştır. Simüle edilen hatalı yetkilendirme senaryolarında sistemin politika ihlallerini otomatik olarak tespit edip reddettiği gözlemlenmiştir. Bu durum önerilen yaklaşımın yalnızca erişim matrisi üreten pasif bir model değil, aynı zamanda yanlış yapılandırmaları önleyen aktif bir güvenlik mekanizması olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, endüstriyel ölçekte bir IAM çözümü sunmaktan ziyade, erişim kontrol politikalarının CSP tabanlı formel modelleme ile otomatik üretilebileceğini göstermeyi amaçlayan bir proof-of-concept yaklaşımıdır.

Sonuç olarak CSP tabanlı erişim kontrol modeli; denetlenebilirlik, otomasyon, güvenlik tutarlılığı ve ölçeklenebilirlik açısından geleneksel manuel yetkilendirme süreçlerine alternatif bir CSP tabanlı model sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda modelin dinamik kullanıcı davranışları, gerçek zamanlı risk skorları, kullanıcı öznitelikleri (ABAC) ve büyük ölçekli kurumsal sistemlerle bütünleştirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] C. D. Hylender, P. Langlois, A. Pinto, S. Widup, Data breach investigations report. Verizon Business, May, 1, 2024.
- [2] S. Rose, O. Borchert, S. Mitchell, S. Connelly, Zero trust architecture. NIST special publication, 800(207) (2020) 1-52.
- [3] CISA. Zero Trust Maturity Model, Version 2.0. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (2023). <https://www.cisa.gov/zero-trust-maturity-model>
- [4] A. Ferreira, R. Cruz-Correia, L. Antunes, D. Chadwick, Implications of loosened Role-based Access Control session control implementation for the enforcement of Dynamic Mutually Exclusive Roles properties on Health Information Systems. Journal of Systems Architecture, (2021). ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102135>
- [5] F. D. Ferraiolo, R. Sandhu, S. Gavrila, D. Richard Kuhn, R. Chandramouli, Proposed NIST standard for role-based access control. ACM Trans. Inf. Syst. Secur. 4, 3 (August 2001), 224–274. <https://doi.org/10.1145/501978.501980>
- [6] Y. Li, Z. Du, Y. Fu, L. Liu, Role-Based Access Control Model for Inter-System Cross-Domain in Multi-Domain Environment. Applied Sciences, 12(24) (2022) 13036. <https://doi.org/10.3390/app122413036>
- [7] C. Caserio, F. Lonetti, E. Marchetti, A Formal Validation Approach for XACML 3.0 Access Control Policy. Sensors, 22(8) (2022) 2984. <https://doi.org/10.3390/s22082984>
- [8] S. C. Brailsford, C. N. Potts, B. M. Smith, Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications. European journal of operational research, 119(3) (1999) 557-581.
- [9] S. Russell, P. Norvig, A. Intelligence, A modern approach. Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 25(27) (1995) 79-80.

- [10] K. Ragothaman, Y. Wang, B. Rimal, M. Lawrence, Access control for IoT: A survey of existing research, dynamic policies and future directions. *Sensors*, 23(4) (2023) 1805.
- [11] H. Li, M. Yin, Z. Li, Failure Based Variable Ordering Heuristics for Solving CSPs. 27th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2021), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), Vol. 210 (2021) pp. 9:1–9:10. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.CP.2021.9>
- [12] K. Ragothaman, Y. Wang, B. Rimal, M. Lawrence, M. Access control for IoT: A survey of existing research, dynamic policies and future directions. *Sensors*, 23(4) (2023) 1805



Eğitim Kurumlarında Uç Bilgi İşlem Tabanlı Görüntü İşleme ile Otonom Enerji Verimliliği ve Karbon Ayak İzi Analizi

Caner AYLIKCI ^{1*}, İrem ÖZBEK ¹, Fatma Sude EFE ¹, Sena Nur DEMİR ¹, Hasan YILMAZ²

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği, Bursa

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Bursa

Özet

Bu araştırma, eğitim yapılarında statik zamanlamalar ve operasyonel hatalardan (boş sınıflarda açık bırakılan iklimlendirme ve aydınlatma sistemleri) kaynaklanan enerji israfını önlemeyi amaçlayan uçta bilişim (edge computing) tabanlı otonom bir görüntü işleme sistemi sunmaktadır. Çalışma, gerçek zamanlı doluluk verilerini analiz ederek kurumsal karbon ayak izini optimize etmeyi hedefler. Yöntem olarak, karmaşık sensör ağları yerine düşük maliyetli IoT tabanlı uç kameralar ve Edge Impulse platformunda eğitilmiş TensorFlow tabanlı ikili sınıflandırma modeli kullanılmıştır. Öğrenci konforunu korumak adına tespit algoritmasında muhafazakâr bir doğruluk eşiği tercih edilmiştir. KVKK ihlallerini kesin olarak önlemek amacıyla geliştirilen bu kapalı devre donanımlar, elde edilen görüntüleri bulut sunucularına veya harici depolama birimlerine göndermeden, yalnızca yerel cihazların geçici belleğinde (RAM) anlık olarak işleyip imha eden mahremiyet öncelikli bir yapıda tasarlanmıştır. Tespit edilen anomaliler API entegrasyonu ile veri panellerine (dashboard) aktarılmaktadır. Sonuçlara göre, 20 derslikli pilot binada günlük iki saatlik israfın önlenmesiyle yıllık 25,824 kWh enerji tasarrufu ve 11,4 ton CO₂ eşdeğeri emisyon azaltımı sağlanabilmektedir. 10 binalık tam kampüs projeksiyonunda ise güncel tarifelerle kuruma yıllık 1.291.200 TL finansal tasarruf ve 114,15 ton karbon salımının engellenmesi öngörülmektedir. Sonuç olarak, bu teknoloji yeşil kampüs hedefleri için maliyet etkin ve yasalara tam uyumlu bir araç sunar. Mevcut prototip anomali tespiti ve raporlamayı kapsarken, altyapı erişimi gerektiren ekipman kontrol entegrasyonu sonraki faza planlanmıştır. Ticarileşme aşamasında görsel veriyi tamamen ortadan kaldırmak amacıyla termal sensörlere geçiş hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Uçta bilişim; enerji tasarrufu; görüntü işleme; nesnelerin interneti (IoT); sürdürülebilir kampüs.

Autonomous Energy Efficiency and Carbon Footprint Analysis via Edge Computing-Based Image Processing in Educational Institutions

Abstract

This research presents an edge computing-based autonomous image processing system aimed at preventing energy waste caused by static scheduling and operational errors (such as air conditioning and lighting systems left on in empty classrooms) in educational buildings. The study aims to optimize the institutional carbon footprint by analyzing real-time occupancy data. As a methodology, instead of complex sensor networks, low-cost IoT-based edge cameras and a TensorFlow-based binary

classification model trained on the Edge Impulse platform were used. A conservative accuracy threshold was preferred in the detection algorithm to maintain student comfort. Developed to strictly prevent PDPL (Personal Data Protection Law) violations, these closed-circuit hardware units are designed with a privacy-first architecture that processes and destroys the acquired images instantly within the volatile memory (RAM) of local devices, without transmitting them to cloud servers or external storage units. Detected anomalies are transferred to dashboards via API integration.

According to the results, by preventing two hours of daily waste in a 20-classroom pilot building, an annual energy savings of 25,824 kWh and an emission reduction of 11,4 tons of CO₂ equivalent can be achieved. In a full campus projection of 10 buildings, an annual financial savings of 1.291.200 TL for the institution and the prevention of 114,15 tons of carbon emissions are anticipated based on current tariffs. In conclusion, this technology provides a cost-effective and fully legally compliant tool for green campus goals. While the current prototype covers anomaly detection and reporting, equipment control integration requiring infrastructure access is planned for the next phase. During the commercialization phase, transitioning to thermal sensors is targeted to eliminate visual data.

Keywords: Edge computing; energy efficiency; image processing; Internet of Things (IoT); sustainable campus.

1. Giriş

Binalar küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30'undan ve enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarının %26'sından sorumlu olup, iklim değişikliğiyle mücadelede en kritik sektörlerden birini oluşturmaktadır. Özellikle yükseköğretim kurumları, idari ofisler, derslikler ve laboratuvarlar gibi çok çeşitli kullanım alanlarını barındıran karmaşık yapılar olması nedeniyle "küçük ölçekte şehir" gibi görülmekte ve önemli ölçüde enerji tüketmektedir [1]. Bu yapılardaki enerji tüketiminin ve Kapsam 2 (dolaylı elektrik tüketimi) emisyonlarının en büyük kaynağı ise ısıtma, havalandırma, iklimlendirme (HVAC) ve aydınlatma sistemleridir [2].

Çevresel sürdürülebilirlik kriterleri (LEED, BREEAM vb.) çerçevesinde değerlendirildiğinde, Türkiye'deki yapı stokunun enerji performansını artırmak için sadece teknolojik değil, aynı zamanda kullanıcı konforunu ve iç ortam yaşam kalitesini gözeten bütünsel bir yaklaşım gereklidir. Türkiye'nin net-sıfır karbon hedeflerine ulaşması, binalardaki operasyonel enerji israfının yapay zeka ve IoT tabanlı adaptif çözümlerle minimize edilmesine bağlıdır.

Günümüzde eğitim binalarındaki iklimlendirme sistemleri genellikle maksimum doluluk varsayımına dayanan önceden belirlenmiş, statik zaman çizelgelerine göre yönetilmektedir. Ancak çalışmalar, üniversite dersliklerindeki gerçek doluluk oranlarının kapasitenin genellikle %60'ını aşmadığını ve öğrenci devamsızlıkları, program değişiklikleri veya ders dışı etkinlikler nedeniyle yüksek oranda rastlantısal bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Boş veya düşük dolulukta sınıfların geleneksel statik sistemlerle iklimlendirilmeye ve aydınlatılmaya devam etmesi, ciddi bir enerji israfına yol açmaktadır. Binaların gerçek zamanlı doluluk durumuna göre adaptif olarak yönetilememesi (over-conditioning), hem kurumsal finansal kaynakların israf edilmesine hem de gereksiz karbon salımına neden olmaktadır [1,2,3].

Bu operasyonel hataları önlemek ve enerji verimliliğini otonom hale getirmek için Nesnelerin İnterneti ve Yapay Zekâ destekli çözümler öne çıkmaktadır. Ancak sensörlerden alınan verilerin işlenmek üzere merkezi bulut sunucularına gönderilmesi, yüksek gecikme süreleri, bant genişliği sorunları ve siber güvenlik açıkları gibi kısıtlamalar yaratmaktadır. Bu noktada, veri işleme yükünü verinin üretildiği kaynağa taşıyan uçta bilişim mimarisi bulut bağımlılığını ortadan kaldırarak anlık karar alma imkânı sunar. Sınırlı kaynaklara sahip mikrodenetleyiciler üzerinde çalışan küçük makine öğrenimi (TinyML) modelleri sayesinde, düşük güç tüketimiyle uç cihazlarda otonom anormali tespiti ve doluluk analizi yapmak mümkün hale gelmiştir [4].

Görüntü işleme tabanlı doluluk tespiti, kişi varlığını doğrulamada en yüksek hassasiyeti sunan yöntemlerden biri olmasına rağmen, kameraların kapalı alanlarda kullanımı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) ve AB Genel Veri Koruma Yönetmeliği (GDPR) kapsamında ciddi mahremiyet ihlali riskleri taşımaktadır. Bu sorunu aşmanın en etkili yolu, veri işlemeyi doğrudan donanım seviyesinde yalıtan "Tasarım Yoluyla Mahremiyet" (Privacy-by-Design) ilkesinin benimsenmesidir.

Bu doğrultuda, bu çalışma eğitim yapılarında Kapsam 2 emisyonlarını ve enerji israfını en aza indirmek için uç bilişim (edge computing) tabanlı, düşük maliyetli ve otonom bir görüntü işleme sistemi önermektedir. Sistem Edge Impulse platformunda eğitilmiş TensorFlow tabanlı bir obje sınıflandırma (object classification) modeli kullanarak gerçek zamanlı doluluk tespiti yapmaktadır. Mahremiyet ihlallerini kesin olarak önlemek amacıyla geliştirilen bu kapalı devre donanım, elde edilen görüntüleri hiçbir bulut sunucusuna göndermeden yalnızca yerel cihazların geçici belleğinde (RAM) işleyip anında imha eden bir yapıda tasarlanmıştır. Araştırma kapsamında, öğrenci konforunu riske atmamak adına muhafazakâr bir doğruluk eşiği kullanılmış ve tespit edilen israf anomalileri API entegrasyonu ile veri panellerine (dashboard) aktarılmıştır. Çalışmanın devamında, geliştirilen bu prototipin 20 derslikli bir pilot bina ve 10 binalık bir kampüs projeksiyonu üzerindeki enerji ve karbon ayak izi optimizasyonu sonuçları sunulacaktır. Ayrıca, sonraki ticarileşme fazları için ekipman kontrol entegrasyonu ve görsel veriyi tamamen ortadan kaldıracak termal sensör (ör. MLX90640 vb.) geçiş planları tartışılarak, akıllı ve yeşil kampüsler için yasalara tam uyumlu, uygun maliyetli bir çerçeve çizilecektir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada, eğitim binalarındaki enerji israfını önlemek ve sınıf doluluğunu otonom olarak tespit etmek amacıyla donanım, yazılım ve fiziksel saha bileşenlerinden oluşan bütüncül bir materyal altyapısı kullanılmıştır.

2.1.1. Donanım ve Yazılım Materyalleri

Görüntü işleme ve yapay zeka görevlerini ağıncı uç noktasında (edge) gerçekleştirmek üzere düşük maliyetli IoT kameralar kullanılmıştır. Sistemin prototip testleri bilgisayar tabanlı bir panel üzerinde gerçekleştirilmiş olup, otonom ve kompakt sistem entegrasyonu için nihai donanım materyali olarak Raspberry Pi belirlenmiştir. Yapay zeka modelinin veri toplama, etiketleme, özellik çıkarımı ve kısıtlı donanımlara (TinyML) dağıtım süreçleri için uçta bilişim tabanlı MLOps platformu olan Edge Impulse yazılımı kullanılmıştır [5].



Şekil 1. Geliştirilen otonom sistemin uçta bilişim ve mahremiyet odaklı donanım mimarisi

2.1.2. Veri Seti, Pilot Saha ve Envanter Materyalleri

Yapay zeka modelinin kısıtlı donanım koşullarında dahi yüksek başarımlar göstermesi amacıyla, gerçek sınıf ortamlarından elde edilen 1170 adet görüntüden oluşan özgün bir veri seti materyal olarak kullanılmıştır. Bu veri seti, farklı ışık koşulları ve sınıf ortamına özgü değişkenleri içermektedir. Edge Impulse platformunun 'Data Augmentation' özelliği sayesinde veri setinin eğitimi sırasında işlenen görüntülerin farklı histogram değerlerine sahip olması sağlanmış ve doğruluk payının artması hedeflenmiştir.

İnceleme kapsamında, toplam 10 binadan oluşan bir üniversite yerleşkesi ele alınmış; her bir binada 20 derslik bulunduğu varsayılmıştır. Böylece analiz, toplam 200 derslik üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu varsayım, Türkiye'deki birçok devlet üniversitesinin fakülte bina düzeniyle uyumludur. Her bir derslikte 32 adet floresan lamba bulunduğu kabul edilmiştir. Floresan lambaların birim güç tüketimi 36 W olarak alınmıştır. Bu değer, floresan aydınlatmaların tipik güç aralığını temsil etmekte olup, farklı akademik çalışmalarda eğitim yapılarında kullanılan standart floresan armatürler için yaygın biçimde kullanılmaktadır [6]. Bu doğrultuda, aydınlatma sisteminin enerji tüketimi hesaplamaları, toplam floresan sayısının kurulu güce dönüştürülmesi esasına dayandırılmıştır. Aydınlatma sistemine ek olarak, her derslikte bir adet 12.000 BTU kapasiteli inverter tip split klima bulunduğu varsayılmıştır. Bu kapasite, orta büyüklükteki sınıf ortamları için literatürde en yaygın önerilen iklimlendirme kapasitesidir. İnverter teknolojisine sahip split klimaların ortalama elektriksel güç tüketimi kullanım koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte, tipik işletme koşullarında yaklaşık 1,0 kW mertebesinde [7].

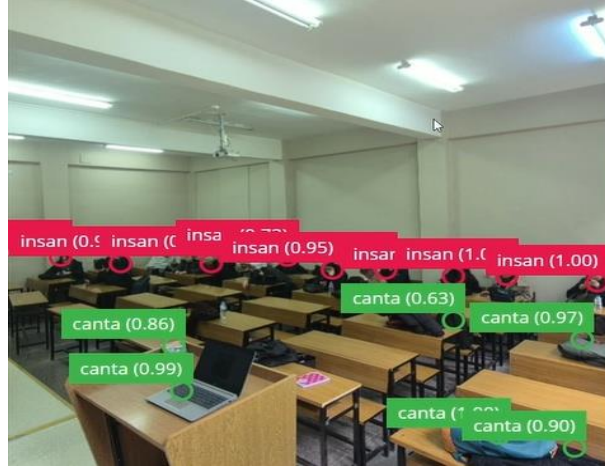
2.2. Metod

Bu çalışmada sistemin temel işlevleri olan model eğitimi, mahremiyet odaklı veri işleme ve çevresel etki değerlendirmesi üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Yapay Zeka Modelinin Eğitimi ve Çıkarım (Inference) Süreci

Gömülü sistemlerin kısıtlı geçici bellek (RAM) ve işlemci kapasiteleri göz önünde bulundurularak, veri setindeki görüntülerin renk çevrimleri ile birlikte en optimize varyasyonu tespit edilmiş ve çözünürlükleri ölçeklendirilmiştir. Bu ön işleme adımları, giriş veri boyutunu minimize ederek uç cihazda gereksinim duyulan çerçeve belleği (frame buffer) miktarını optimize etmiştir. Görüntü işleme mimarisi olarak, klasik nesne tespiti algoritmalarında hesaplama açısından ağır olan sınır kutusu (bounding box) yaklaşımı yerine, merkez noktası (centroid) tahmini yapan FOMO (Faster Objects, More Objects) MobileNetV2 0.35 algoritması kullanılmıştır (Şekil 2). Öğrenci konforunu riske atmamak adına, modelin sınıfı "dolu" olarak sınıflandırmasında muhafazakâr (düşük eşikli) bir karar mekanizması benimsenmiş; böylece sistemin boşta çalışma israfını engellerken hatalı iklimlendirme kesintisi yapma olasılığı minimize edilmiştir [8,9]. Bu yöntemle model, sınıf içindeki kişi varlığını ve yaklaşık yoğunluğunu algılayacak şekilde optimize edilmiştir. Şekil, raporlama esnasında kullanılmak üzere KVKK bildirimi yapılarak düzenlenmiştir. Prototip, donanım kısıtları nedeniyle bilgisayar tabanlı simülasyon ortamında test edilmiştir. Edge Impulse'un donanım profil çıktıları, Raspberry Pi 4 üzerinde benzer inference sürelerinin elde edilebileceğini öngörmektedir. Prototipin geri kalanında görseller işlendikten sonra imha edilmiştir.

Modelin eğitimi tamamlandıktan sonra, uç cihazda çıkarım (inference) hızını artırmak ve bellek tüketimini düşürmek amacıyla post-training aşamasında 8-bit tam sayı (INT8) kuantizasyonu (quantization) uygulanmıştır. Bu işlem, modelin 32-bit kayan noktalı (float32) ağırlık ve aktivasyon eğerlerini INT8 formatına dönüştürerek model boyutunu yaklaşık dört kat küçülmüş ve kayda değer bir doğruluk kaybı yaşanmaksızın çıkarım süresini hızlandırmıştır [3,4].



Şekil 2. Eğitilen FOMO modelinin merkez noktası (centroid) tabanlı tespit örneği

2.2.2. Mahremiyet Odaklı Veri İşleme (Privacy-by-Design)

Sistemin otonom çalışma mantığı, 6698 sayılı KVKK ve GDPR gereksinimlerini karşılayacak "Tasarım Yoluyla Mahremiyet" (Privacy-by-Design) ilkelerine uygun kurgulanmıştır [10]. Kameralardan alınan ham görsel veriler, bulut (cloud) sunucusuna aktarılmadan yalnızca cihazın geçici belleğine (RAM) alınmış; model çıkarımı yapıldıktan hemen sonra anlık olarak imha edilmiştir [11]. Elde edilen anlık doluluk durumu, JSON paketleri hâlinde API üzerinden yönetim paneline aktarılmış ve biyometrik veri oluşumu donanım seviyesinde engellenmiştir [12].

KVKK'nın 6. maddesi, biyometrik verileri "özel nitelikli kişisel veri" olarak sınıflandırır ve bunların işlenmesini çok daha sıkı şartlara bağlar. TensorFlow tabanlı obje sınıflandırma (object classification) modeli, yüz tanıma (facial recognition) yerine "insan formu tespiti" odaklı kurgulandığı için biyometrik veri işleme riskini minimize eder. Literatürde "gizlilik koruyucu görüntü işleme" olarak tanımlanan bu yaklaşım, kişilerin kimliklerini belirlemek yerine sadece mekânsal varlıklarını anonim bir sayısal değere dönüştürür [12]. Bu sayede, özel nitelikli veri işleme rejimine girilmeden genel veri işleme kuralları dahilinde süreç yönetilebilir. Sistemin tasarım aşamasında güvenlik açıklarının kapatılması, veri gizliliğinin teknik bir zorunluluk haline getirilmesini ifade eder. Mevcut aşamada bilgisayar tabanlı bir panel üzerinde çalışan sistem, nihai aşamada Raspberry Pi donanımı üzerinde otonom ve kompakt bir yapıda çalışacak şekilde kurgulanmıştır.

Bu sistemde, verinin yalnızca enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı gibi meşru bir amaçla işlendiği, fiziksel panolar ve dijital bilgilendirmelerle net bir şekilde ortaya konmalıdır. Sistemin ticarileşme aşamasında, gelecekteki projeksiyonlar dahilinde termal sensör teknolojisine geçiş yapılması planlanmaktadır; bu teknolojik dönüşüm sayesinde görsel veri ihtiyacı tamamen ortadan kaldırılarak mahremiyet riski teorik olarak %0 kadar en minimize düzeyine indirgenecektir. Sistemin Kapsam 2 emisyonlarını azaltma hedefi, enerji yönetimi mevzuatları ile uyumludur.

2.2.3. Enerji İsrafı ve Karbon Ayak İzi Hesaplama

Çalışmada "enerji israfı" kavramı, dersliklerin boş olmasına rağmen aydınlatma ve klima sistemlerinin açık kalması durumu olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda, tüm sistemlerin günde 2 saat süreyle gereksiz biçimde çalıştığı varsayılmıştır. Yıllık hesaplamalarda 300 gün esas alınmış ve maksimum teorik etki değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, çevresel etki analizlerinde yaygın olarak kullanılan muhafazakâr bir değerlendirme yöntemi olarak kabul edilmektedir.

Elektrik enerjisinin ekonomik karşılığı hesaplanırken, 2025–2026 dönemine ait vergi ve fonlar dâhil ortalama elektrik birim fiyatı 5,0 TL/kWh olarak alınmıştır. Bu değer, ticarethane/kamu abonelikleri için güncel piyasa verilerini temsil etmekte olup üniversite binaları için uygun bir referans oluşturmaktadır.

Türkiye elektrik şebekesinden tüketilen her 1 kWh elektrik enerjisi için ortalama 0,442 kg CO₂ eşdeğeri emisyon oluşmaktadır [13]. Bu faktör, elektrik üretim portföyünde yer alan fosil ve yenilenebilir kaynakların bileşik etkisini yansıtmakta olup, çalışmada yapılan tüm karbon emisyonu hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır.

2.2.4. Toplam Aydınlatma Gücünün Hesaplanması

Toplam floresan lamba sayısı Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$N_f = B \times D \times F \quad (1)$$

Burada; B bina sayısını, D bina başına derslik sayısını, F derslik başına floresan lamba sayısını ifade etmektedir.

$$N_f = 10 \times 20 \times 32 = 6400 \quad (2)$$

Toplam aydınlatma gücü Denklem (3) ile hesaplanmıştır:

$$P(ayd) = N_f \times P_f \quad (3)$$

Burada; P_f floresan lambanın gücünü ifade etmektedir.

$$P(ayd) = 6400 \times 36 = 230,4kW \quad (4)$$

2.2.5. Toplam Klima Gücünün Hesaplanması

Toplam klima gücü Denklem (3) ile hesaplanmıştır:

$$P_{(klima)} = N_d \times P_k \quad (5)$$

Burada; N_d toplam klima sayısını, P_k klima gücünü ifade etmektedir.

$$P_{(klima)} = 200 \times 1 = 200 kW \quad (5)$$

2.2.6. Toplam Güç

Aydınlatma ve klima sistemlerinin toplam gücü Denklem (6) ile hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} P_{(toplaml)} &= P_{ayd} + P_{(klima)} \\ P_{(toplaml)} &= 230,4 + 200 = 430,4 kW \end{aligned} \quad (6)$$

2.2.7. Günlük ve Yıllık Enerji İsrafı

Günlük enerji israfı Denklem (7) ile hesaplanmıştır:

$$E_{günlük} = P_{(toplaml)} \times t \quad (7)$$

Burada; t günlük ortalama israf süresini(saat) ifade etmektedir.

$$E_{günlük} = 430,4 \times 2 = 860,8 kWh/gün \quad (8)$$

Yıllık enerji israfı Denklem (9) ile hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} E_{yıllık} &= E_{günlük} \times 300 \\ E_{yıllık} &= 860,8 \times 300 = 258.240kWh/yıl \end{aligned} \quad (9)$$

2.2.8. Ekonomik Kayıp Hesabı

Yıllık ekonomik kayıp Denklem (10) ile hesaplanmıştır:

$$M = E_{yillik} \times c \quad (10)$$

Burada; c elektrik enerjisinin birim kWh cinsinden TL karşılığını ifade etmektedir.

$$M = 258.240 \times 5 = 1.291.200 \text{ TL/yıl} \quad (11)$$

2.2.9. Karbon Eşdeğeri Emisyon Hesabı

Yıllık karbon emisyonu Denklem (8) ile hesaplanmıştır:

$$CO_2 = E_{yillik} \times EF \quad (11)$$

Burada;

EF birim kWh elektriğin tüketiminin neden olduğu karbon emisyonunu (kg) ifade etmektedir.

$$CO_2 = 258.240 \times 0,442 = 114,15 \text{ ton} \frac{CO_2}{yıl} \quad (11)$$

2.2.10. Karbon Emisyonu Azaltımının Çevresel Eşdeğerlikler Üzerinden Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında önlenen 114,15 ton CO₂/yıl düzeyindeki karbon emisyonu, çevresel etki açısından çeşitli yaygın kabul görmüş eşdeğerlikler üzerinden değerlendirildiğinde önemli ölçekte bir azaltıma karşılık gelmektedir. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yayımlanan sera gazı eşdeğerlik rehberine göre, ortalama bir binek aracın yıllık karbon salımı yaklaşık 4,6 ton CO₂ düzeyindedir; bu kabul doğrultusunda sağlanan emisyon azaltımı, yaklaşık 25 adet binek aracın bir yıl boyunca tamamen trafikten çekilmesine eşdeğerdir [6]. Aynı rehberde yer alan verilere göre, bir yetişkin ağacın yılda ortalama 20–22 kg CO₂ absorbe ettiği kabul edildiğinde, 114,15 ton CO₂'lik azaltım, yaklaşık 5.000–5.700 ağacın bir yıl boyunca karbon tutma kapasitesine denk gelmektedir [14,15]. Ayrıca Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verilerine göre, bir ağacın tüm yaşam döngüsü boyunca bağlayabildiği toplam karbon miktarı yaklaşık 1 ton CO₂ civarındadır; bu çerçevede elde edilen emisyon azaltımı, yaklaşık 114 ağacın ömür boyu karbon tutma kapasitesine karşılık gelmektedir [15]. Ulaşım kaynaklı emisyonlar açısından bakıldığında, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından raporlanan ortalama binek araç emisyon faktörleri dikkate alındığında bu miktar, yaklaşık 500.000 kilometreden fazla araç kullanımına karşılık gelen karbon salımının önlenmesi anlamına gelmektedir [16]. Bu eşdeğerlikler birlikte değerlendirildiğinde, projeye sağlanan karbon azaltımının hem nicel hem de çevresel anlamda iklim değişikliğiyle mücadelede somut ve ölçülebilir bir katkı sunduğu açıkça görülmektedir.

- **Toplam yıllık enerji israfı:** 258.240 kWh/yıl
- **Toplam yıllık ekonomik kayıp:** 1.291.200 TL/yıl
- **Toplam yıllık karbon emisyonu:** 114,15 ton CO₂/yıl

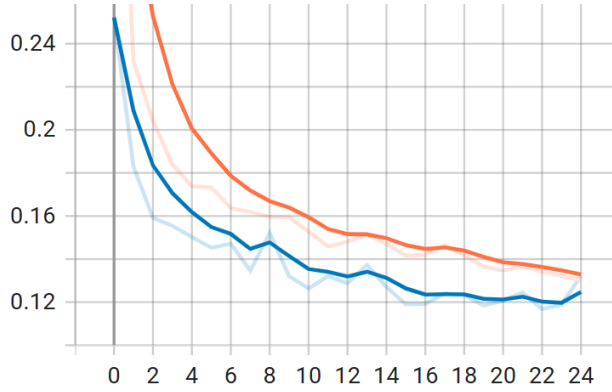
Belirtilen varsayımlar doğrultusunda gerçekleştirilen hesaplamalarda, yalnızca aydınlatma ve klima sistemlerinin günde 2 saat gereksiz çalıştırılmasının, üniversite ölçeğinde önemli düzeyde enerji tüketimine, yüksek ekonomik kayba ve dikkate değer miktarda karbon emisyonuna yol açtığı gösterilmiştir. Bu yaklaşım, enerji verimliliği önlemlerinin uygulanmaması durumunda oluşabilecek potansiyel çevresel ve ekonomik etkilerin net biçimde ortaya konmasını amaçlamaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik kriterleri çerçevesinde optimize edilen kaynak yönetimi, doğrudan kullanıcıların

yaşam kalitesini ve iç ortam standartlarını etkileyen sosyal bir boyuta sahiptir. Finansal verimliliğin toplumsal refah ve etik değerlerle kesiştiği bu alan, projenin sosyal sürdürülebilirlik stratejisini oluşturur.

3. Bulgular

3.1. Uç Cihaz (Edge Device) ve Yapay Zeka Model Performansı

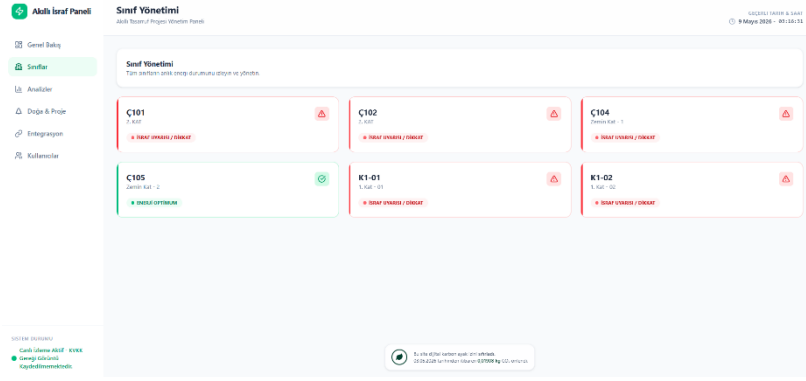
Geliştirilen otonom sistemin bilgisayar tabanlı uç simülasyon testlerinde, sınıf doluluk durumu anlık olarak analiz edilmiş ve donanım kaynaklarının kullanımı değerlendirilmiştir. Sınırlı bellek ve işlemci kapasitesine sahip edge mimarisine uyarlanan FOMO MobileNetV2 0.35 modeli, test veri seti üzerinde yüksek bir başarımla göstererek %87,4 F1-Skoru ve arka plan dışı (non-background) tespitlerde 0,96 kesinlik (precision) değerine ulaşmıştır. Görüntülerin kısıtlı donanımlara uygun olarak ön işlemlerden geçirilip işlenmesi sonucunda, modelin çıkarım (inference) süresi 38 milisaniye (ms) gibi son derece düşük bir seviyeye indirilmiştir. Ayrıca, optimize edilen modelin uç cihaz üzerindeki Flash bellek kullanımı yalnızca 82,7 KB olarak ölçülmüştür. Bu düşük bellek tüketimi ve hızlı çıkarım süresi, sistemin hedeflenen kısıtlı donanımlarda kararlı ve gerçek zamanlı çalışabildiğini doğrulamaktadır (Şekil 3).



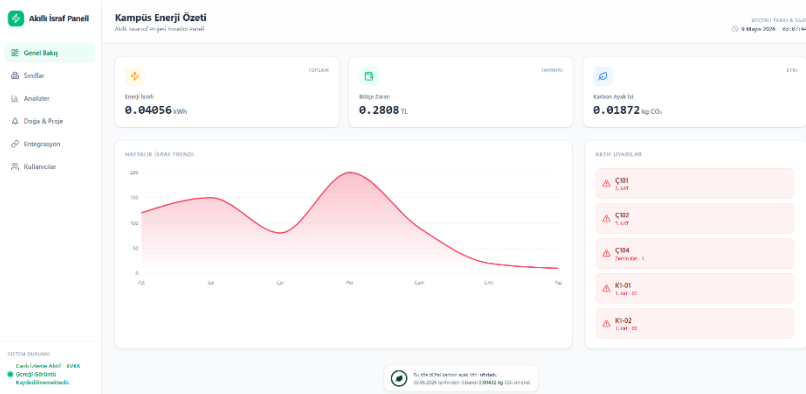
Şekil 3. FOMO MobileNetV2 0.35 modelinin eğitim (train) ve doğrulama (validation) süreçlerine ait kayıp (loss) grafiği.

3.2. Sistem Entegrasyonu ve Gerçek Zamanlı Veri İzleme (Dashboard)

Uç cihazda gerçekleştirilen anlık anomali tespiti ve doluluk verilerinin sistemin yönetim paneline (dashboard) aktarılmasında, Python tabanlı özel bir API entegrasyonu kurgulanmıştır. Kurulan bilgisayar simülasyonunun sorunsuz ve kararlı biçimde çalıştığı gözlemlenmiştir; "Tasarım Yoluyla Mahremiyet" ilkesi gereği görsel verilerin TensorFlow Lite (TFLite) çalışma zamanı (runtime) kullanılarak doğrudan yerel bellekte (RAM) işlenip anında imha edildiği ve yalnızca ikili (binary) doluluk durumunun JSON formatında dışa aktarıldığı başarıyla doğrulanmıştır. Uç cihaz ile yönetim paneli arasındaki veri senkronizasyonu, geliştirilen bu Python API aracılığıyla 3 saniyelik bir periyotla sağlanmıştır. Panele ulaşan 1/0 (dolu/boş) verileri, aydınlatma ve iklimlendirme anlık güç tüketim katsayılarıyla çarpılarak; anlık enerji israfı, önlenen karbon salımı ve finansal tasarruf değerleri her 3 saniyede bir dinamik olarak görselleştirilmiştir. Panelde veri alışverişinin doğru şekilde sağlanıp sağlanmadığını rahatlıkla görebilmek için bir sistem entegrasyon paneli yerleştirilmiştir. (Şekil 4, Şekil 5).



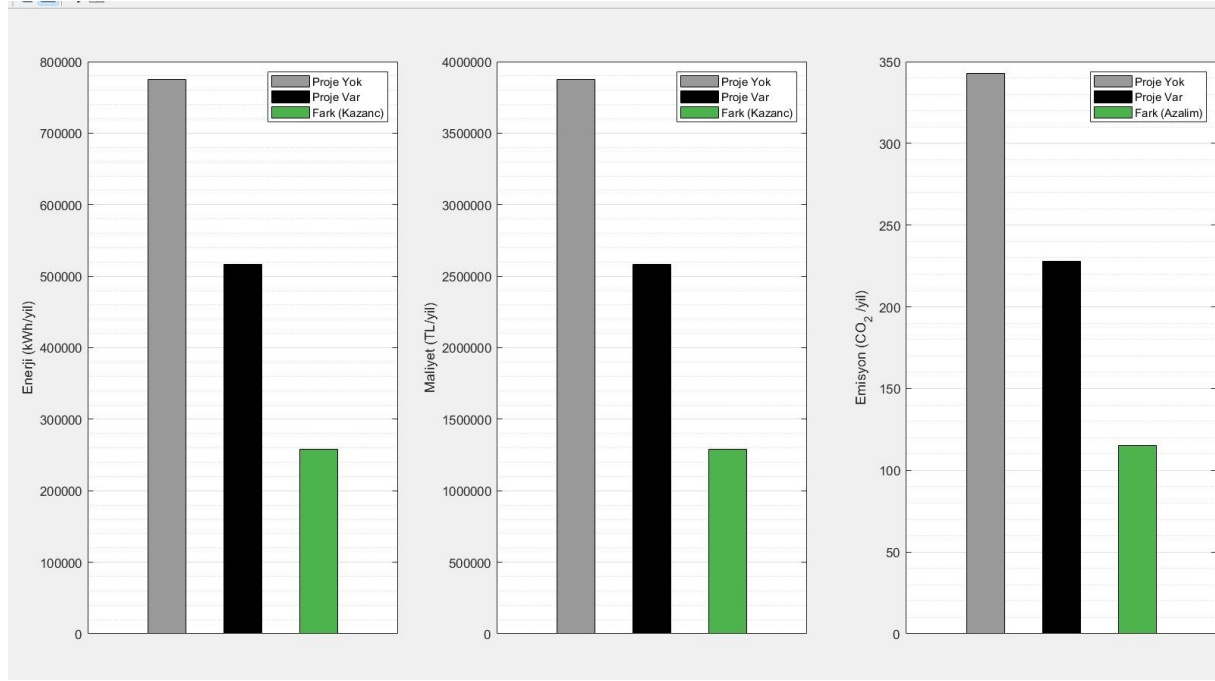
Şekil 5. Gerçek Zamanlı Veri İzleme Paneli (Dashboard)



Şekil 4. Gerçek Zamanlı Veri İzleme Paneli (Dashboard)

3.3. Enerji Verimliliği ve Karbon Ayak İzi Optimizasyonu

Geliştirilen otonom sistemin, eğitim binalarında statik zamanlamalardan kaynaklanan israf periyotlarını engelleme potansiyeli 10 binalık (200 derslikli) tam kampüs senaryosu için hesaplanmıştır. Yapılan güncel analizlere göre; boş sınıflarda açık bırakılan iklimlendirme ve aydınlatma sistemlerinin otonom olarak kapatılmasıyla israfın önlendiği senaryoda, üniversite kampüsünde yıllık toplam 258.240 kWh enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. Elde edilen bu operasyonel enerji optimizasyonu, çevresel kazanımlara dönüştürüldüğünde; Kapsam 2 emisyonlarında yıllık 114,15 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı salımının engelleneceği hesaplanmıştır. Finansal açıdan ise güncel elektrik tarifeleri baz alındığında, sistemin kuruma yıllık 1.291.200 TL tutarında doğrudan ekonomik kayıp önleme avantajı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu bulgular, IoT tabanlı uç bilişim donanımlarının yeşil kampüs hedeflerine ulaşmada ne denli kritik ve maliyet etkin bir rol oynadığını kanıtlamaktadır. Belirtilmiş standartlarda yapılmış hesaplamaların kampüs hedeflerindeki etkinliğine, üniversite ve ülke ekonomisine olan fark ve etkisi grafikte belirtilmiştir.



Şekil 6. Enerji, Maliyet, Emisyon fark tablosu.

4. Sonuç

Bu çalışmada, yükseköğretim kurumlarında statik zamanlamalardan ve operasyonel hatalardan kaynaklanan enerji israfını engellemek amacıyla uçta bilişim (edge computing) tabanlı otonom bir görüntü işleme sistemi geliştirilmiştir. Sınırlı donanım kaynaklarına sahip uç cihazlar (TinyML) üzerinde çalıştırılan FOMO MobileNetV2 0.35 mimarisi, sınıf doluluğu tespitinde %87,4 F1-Skoru ve 38 milisaniye (ms) gibi oldukça düşük bir çıkarım süresi elde ederek sistemin gerçek zamanlı ve kararlı çalışma yeteneğini kanıtlamıştır.

Sistemin en güçlü yönlerinden biri olan "Tasarım Yoluyla Mahremiyet" (Privacy-by-Design) ilkesi sayesinde, eğitim alanlarındaki kameralardan elde edilen görüntüler hiçbir bulut sunucusuna aktarılmadan yalnızca uç cihazın geçici belleğinde (RAM) işlenip anında imha edilmiştir. Bu yaklaşım, kimlik tespitine yarayacak biyometrik verilerin oluşumunu donanım seviyesinde engelleyerek KVKK ve GDPR gibi yasal düzenlemelere tam uyum sağlamıştır. Ayrıca, elde edilen yalnızca ikili (dolu/boş) verilerin düşük bant genişliği tüketen Python tabanlı API entegrasyonu ile yönetim paneline aktarılması, sistemin güvenli ve şeffaf bir şekilde izlenebilmesine olanak tanımıştır.

Çevresel ve ekonomik etki değerlendirmesi sonuçlarına göre, 10 binalık (200 derslikli) bir pilot kampüs projeksiyonunda günlük ortalama 2 saatlik iklimlendirme ve aydınlatma israfının engellenmesiyle yıllık 258.240 kWh enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. Bu donanımsal optimizasyon, güncel tarifeler üzerinden kuruma yıllık 1.291.200 TL tutarında doğrudan ekonomik kayıp önleme avantajı sunarken, Kapsam 2 emisyonlarında 114,15 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı salımını engelleyerek üniversitelerin "Yeşil Kampüs" ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (BM SKA) hedefleriyle doğrudan örtüşmektedir.

Gelecek çalışmalarda ve projenin ticarileşme fazında, görsel veriyi kaynağında tamamen ortadan kaldırarak mahremiyeti mutlak hale getirmek amacıyla düşük çözünürlüklü termal sensörlere geçiş yapılması planlanmaktadır. Termal sensörler, kişilerin yüz hatları yerine yalnızca kızılötesi ısı imzalarını algılayarak RAM üzerinde silme işlemine dahi gerek kalmadan anonimliği donanım mimarisiyle garanti altına almaktadır. Buna ek olarak, bir sonraki aşamada sistemin doğrudan Bina Yönetim Sistemleri ile entegre edilerek iklimlendirme (HVAC) ekipmanlarını otonom şekilde kontrol

etmesi hedeflenmektedir. Sonuç olarak bu teknoloji; eğitim yapılarında sürdürülebilir, maliyet etkin ve yüksek konforlu bir enerji yönetimi için uygulanabilir, ölçeklenebilir bir çerçeve sunmaktadır.

Elde edilen bu operasyonel enerji optimizasyonu çevresel kazanımlara dönüştürüldüğünde; Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları kapsamında belirlenen iklim eylemi ve temiz enerji hedefleriyle doğrudan uyumlu olarak, Kapsam 2 emisyonlarında sera gazı salımının azaltılabileceği proje kapsamınca ispatlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] V. Motuzienė, J. Bielskus, R. Dziugaitė-Tumėnienė, V. Raudonis, Occupancy Based Predictive AI-Driven Ventilation Control for Energy Savings in Office Buildings. *Sustainability*, 17(9), (2025) 4140.
- [2] O. Morales, N. Pardo, J. Gonzalez, Carbon footprint assessment for university campuses using corporate accounting and reporting standard protocol. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 12(2), (2026) 625-650.
- [3] J. Dong, C. Winstead, J. Nutaro, T. Kuruganti, Occupancy-Based HVAC Control with Short-Term Occupancy Prediction Algorithms for Energy-Efficient Buildings. *Energies*, 11(9), (2018) 2427.
- [4] I. Rojek, P. Prokopowicz, M. Piechowiak, P. Kotlarz, N. Náprstková, D. Mikołajewski, The Impact of Data Analytics Based on Internet of Things, Edge Computing, and Artificial Intelligence on Energy Efficiency in Smart Environment. *Applied Sciences*, 16(1), (2026) 225.
- [5] S. Hymel, C. Banbury, D. Situnayake, A. Elium, C. Ward, M. Kelcey, M. Baaijens, M. Majchrzycki, J. Plunkett, D. Tischler, A. Grande, L. Moreau, D. Maslov, A. Beavis, J. Jongboom, V. Janapa Reddi, Edge Impulse: An MLOps platform for Tiny Machine Learning. *Proceedings of Machine Learning and Systems*, 5, (2023) 254–268.
- [6] C. Perdahçı, Metal işleme tesis aydınlatmasında LED ve floresan lambaların enerji verimliliği açısından karşılaştırılması. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 30(3), (2018) 105–113.
- [7] B. Zeybekoğlu, Klima elektrik tüketimi ve etkileyen faktörler. <https://www.klima.web.tr/>, (2024).
- [8] Edge Impulse. (n.d.-a). FOMO (Faster Objects, More Objects). Edge Impulse Documentation. Retrieved May 6, 2026, from <https://docs.edgeimpulse.com/studio/projects/learning-blocks/blocks/object-detection/fomo>
- [9] Edge Impulse. (n.d.-b). Object detection with centroids (FOMO). Edge Impulse Documentation. Retrieved May 6, 2026, from <https://docs.edgeimpulse.com/tutorials/end-to-end/object-detection-centroids>
- [10] A. Cavoukian, Privacy by Design: The 7 Foundational Principles. Information and Privacy Commissioner of Ontario, (2009) Canada.
- [11] X. Zhang, "Privacy-preserving edge computing: A survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(3), 1802-1835.
- [12] Z. Ren, (2019). "Privacy-preserving occupancy detection in smart buildings." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(11), 6135-6144.
- [13] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri (2022 yılı verileri). (2024) Ankara: ETKB.
- [14] Environmental Protection Agency (EPA), Greenhouse gas equivalencies calculator and references. (2023) <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- [15] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Trees, forests and land use in carbon balance. (2019) Rome.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), AR6 Working Group III: Mitigation of climate change. (2022) Cambridge University Press.



Enerji Etkin Optimum Stok Seviyesi Belirleme ve Ürün Stok Politikası Modeli Geliştirme

Ecenaz Kılıç^{1*}, Gülşen Aydın Keskin²

^{1*} Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ecenazzkilicc@gmail.com

² Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, gulsen.keskin@balikesir.edu.tr

Özet

Günümüzde enerji maliyetlerinin artması ve sürdürülebilirlik kavramının önem kazanması, enerji yoğun üretim yapan sanayi işletmelerini süreçlerini optimize etmeye zorlamaktadır. Bu çalışma, kimya sektöründe faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilmiş olup, stok yönetimi kararlarının enerji verimliliği üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, işletmenin karmaşık stok yapısını analiz etmek için geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek Enerji Etkin Stok Yönetimi yaklaşımı benimsenmiştir. İlk aşamada, ürünler ABC analizi ile finansal değerlerine, XYZ analizi ile talep değişkenliklerine göre sınıflandırılarak dokuz farklı kategoriye ayrılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, özellikle talep belirsizliği yüksek olan ürünlerde, stokluz kalmanın yarattığı enerji maliyetinin stok tutma maliyetinden daha yüksek risk taşıdığı görülmüştür. Bu çalışma, stok yönetimini sadece finansal bir karar değil, aynı zamanda bir enerji verimliliği aracı olarak ele alması bakımından literatüre katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Stok Yönetimi; ABC-XYZ Analizi; Enerji Verimliliği, Optimum Stok.

Energy Efficient Optimum Stock Level Determination and Product Inventory Policy Model Development

Abstract

Today, rising energy costs and the increasing importance of sustainability are forcing energy-intensive industrial enterprises to optimize their processes. This study, conducted in a chemical industry firm, aims to examine the effects of inventory management decisions on energy efficiency. To analyze the complex inventory structure of the company, an Energy Efficient Inventory Management approach was adopted, going beyond traditional methods. In the first stage, products were classified into nine different categories using ABC analysis based on their financial value and XYZ analysis based on demand variability. The analyses revealed that, particularly for products with high demand uncertainty, the energy cost of running out of stock carries a higher risk than the cost of holding inventory. This study contributes to the literature by considering inventory management not only as a financial decision but also as an energy efficiency tool.

Keywords: Inventory Management; ABC-XYZ Analysis; Energy Efficiency, Optimum Stock

1. Giriş

Günümüzde sanayi işletmeleri, rekabet avantajı elde edebilmek ve sürdürülebilirliklerini koruyabilmek için kaynaklarını en verimli şekilde kullanmak zorundadır. En kritik unsurların başında ise, üretim süreçlerinin kesintisiz devamlılığı ile finansal verimlilik arasındaki hassas dengeyi sağlayan stok yönetimi gelmektedir [1]. Sanayi işletmeleri genellikle stoksuz kalma riskini önlemek amacıyla yüksek güvenlik stoğu tutma eğilimindedir; ancak bu durum işletme sermayesinin verimsiz kullanımına yol açmaktadır.

Literatür incelendiğinde, klasik tek boyutlu envanter yöntemlerinin günümüzün karmaşık tedarik zincirleri için yetersiz kaldığı görülmektedir [2,3] Örneğin, Karabıçak vd. temizlik kâğıdı sektöründe ABC-XYZ analizini entegre etmiş ve değişkenliği yüksek ürünlerde yapay sınır ağları gibi ileri düzey araçlar önermişlerdir [4]. Stok optimizasyonunun enerji tasarrufu ile doğrudan bağlantılı olduğu da vurgulanmaktadır. Pattnaik vd. envanter politikalarının sadece maliyet odaklı değil, enerji tüketimi ve karbon ayak izini azaltacak şekilde optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir [5].

Bu doğrultuda, çalışmada firmanın proseslerinde ABC-XYZ analizi yapılarak, ürünler talep değişkenliklerine ve önem derecelerine göre sınıflandırılmıştır. Amaç, geliştirilecek politikalarla hem finansal stok maliyetlerinin hem de depolama süreçleri ile makine duruş-kalkışlarından kaynaklanan enerji tüketiminin minimize edilmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Uygulama, sürekli akış gerektiren ve fırınların 7/24 çalışmak zorunda olduğu kimya sektöründe faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilmiştir. İşletmenin ERP sisteminden 2023, 2024 ve 2025 yıllarına ait satış, üretim ve stok verileri temin edilmiştir. Analiz sürecinde, en çok üretilen, stok devir hızları anlamlı olarak ölçülebilen ve optimizasyon ihtiyacı en yüksek olan 44 kritik ürün materyal olarak kullanılmıştır.

Çalışmada ürünler Pareto (80/20) ilkesine dayanan ABC analizi ile yıllık kullanım değerlerine göre A, B ve C gruplarına ayrılmıştır [6]. Talep değişkenliği ise XYZ analizi çerçevesinde Değişim Katsayısı (CV) hesaplanarak standart sapmanın ortalamaya bölünmesiyle tespit edilmiş ve X, Y, Z şeklinde sınıflandırılmıştır. Değişim katsayısı %50'ye kadar olanlar X, %50-%100 arası Y, %100 üzeri ise Z sınıfına dahil edilmiştir.

Çalışmada %95 hizmet seviyesi ile ($Z=1.645$) emniyet stokları hesaplanmıştır [7]. Emniyet Stoğu formülü Denklem 1 de gösterilmiştir.

$$SS = Z \times \sigma \times \sqrt{LT} \quad (1)$$

2.2. Metot

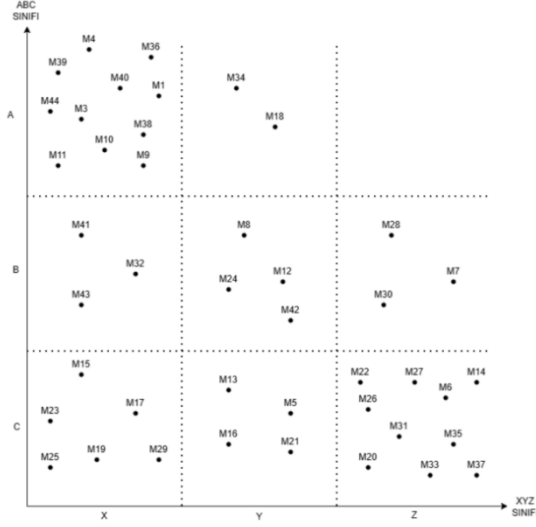
Bu çalışmada, işletmenin stok politikalarını dinamik bir yapıya kavuşturmak amacıyla geleneksel tek boyutlu yaklaşımların yerine ABC-XYZ matrisi kullanılmıştır. İlk olarak Pareto ilkesine dayanan ABC analizi ile ürünler yıllık kullanım değerlerine göre A, B ve C sınıflarına ayrılmıştır. Ardından, ürünlerin talep dalgalanmalarını ve öngörülebilirliğini ölçmek için değişim katsayısı hesaplanarak XYZ analizi uygulanmış ve ürünler X (düzenli), Y (orta dalgalı) ve Z (düzensiz) olarak sınıflandırılmıştır.

Bu iki boyutlu sınıflandırma sonucunda elde edilen dokuz hücreli matris yapısı (AX, AY, AZ... CZ), stok kalemlerinin yalnızca maliyet temelli değil, lojistik ve operasyonel riskler açısından da stratejik biçimde kategorize edilmesini sağlamıştır. Matris sonuçlarına göre stok devir hızları da

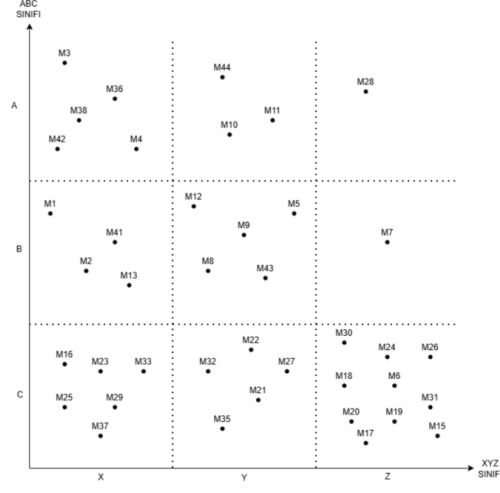
hesaplanmıştır. Özellikle fırınların 7/24 çalışmak zorunda olduğu üretim hattında, stoksuz kalma maliyeti ile enerji israfı birlikte değerlendirilerek her gruba özel emniyet stokları belirlenecektir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Geliştirilen yöntem çerçevesinde, işletmenin 2024 ve 2025 yılları verileri kullanılarak analiz edilen 44 kritik ürünün ABC-XYZ matrisindeki dağılımları elde edilmiştir.



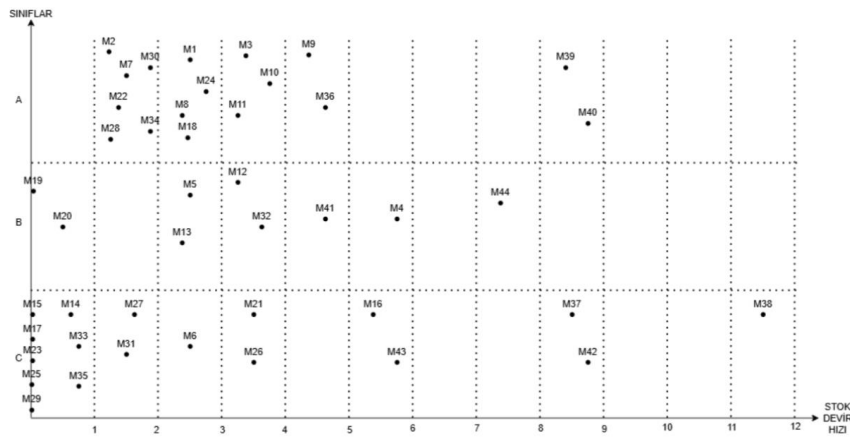
Şekil 1. 44 ürünün 2024 yılı ABC-XYZ Grafiği



Şekil 2. 44 ürünün 2025 yılı ABC-XYZ Grafiği

Analiz sonuçlarına göre hem finansal değeri yüksek hem de talebi stabil olan AX sınıfı ürünlerde (örneğin M3 ve M36) yüksek emniyet stoku tutmaya gerek olmadığı belirlenmiştir. Bu grupta dinamik ve düşük seviyeli stok politikaları izlenerek elde tutma maliyetleri ve depo enerji sarfıyatı minimize edilebilir. Buna karşın, birim maliyeti düşük ancak talep belirsizliği çok yüksek olan CZ sınıfı ürünlerde (örneğin M31), stoksuz kalmanın yaratacağı enerji kaybı riski, finansal yükten çok daha fazladır. Bu nedenle CZ grubunda bilinçli olarak emniyet stoku oranları yüksek tutulmalıdır.

Sermaye ve enerji verimliliğinin temel göstergelerinden biri olan stok devir hızları incelendiğinde ise işletmenin mevcut politikalarının talep dalgalanmalarına uyum sağlayamadığı görülmüştür.



Şekil 3. 44 ürünün 2024 yılı stok devir hızı grafiği



Göz Kırpma ile İletişim Sistemi: Felçli Hastalar İçin Yapay Zeka Destekli Göz Kırpma Tanıma ve Komut Sistemi

Sena ALTINTOP^{1*}, Ahmet Haşim YURTTAKAL²

¹Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü sena.altntp04@gmail.com

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ahyurttakal@aku.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, motor fonksiyonlarını yitirmiş felçli ve ALS hastaları için standart bir web kamerası kullanılarak gerçek zamanlı çalışan yapay zeka destekli bir göz kırpma tanıma ve komut sistemi geliştirilmiştir. Sistem; Haar Cascade ile yüz ve göz bölgesi tespiti, MobileNetV2 tabanlı transfer öğrenmesi ile göz açık/kapalı sınıflandırması ve kısa/uzun kırpma dizilerini yorumlayan durum makinesi (BlinkStateMachine) olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. MRL Eye Dataset üzerinde eğitilen model, 160×160 piksel giriş boyutu, 32'lik batch boyutu ve Adam optimizörü ($\text{lr}=1\text{e-}4$) ile 15 epoch eğitilmiştir. Geliştirilen sistem %96 doğruluk, 0.99 ROC AUC skoru ve 0.99 ortalama hassasiyet değerleriyle yüksek performans sergilemiştir. Durum makinesi; debounce mekanizması (3 kare üst üste aynı durum), refleks filtresi (≥ 0.20 s), kısa kırpma (< 0.60 s) ve uzun kırpma (≥ 0.80 s) ayrımıyla 8'den fazla komutu güvenilir biçimde tanımaktadır. Grad-CAM analiziyle modelin göz kapağı kenarı ve iris bölgesine odaklandığı doğrulanmış; yorum edilebilirlik açısından anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Işık değişkenliği testlerinde normal koşullarda (parlaklığın %80-%150'si) %94-96 başarı elde edilmiş, düşük ışıktaki (%50) ise bu oran %64'e gerilemiştir. Sonuç olarak, pahalı göz izleme donanımlarına ihtiyaç duymadan erişilebilir ve düşük maliyetli bir iletişim arayüzü sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Felçli hasta iletişimi, Göz kırpma tanıma, MobileNetV2, Transfer öğrenmesi, Yardımcı teknoloji

Blink Communicator: An AI-Powered Eye Blink Recognition and Command System for Paralyzed Patients

Abstract

In this study, an artificial intelligence-supported real-time eye blink recognition and command system was developed for paralyzed and ALS patients who have lost motor functions, using a standard web camera. The system consists of three main components: face and eye region detection with Haar Cascade, open/closed eye classification with MobileNetV2-based transfer learning, and a state machine (BlinkStateMachine) that interprets short/long blink sequences. The model trained on the MRL Eye Dataset was trained for 15 epochs with 160×160 pixel input size, batch size of 32, and Adam optimizer ($\text{lr}=1\text{e-}4$). The developed system achieved high performance with 96% accuracy, 0.99 ROC AUC score, and 0.99 mean precision values. The state machine reliably recognizes more than 8 commands with a debounce mechanism (3 consecutive frames same state), reflex filter (≥ 0.20 s), short blink (< 0.60 s) and

long blink (≥ 0.80 s) distinction. Grad-CAM analysis confirmed that the model focuses on the eyelid edge and iris region, yielding meaningful results in terms of interpretability. In light variability tests, 94-96% success was achieved under normal conditions (80-150% of brightness), while this rate dropped to 64% in low light (50%). As a result, an accessible and low-cost communication interface is presented without the need for expensive eye-tracking hardware.

Keywords: Artificial Intelligence, Eye Blink Recognition, MobileNetV2, Assistive Technology, ALS Patients, Human-ComputerInteraction, Real-timeSystems.

1. Giriş

Motor fonksiyonlarını büyük ölçüde veya tamamen yitirmiş bireyler; felç, ALS (Amiyotrofik Lateral Skleroz) ve benzeri nörodejeneratif hastalıklar nedeniyle çevresiyle iletişim kurmakta ciddi güçlükler yaşamaktadır. Bu hastalar için geliştirilen yardımcı iletişim teknolojileri, yaşam kalitesinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Göz hareketleri ve göz kırpma, motor bozukluğu olan bireylerde en uzun süre korunan isteğe bağlı kontrol mekanizmalarından birini oluşturmaktadır.

Mevcut göz izleme çözümleri (örn. Tobii göz takip sistemleri) yüksek maliyet ve özel donanım gerektirdiğinden yaygın erişimi kısıtlamaktadır. Bu çalışma, standart bir web kamerası kullanarak düşük maliyetli ve erişilebilir bir alternatif sunmaktadır. MobileNetV2 tabanlı derin öğrenme modeli ve BlinkStateMachine durum makinesiyle geliştirilen sistem; kısa ve uzun göz kırpmaları aracılığıyla 8'den fazla komutun güvenilir biçimde tanınmasını sağlamaktadır. Literatürde göz kırpma tespitine yönelik benzer çalışmalar bulunmakla birlikte [1, 4], bu çalışmanın yüksek doğruluk oranı (%96) ve gerçek zamanlı işlem kapasitesiyle öne çıktığı görülmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde sistemin üç temel bileşeni olan yüz/göz tespiti, sınıflandırma modeli ve durum makinesi ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır. Geliştirme sürecinde Python programlama dili, OpenCV kütüphanesi ve TensorFlow/Keras çerçevesi kullanılmıştır.

2.1. Materyal

Çalışmada MRL Eye Dataset kullanılmıştır [6]. Bu veri seti, farklı ışık koşulları ve kişilerden elde edilen 84.898 göz görüntüsü içermekte olup "açık göz" ve "kapalı göz" şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Tüm görüntüler 160×160 piksel boyutuna yeniden ölçeklendirilmiş ve normalize edilmiştir. Eğitim/doğrulama/test ayrımı %70/%15/%15 oranında gerçekleştirilmiş; test kümesi 12.735 görüntüden oluşmaktadır. Donanım olarak standart bir USB web kamerası (720p, 30 fps) kullanılmıştır.

2.2. Metot

Yüz ve göz tespiti için OpenCV kütüphanesindeki Haar Cascade sınıflandırıcıları kullanılmıştır [7]. Tespit edilen göz bölgeleri MobileNetV2 modeline aktararak açık/kapalı sınıflandırması yapılmıştır [2]. Model, ImageNet ağırlıklarıyla başlatılmış ve son katmanlar MRL veri seti üzerinde ince ayar (fine-tuning) ile eğitilmiştir [6]. Eğitimde Adam optimizörü (öğrenme hızı $1e-4$), binary cross-entropy kayıp fonksiyonu ve 32'lik batch boyutu kullanılmıştır. Toplam 15 epoch eğitim gerçekleştirilmiştir. BlinkStateMachine; debounce mekanizması ile anlık titremeleri filtreleyerek kısa kırpma (< 0.60 s) ve uzun kırpma (≥ 0.80 s) ayrımını ≥ 0.20 s refleks filtresiyle güvenilir biçimde yapabilmektedir [4]. Modelin karar mekanizmasını görselleştirmek için Grad-CAM yöntemi uygulanmıştır [3]. Gerçek zamanlı göz kırpma tespiti için yüz landmarkı tabanlı yaklaşımlar da literatürde mevcuttur [5].

3. Sonuçlar ve Tartışma

Geliştirilen sistem; %96 doğruluk, 0.99 ROC AUC skoru ve 0.99 ortalama hassasiyet (precision) değerleriyle yüksek performans sergilemiştir. Işık değişkenliği testlerinde normal koşullarda (parlaklığın %80-%150 aralığı) %94-96 başarı elde edilmiş; buna karşın düşük ışık koşullarında (%50 parlaklık) başarı oranı %64'e gerilemiştir. Grad-CAM görselleştirme analizi [3], modelin göz kapağı kenarı ve iris bölgesine odaklandığını doğrulayarak yorum edilebilirlik açısından anlamlı sonuçlar ortaya koymuştur.

3.1. Model Performansı

MobileNetV2 modeli [2] test veri seti üzerinde değerlendirilmiş ve yüksek sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. ROC eğrisi altındaki alan (AUC) 0.99 olarak hesaplanmış olup model hem açık hem de kapalı göz sınıflarında yüksek kesinlik (precision) ve duyarlılık (recall) değerlerine ulaşmıştır. Eğitim süreci boyunca doğrulama kaybı istikrarlı bir düşüş sergilemiş ve aşırı öğrenme (overfitting) belirtisi gözlemlenmemiştir.

3.2. Işık Koşulları ve Durum Makinesi Performansı

Işık değişkenliği testleri, farklı parlaklık koşullarında sistemin kararlılığını ölçmek amacıyla yürütülmüştür. Normal aydınlatma koşullarında (%80-%150 parlaklık) sistem %94-96 başarı oranı elde etmiştir. Düşük ışık koşullarında (%50 parlaklık) ise başarı oranı %64'e gerilemiştir; bu durum, ışık normalizasyon tekniklerinin gelecek çalışmalarda ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. BlinkStateMachine; 3 kare üst üste aynı durumun tespiti ile debounce yapısını sağlamakta, böylece yanlış tetiklemeleri minimize etmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, standart bir web kamerası kullanılarak gerçek zamanlı çalışan, düşük maliyetli ve erişilebilir bir göz kırpma tanıma sistemi başarıyla geliştirilmiştir. Sistem; %96 doğruluk oranı, 0.99 ROC AUC skoru ve güvenilir durum makinesi tasarımıyla felçli ve ALS hastaları için pratik bir iletişim arayüzü sunmaktadır. Pahalı göz izleme donanımlarına gerek kalmaksızın 8'den fazla komutun tanınabilmesi, sistemin klinik uygulanabilirliğini artırmaktadır. Gelecek çalışmalarda düşük ışık koşullarındaki performansın iyileştirilmesi ve sisteme daha fazla komut eklenmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] A. Krolak, P. Strumillo, Eye-blink detection system for human-computer interaction, Universal Access in the Information Society. 11 (2012) 409–419.
- [2] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L.-C. Chen, MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks, Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). (2018) 4510–4520.
- [3] R.R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, D. Batra, Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). (2017) 618–626.
- [4] S. Meghana, R. Monica, K. Nayana, S.S. Neha, Eye Blink Detection Method for Disabled: Assisting System for Paralyzed, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 8 (2020).
- [5] T. Soukupova, J. Cech, Real-Time Eye Blink Detection using Facial Landmarks, Proc. 21st Computer Vision Winter Workshop. (2016).
- [6] MRL Eye Dataset, Machine Learning Research Lab, VSB-Technical University of Ostrava. <http://mrl.cs.vsb.cz/eyedataset>
- [7] P. Viola, M. Jones, Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features, Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 1 (2001) 511–518.



Derin Öğrenme Tabanlı Trafik İşareti Tanıma: GTSRB Veri Seti Üzerine Bir Uygulama

Ilkhom Tabyldiev^{1*}, Ahmet Haşim Yurttakal²

^{1*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, tabyldievlhom@gmail.com

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ahyurttakal@aku.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, GTSRB (German Traffic Sign Recognition Benchmark) veri seti kullanılarak derin öğrenme tabanlı bir trafik işareti tanıma sistemi geliştirilmiştir. Trafik işaretlerinin doğru ve hızlı şekilde tanınması, otonom araçlar ve gelişmiş sürücü destek sistemleri açısından kritik öneme sahiptir. Veri seti, 43 farklı trafik işareti sınıfına ait 50.000'den fazla gerçek dünya görüntüsünü içermektedir. Geliştirilen Evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network, CNN) modeli; Conv2D, Batch Normalization, Max Pooling, Dropout ve Dense katmanlarından oluşmaktadır. Görüntüler 64×64 piksel boyutuna yeniden ölçeklendirilmiş ve normalize edilmiştir. Eğitim verisi stratified yöntemle %80 eğitim ve %20 doğrulama olarak ayrılmış; test verileri ayrı tutulmuştur. Model, Adam optimizasyon algoritması ve sparse categorical crossentropy kayıp fonksiyonu ile eğitilmiş; Early Stopping yöntemi ile 15 epoch sonunda eğitim tamamlanmıştır. Test veri seti üzerinde %97,55 doğruluk oranı ve 0,1877 kayıp değeri elde edilmiş; 12.630 görüntüden yalnızca 310 tanesi yanlış sınıflandırılmıştır. Ayrıca model için macro ortalama F1 skoru 0,96 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, modelin literatürdeki benzer çalışmalarla rekabet edebilecek düzeyde olduğunu göstermektedir. Geliştirilen sistem, Gradio arayüzü ile web ortamına taşınarak kullanıcıların görsel yükleyerek veya kamera aracılığıyla trafik işareti tanıma işlemi gerçekleştirmesine olanak sağlamaktadır. Bu tür sistemler; otonom araçlar, akıllı ulaşım sistemleri ve sürücü destek sistemlerinde trafik güvenliğinin artırılması, kaza oranlarının azaltılması ve gerçek zamanlı karar verme süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Derin Öğrenme; Evrişimsel Sinir Ağları (CNN); Görüntü İşleme, GTSRB Veri Seti, Sınıflandırma, Bilgisayar Görüsü.

Deep Learning-Based Traffic Sign Recognition: An Application on the GTSRB Dataset

Abstract

In this study, a deep learning-based traffic sign recognition system was developed using the GTSRB (German Traffic Sign Recognition Benchmark) dataset. Accurate and fast recognition of traffic signs is of critical importance for autonomous vehicles and advanced driver assistance systems. The dataset contains more than 50,000 real-world images belonging to 43 different traffic sign classes. The developed Convolutional Neural Network (CNN) model consists of Conv2D, Batch Normalization, Max Pooling, Dropout, and Dense layers. Images were resized to 64×64 pixels and normalized. The training data was split into 80% training and 20% validation using stratified sampling; test data was kept separate. The

model was trained using the Adam optimizer and sparse categorical crossentropy loss function; training was completed in 15 epochs using Early Stopping. A test accuracy of 97.55% and a loss value of 0.1877 were achieved; only 310 out of 12,630 images were misclassified. The macro average F1 score was calculated as 0.96. The results demonstrate that the model is competitive with similar CNN-based studies in the literature. The developed system was deployed to the web using a Gradio interface, enabling users to perform traffic sign recognition by uploading images or using a camera.

Keywords: Deep Learning; Convolutional Neural Networks (CNN), Image Processing; GTSRB Dataset, Classification, Computer Vision.

1. Giriş

Trafik işaretlerinin otomatik olarak tanınması, otonom araç sistemleri ve gelişmiş sürücü destek sistemleri (ADAS) için kritik bir öneme sahiptir. Hız limiti ihlalleri ve trafik işaretlerinin gözden kaçırılması, trafik kazalarının önemli nedenlerinden birini oluşturmaktadır. Bu nedenle güvenilir ve hızlı çalışan bir trafik işareti tanıma sisteminin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Derin öğrenme yöntemleri, özellikle Evrişimli Sinir Ağları (CNN), görüntü tanıma alanında geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla üstün performans sergilemektedir [1]. Tesla ve Waymo gibi otonom araç üreticilerinin aktif olarak kullandığı bu tür sistemler, kamera görüntülerini analiz ederek trafik işaretlerini gerçek zamanlı olarak tanımaktadır. Bu çalışmada GTSRB veri seti kullanılarak CNN tabanlı bir trafik işareti tanıma modeli geliştirilmiş ve Gradio arayüzü ile web ortamına taşınmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada trafik işaretlerinin sınıflandırılması için Evrişimli Sinir Ağı (CNN) mimarisi kullanılmıştır. Eğitim verisi Train klasöründen klasör yapısı aracılığıyla okunmuş; her klasörün adı doğrudan sınıf etiketini temsil etmektedir. Test verisi ise Test.csv dosyası kullanılarak yüklenmiştir.

2.1. Veri Seti

GTSRB veri seti Kaggle platformundan temin edilmiştir [1,2]. Veri seti; dur işaretleri, hız limitleri, yol ver, tehlike uyarıları ve yön işaretleri dahil olmak üzere 43 farklı trafik işareti sınıfına ait toplam 50.000'den fazla gerçek dünya görüntüsü içermektedir [1]. Görüntüler farklı ışık koşulları, hava durumları ve kamera açılarındaki çekilmiş olup gerçek dünya koşullarını yansıtan zengin bir veri kaynağı sunmaktadır. Veri setine ilişkin temel bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. GTSRB Veri Seti İçeriği

Özellik	Eğitim Seti	Test Seti
Görüntü Sayısı	39.209	12.630
Sınıf Sayısı	43	43

2.2. Model Mimarisi ve Eğitim

Tüm görüntüler 64x64 piksel boyutuna yeniden ölçeklendirilmiş ve piksel değerleri [0, 1] aralığına normalize edilmiştir. Eğitim verisi %80 eğitim, %20 doğrulama olarak stratified split ile ayrılmıştır. CNN mimarisi; üç Conv2D bloğundan oluşmaktadır. Her blok sırasıyla Conv2D (32, 64, 128 filtre), BatchNormalization ve MaxPooling2D katmanlarını içermektedir. Tüm evrişim katmanlarında ReLU aktivasyonu ve padding='same' kullanılmıştır. Düzleştirme işleminin ardından 256 nöronlu Dense katman, Dropout (0.5) ve çıkış katmanında 43 sınıf için Softmax aktivasyonu eklenmiştir. Model Adam

optimizer ve sparse categorical crossentropy kayıp fonksiyonu ile derlenmiştir. Eğitim sürecinde EarlyStopping (patience=5, restore_best_weights=True) geri çağırımı kullanılmış ve model 15 epoch sonunda durmuştur [3].

3. Sonuçlar ve Tartışma

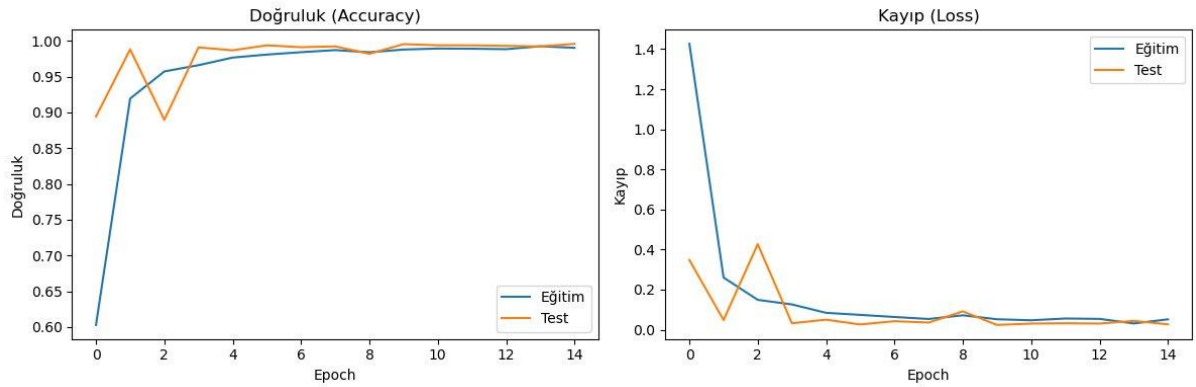
Geliştirilen CNN modeli, hiç görmediği 12.630 test görüntüsü üzerinde değerlendirilmiş ve elde edilen performans metrikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

3.1. Performans Metrikleri

Tablo 2. Model Performans Metrikleri

Metrik	Değer
Test Doğruluğu	%97,55
Test Kaybı	0,1877
Epoch Sayısı	15
Macro Avg F1	0,96
Toplam Yanlış Tahmin	310 / 12.630

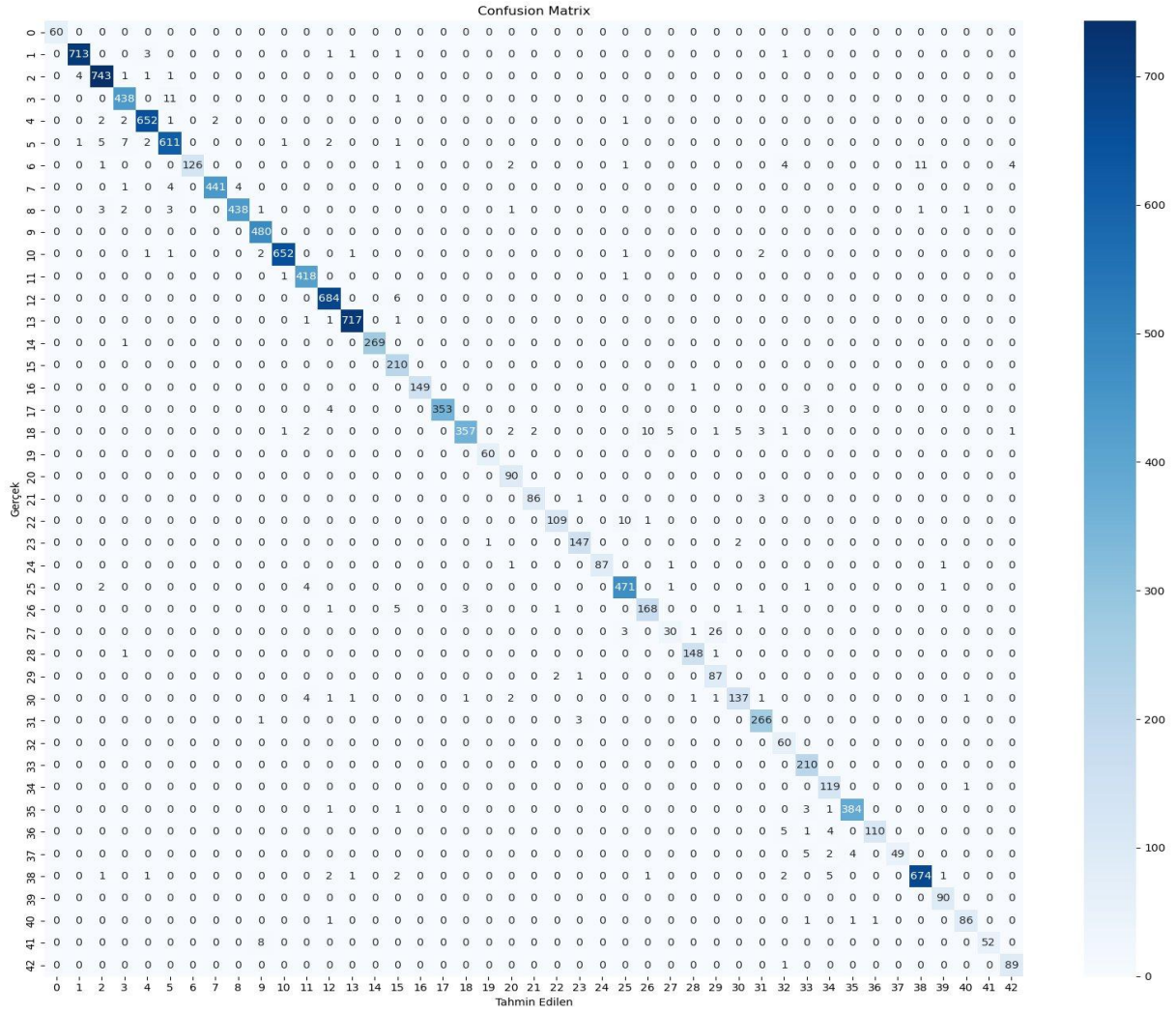
Doğruluk grafiği incelendiğinde hem eğitim hem de test doğruluğunun ilk epochlardan itibaren hızla yükseldiği görülmektedir. Test doğruluğu 1. epochta %90 seviyesine ulaşmış, 15 epoch sonunda %97,55 ile en yüksek değerine erişmiştir. İki eğri birbirine oldukça yakın seyretmekte olup bu durum modelin aşırı öğrenme yaşamadığına işaret etmektedir. Kayıp grafiğinde ise eğitim ve test kaybı paralel biçimde düşmüş; test kaybı 0,1877 ile düşük bir seviyede kalmıştır. Şekil 1'de eğitim sürecine ait doğruluk ve kayıp grafikleri görülmektedir.



Şekil 1. Doğruluk ve Kayıp Grafikleri

3.2. Confusion Matrix ve Sınıflandırma Analizi

Confusion matrix incelendiğinde köşegen üzerindeki değerlerin büyük çoğunlukla yüksek olduğu görülmektedir; bu durum modelin 43 sınıfın büyük çoğunluğunu doğru tahmin ettiğini göstermektedir. En dikkat çekici hata, sınıf 27 (yaya geçidi) ile ilgilidir; bu sınıfta recall değeri %50 olarak ölçülmüş ve diğer uyarı işaretleriyle karıştırılmıştır. Genel doğruluk %97,55, macro ortalama F1 skoru 0,96'dır. Şekil 2'de confusion matrix, Şekil 3'te doğru tahmin örnekleri ve Şekil 4'te yanlış tahmin örnekleri görülmektedir.



Şekil 2. Confusion Matrix

Doğru tahmin örnekleri incelendiğinde modelin kamyon giremez, 30 km/h hız sınırı, yön işaretleri ve tehlike uyarıları gibi farklı kategorilerdeki işaretleri başarıyla tanıdığı görülmektedir. Yanlış tahmin örneklerinde ise hataların büyük bölümü karanlık veya aşırı bulanık görüntülerden; ya da üçgen şekilli işaretler gibi görsel açıdan birbirine çok benzeyen sınıflardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Doğru Tahmin Örnekleri



Şekil 4. Yanlış Tahmin Örnekleri

4. Sonuç

Bu çalışmada GTSRB veri seti kullanılarak geliştirilen CNN tabanlı trafik işareti tanıma modeli, 43 farklı sınıf üzerinde %97,55 test doğruluğuna ulaşmıştır. Model 15 epoch içinde eğitimini tamamlamış, test kaybı 0,1877 olarak ölçülmüş ve 12.630 test görüntüsünden yalnızca 310 tanesi yanlış sınıflandırılmıştır. BatchNormalization, Dropout ve stratified train-validation split gibi tekniklerin uygulanması modelin genelleme yeteneğini güçlendirmiştir. Geliştirilen model Gradio kütüphanesi kullanılarak web arayüzüne dönüştürülmüş ve Hugging Face Spaces platformunda yayınlanmıştır. Uygulama adresi: https://huggingface.co/spaces/ilkhom-tabyldiev/German_Traffic_Sign_Recognition

Kaynaklar

- [1] J. Stallkamp, M. Schlipsing, J. Salmen, C. Igel, Man vs. Computer: Benchmarking Machine Learning Algorithms for Traffic Sign Recognition, Neural Networks. 32 (2012) 323–332.
- [2] Kaggle, GTSRB – German Traffic Sign Recognition Benchmark, <https://www.kaggle.com/datasets/meowmeowmeowmeowmeow/gtsrb-german-traffic-sign>
- [3] F. Chollet, Deep Learning with Python, Manning Publications, 2018.



Gıdaların Muhafazasında Organik Asitlerin Antimikrobiyal Etki Mekanizmaları ve Endüstriyel Uygulamaları

Ayşenur Akdaş ¹, Ramazan Şevik ^{2*}

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

* Sorumlu yazar: rsevik@aku.edu.tr

Özet

Gıda endüstrisinde gıda güvenliğinin sağlanması ve raf ömrünün uzatılması başlıca öncelikler arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda organik asitler, bakteriyosinler, baharatlar doğal ve etkili antimikrobiyal ajanlar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, gıda matrislerinde sıklıkla tercih edilen sitrik, laktik, asetik, propiyonik ve sorbik asit gibi organik asitlerin antimikrobiyal etki mekanizmaları ve gıda endüstrisindeki uygulama alanlarının güncel çalışmalar ışığında incelenmesi hedeflenmiştir. Organik asitler; gıda ürünlerinde özellikle et ürünleri, süt ürünleri, sebze-meyve işleme, ekmek, içecekler ve konserve gıdalar başta olmak üzere çeşitli gıda türlerinde antimikrobiyal koruyucu olarak uygulanmaktadır. Literatürdeki bulgular, organik asitlerin bazı patojen ve bozulma etmeni mikroorganizmaların gelişimini yavaşlattığını göstermektedir. Ayrıca organik asitler, gıda matrisindeki pH değerini düşürerek patojen mikroorganizmaların gelişimini sınırlamakta ve böylece mikrobiyal stabiliteyi artırmaktadır. Özellikle laktik asit; güçlü tamponlama kapasitesi, lezzet kazandırıcı özelliği, pH düzenleyici etkisi ve doğal koruyucu özelliği ile öne çıkmaktadır. Organik asitlerin, bazı muhafaza yöntemleriyle sinerjik etki göstererek antimikrobiyal etkinliklerini artırabildiği de belirlenmiştir. Sonuç olarak, organik asitler gıdaların kalite, güvenlik ve raf ömrünün korunması ile gıda muhafazasında güvenilir, ekonomik ve çok yönlü bir muhafaza çözümü sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: organik asitler, gıda muhafazası, antimikrobiyal etki, raf ömrü, laktik asit

Antimicrobial Mechanisms of Action and Industrial Applications of Organic Acids in Food Preservation

Abstract

The assurance of food safety and the extension of shelf life are key priorities in the food industry. In this regard, organic acids, bacteriocins, spices, and natural and effective antimicrobial agents are widely used. The objective of this study is to compile and review the antimicrobial mechanisms of organic acids such as citric, lactic, acetic, propionic, and sorbic acids, which are frequently preferred in food matrices within the framework of recent progress. Organic acids are commonly used as antimicrobial preservatives in various food types, especially meat products, dairy products, vegetable and fruit processing, bread, beverages, and canned foods. Previous studies have shown that organic acids inhibit the growth of various pathogenic and spoilage microorganisms. Additionally, organic acids decrease pH of food matrix and limit the growth of microorganisms and so increase the microbial stability. Lactic acid, in particular, stands out with its strong buffering capacity, flavor-enhancing properties, pH effect,

and natural preservative properties. Organic acids can also enhance their antimicrobial effectiveness of as a result of synergistic effects with certain preservation methods. In conclusion, organic acids offer a reliable, economical, and multipurpose preservation solution for food, ensuring the quality, safety, and shelf life of food products.

Keywords: organic acids, food preservation, antimicrobial effect, shelf life, lactic acid

1. Giriş

Gıdaların üretimden tüketime kadar geçen süreçte kalite ve güvenilirliğini koruması, gıda endüstrisinin temel hedeflerinden biridir. Bu temel hedefler gıdaların muhafazasında antimikrobiyal ajanlar kullanılarak gerçekleştirilir. Antimikrobiyal ajanlar, gıdayı mikroorganizmaların neden olduğu bozulmalara karşı koruyarak raf ömrünü uzatır ve gıda güvenliğini sağlar. Gıdalarda yaygın olarak kullanılan koruyucular arasında organik asitler (sitrik, laktik, asetik, benzoik vb.), bakteriyosinler ve çeşitli baharat esansiyel yağları yaygın olarak yer almaktadır [1,2].

Tablo 1. Gıdalarda kullanılan çeşitli koruyucular [3].

Bileşik	Mikrobiyal hedef	Uygulanan gıda
Benzoik asit ve benzoatlar	Mayalar, küfler	İçecekler, meyve ürünleri
Parabenler	Mayalar, küfler, bakteri	Sucuk, kek
Asetik asit ve asetatlar	Mayalar, bakteriler, küf	Et-süt ürünleri, soslar, turşu
Propiyonik asit ve propiyonatlar	Küfler	Ekmek-süt ürünleri
Sorbik asit ve sorbatlar	Mayalar, küfler, bakteri	Şarap
Laktik asit ve laktatlar	Bakteriler	Et, fermente ürünler
Nitrit ve nitrat tuzları	<i>Clostridium botulinum</i>	Kek, bisküvi
Sülfidler	Mayalar, küfler	Meyve, patates ürünleri
Nisin	<i>Clostridium botulinum</i>	Peynir
Natamisin	Küfler	Peynir
Lisozim	<i>Clostridium botulinum</i>	Peynir, pişmiş et ürünleri
Laktoferrin	Bakteriler	Et ürünleri
Sitrik asit	Genel	İçecekler

2. Organik asitler

Organik asitler, gıdalarda doğal olarak bulunan veya sonradan eklenen, mikroorganizmaların gelişimini engelleyebilen bileşiklerdir. Gıda endüstrisinde en yaygın kullanılan organik asitler; benzoik asit, sitrik asit, sorbik asit, laktik asit, propiyonik asitlerdir. Bu asitler sadece koruyucu değil, aynı zamanda aroma geliştirici ve doku düzenleyici olarak da işlev görürler.

Gıda endüstrisinde güvenli, yüksek kaliteli ve çevreye duyarlı yaklaşımlara yönelik artan tüketici talebi, bu bileşiklerin kullanımını daha da önemli hale getirmiştir [4].

Organik asitlerin gıdalarda kullanım amaçları:

Patojenlerin (*Listeria*, *Salmonella* vb.) gelişimini engellemek

Küf ve maya gibi farklı bozulma mikroplarının büyümesini engellemek

Gıdaların raf ömrünü uzatmak

Renk stabilizasyonu düzenlemek

Asitliği düzenlemek

Gıdanın yapısını, lezzetini, görünüşünü korumak [5].

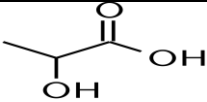
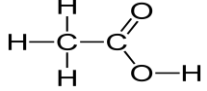
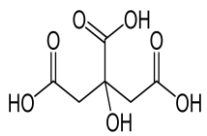
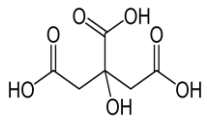
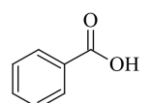
Organik asitler, bağışıklık sistemini destekleyerek vücudun enerji ve metabolizma düzenine de katkı sağlayabilirler. Organik asitlerin bazı fizyolojik özellikleri:

Vücuda enerji sağlar.

Metabolizmayı düzenler. Örneğin asetik asit ve propiyonik asit, tokluğu artırmış ve mide boşalma süresini geciktirerek yemek sonrası glukoz yanıtını ve insülin yanıtını azaltmıştır.

Bakteriyel inhibisyon sağlar. Örneğin sitrik asidin bakterileri inhibe ettiği ve şelasyon yoluyla patojenlerin inhibisyonunu artırdığı görülmüştür [6].

Tablo 2. Gıdalarda yaygın kullanılan organik asitler

Asit	pKa	Moleküler form	Yapısal form	Kullanım alanı (örnek)	E Kodu
Laktik asit	3,86	C ₃ H ₆ O ₃		Et, sebze, peynir	E 270
Asetik asit	4,76	C ₂ H ₄ O ₂		Salamura, turşu	E 260
Sitrik asit	3,13	C ₆ H ₈ O ₇		İçecek, meyve	E 330
Propionik asit	4,87	C ₃ H ₆ O ₂		Fırın ürünleri (küf önleyici)	E 280
Benzoik asit	4,20	C ₇ H ₆ O ₂		Alkolsüz içecekler, reçel	E 210

3. Organik asitlerin antimikrobiyal etki mekanizması

Organik asitlerin antimikrobiyal etkisi; hücre içi ve hücre dışı pH'sını düşürme, hücre zarını bozma, enzim aktivitesini inhibe etme ve gerekli besin elementlerine bağlanma yoluyla gerçekleşmektedir. Organik asitler hücre içerisine girerek metabolik yolları baskılamakta ve substrat taşınımını bozmaktadır [5]. Özellikle asetik asidin hücre duvarını aşarak plazmayı denatüre ettiği belirtilmiştir [1]. Laktik asit ve laktatlar sitoplazmik zarı etkilerken, bazı organik asitlerin metal iyonlarıyla şelat oluşturarak antimikrobiyal aktiviteyi artırdığı bildirilmiştir [7].

4. Mevzuat

Türkiye’de organik asitlerin kullanımı Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği kapsamında düzenlenmektedir [8]. Kullanılan katkı maddelerinin güvenli olması, teknolojik fayda sağlaması ve tüketiciyi yanıltmaması temel ilkeler arasında yer almaktadır. Etiketleme aşamasında organik asitlerin kullanım amacı ve spesifik adı ya da E kodu belirtilmelidir. Örneğin “Koruyucu (E202)” veya “Asitlik Düzenleyici (Sitrik Asit)” şeklinde ifade edilmektedir. Özellikle süt endüstrisi ve et ürünlerinde kullanımı izin verilen asitlerin saflık kriterleri ve uygulama yöntemleri mevzuatla sınırlandırılmıştır [7].

5. Endüstriyel uygulamalar

Tablo 3. Farklı gıda matrislerinde organik asit uygulamaları

Gıda kategorisi	Uygulama şekli	Kullanılan asitler
Et ve kanatlı	Yüzey spreyleme, marinasyon, tuzlu çözelti	Laktik, asetik, sitrik
Süt ürünleri	Peynir yıkama, peynir altı suyu, daldırma	Propionik, laktik
Fırın ürünleri	Hamur içine katkı, ambalaja uygulama	Propionik, sorbik
Meyve-sebze	Yıkama suyu, kaplama filmleri	Sitrik, askorbik, malik
Su ürünleri	Buzlama solüsyonu, enjeksiyon	Laktik, sitrik, asetik

Organik asitler farklı gıda gruplarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Et ürünlerinde marinasyon ve yüzey spreyleme ile laktik, asetik ve sitrik asit uygulanmaktadır. Organik asit tuzları ve nisinin birlikte kullanımının yüksek sıcaklıkta işlenmiş et ürünlerinde raf ömrünü uzattığını ve duyu kaliteyi koruduğunu bildirmiştir [9]. Literatürde askorbik asitin kürlenmiş et ürününü iyileştirme çalışması ile gıdada oksidasyonun engellendiği tespit edilmiştir [10].

Balık ürünlerinde kitosan ve asetik asit kombinasyonunun Asya levreği filetolarında duyu kaliteyi koruyarak raf ömrünü uzattığı belirlenmiştir [11]. Fırın ürünlerinde propiyonik ve sorbik asidin küf gelişimini engellediği ve raf ömrünü önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir [12]. Meyve ve sebzelerde malik asit ile greyfurt çekirdeği özütünün birlikte kullanımının patojenleri azaltarak koruyucu etki sağladığı gösterilmiştir [13].

6. Sinerjik Antimikrobiyal Uygulamalar

Organik asitler çoğu zaman tek başına değil, diğer koruyucular ve teknolojilerle birlikte kullanılmaktadır. Sitrik asit antioksidanlarla birlikte kullanıldığında metal iyonları ile şelat oluşturarak oksidasyonu azaltmaktadır [4]. Vakum paketlenme ile laktik asidin birlikte uygulanmasının et ürünlerinde *Listeria monocytogenes* gelişimini azalttığı bildirilmiştir (Wederquist et al. 1994). Fenillaktik asidin dondurma işlemi ile birlikte kullanımında *E. coli* ve *Salmonella* üzerinde daha güçlü bakterisit etki oluşturduğu gösterilmiştir [14]. Biyoaktif bileşik ile organik asitlerin beraber kullanımı (%2 kitosan + 5 mM oksalik asit (OA) veya 50 mM malik asit (MA) yenilebilir kaplaması) nar meyvesinin soğuk depolama sırasındaki kalitesini korumak ve soğuk zararını azaltmak için etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir [15].

7. Avantaj-dezavantaj

Organik asitlerin kullanımı birçok açıdan avantaj sağlarken bazı durumlarda dezavantaj da oluşturur.

Avantajlar; organik asitler doğal kaynaklardan elde edilebilir olduklarından çevresel kirliliği azaltır. Raf ömrü ve duyu kaliteyi olumlu etkiler. [4]

Dezavantajlar; bazı organik asitlerin yüksek konsantrasyonlarda duyu kaliteyi olumsuz etkileyebildiği belirtilmiştir.

8. Sonuç

Sonuç olarak organik asitler; güçlü antimikrobiyal etkileri, patojenleri inhibe etme kapasiteleri ve raf ömrünü uzatma özellikleri nedeniyle gıda muhafazasında sürdürülebilir ve güvenli bir çözüm sunmak için önemli koruyucular arasında yer almaktadır. Organik asitlerin özellikle vakum paketlenme ve dondurma gibi teknolojilerle birlikte kullanıldığında etkinliklerinin arttığı ve sürdürülebilir gıda muhafazasında stratejik öneme sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca sinerjik uygulamalar sayesinde duyu kalite korunmakta ve gıda israfının azaltılmasına katkı sağlanmaktadır. Bu çalışma ile beraber organik asitlerin sadece koruyucu değil, aynı zamanda gelişmiş gıda işleme teknolojilerinin ayrılmaz bir parçası olduğu görülmüştür. Gelecek çalışmalarda, organik asitlerin farklı gıda patojenleri üzerindeki spesifik inhibisyon mekanizmalarının moleküler düzeyde daha kapsamlı biçimde incelenmesi ve gelişen gıda teknolojileriyle (soğuk plazma, yüksek basınç vb.) olan etkileşimlerinin araştırılmasına gerek duyulmaktadır.

Kaynaklar

- [1] F. Coşkun, Gıdalarda bulunan doğal koruyucular. Gıda teknolojileri elektronik dergisi, 2, (2006) 27-33.
- [2] G. Akarca, V. Gök, O. Tomar, Gıda muhafazasında kullanılan bazı doğal antimikrobiyaller. Kocatepe Veterinary Journal, 7(1), (2014) 59-68.
- [3] Susuz Alanyalı vd., Gıda muhafaza (ss.44-64). (2009) Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- [4] K. B. Sorathiya, A. Melo, M. C. Hogg, M. Pintado, Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. Sustainability, 17(8), (2025) 3434.
- [5] J. H. Yoon, M. S. Oh, S. Y. Lee, Effectiveness of organic acids for inactivating pathogenic bacteria inoculated in laboratory media and foods: an updated minireview: J.-H. Yoon et al. Food Science and Biotechnology, 33(12), (2024) 2715-2728.
- [6] Y. Shi, D. Pu, X. Zhou, Y. Zhang, Recent progress in the study of taste characteristics and the nutrition and health properties of organic acids in foods. Foods, 11(21), (2022) 3408.
- [7] S. Alan, G. Öksüztepe, Gıda katkı maddeleri ve süt endüstrisinde kullanılan antimikrobiyaller. Bozok Veterinary Sciences, 1(1-2), (2020) 44-50.

- [8] Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023, 13 Ekim) Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği. Resmî Gazete (Sayı: 32338).
- [9] A. M. Elbanna, R. F. Sabala, S. M. Abd-Elghany, K. Imre, A. Morar, V. Herman, K. I. Sallam, Nisin and organic acid salts improved the microbial quality, extended the shelf life, and maintained the sensory attributes of semidry beef luncheon marketed at adverse (35–40° C) ambient summer temperatures. *Foods*, 12(23), (2023) 4283.
- [10] T. K. Kim, K. E. Hwang, M. A. Lee, H. D. Paik, Y. B. Kim, Y. S. Choi, Quality characteristics of pork loin cured with green nitrite source and some organic acids. *Meat science*, 152, (2019) 141-145.
- [11] N. S. Ahmed, K. C. Dora, S. Chowdhury, S. Sarkar, R. Mishra, Effect of chitosan and acetic acid on the shelf life of sea bass fillets stored at refrigerated temperature. *J. Appl. Nat. Sci*, 9(4), (2017) 2175-2181.
- [12] E. Debonne, G. Giannotti, C. Verbeke, M. Eeckhout, F. Devlieghere, Growth/no-growth models of propionic and sorbic acid for bread and cake moulds. *Food Control*, 152, (2023) 109872.
- [13] J. H. Kim, K. H. Kwon, S. W. Oh, Effects of malic acid or/and grapefruit seed extract for the inactivation of common food pathogens on fresh-cut lettuce. *Food science and biotechnology*, 25(6), (2016) 1801-1804.
- [14] R. Zheng, T. Zhao, Y. C. Hung, Adhikari, K, Evaluation of bactericidal effects of phenyllactic acid on *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella* Typhimurium on beef meat. *Journal of food protection*, (2019) 82(12), 2016-2022.
- [15] S. Ehteshami, F. Abdollahi, A. Ramezani, A. Mirzaalian Dastjerdi, Maintenance of quality and bioactive compounds in pomegranate fruit (*Punica granatum* L.) by combined application of organic acids and chitosan edible coating. *Journal of food biochemistry*, (2020) 44(9), e13393.)
- [16] H. J. Wederquist, J. N. Sofos, G. R. Schmidt, *Listeria monocytogenes* inhibition in refrigerated vacuum packaged turkey bologna by chemical additives. *Journal of Food Science*, 59(3), (1994) 498-500.



ESP-NOW Tabanlı Bir Dağıtık Akıllı Ev Sistemi Uygulaması

Şerif Kızgındemir^{1*}, Said Mahmut Çınar²

^{1*} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, kizgindemirserif@gmail.com

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, smcinar@gmail.com

Özet

Günümüzde artan enerji ihtiyacı, güvenlik gereksinimleri ve konfor beklentileri, ev otomasyon sistemlerinin önemini önemli ölçüde artırmıştır. Akıllı ev sistemleri, çevresel verileri sürekli izleyerek yaşam alanlarını daha güvenli ve enerji verimli hale getiren yapılardır. Bu sistemlerin gelişiminde Nesnelerin İnterneti (IoT-Internet of Things) ve kablosuz haberleşme teknolojileri kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle Wi-Fi tabanlı çözümler, mobil uygulamalar aracılığıyla cihazların uzaktan izlenmesine ve kontrolüne imkân tanırken; düşük gecikmeli yerel haberleşme protokolleri sistemlerin hızlı ve doğrudan tepki verebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, düşük maliyetli, esnek ve modüler bir yapıya sahip, ESP-NOW protokolü tabanlı dağıtık bir akıllı ev kontrol sistemi tasarlamak ve prototipini geliştirmektir. Önerilen yapıda, sistem tek bir merkezi denetleyiciye bağımlı olmaktan çıkarılarak iş yükü yerel kontrol düğümleri ve merkezi izleme birimi arasında paylaştırılmıştır. Sensör verilerinin okunması ve cihazların kontrolü doğrudan yerel düğümler tarafından gerçekleştirilmiştir. Düğümler arası haberleşme internetten bağımsız çalışan ESP-NOW protokolü ile sağlanırken, kullanıcı erişimi Wi-Fi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen prototip ve simülasyon çalışmaları sonucunda, sistemin veri kaybı olmadan kararlı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Dağıtık yapı sayesinde sistemin tepki süresi azaltılmış ve internet bağlantısı kesilse dahi temel fonksiyonlarını sürdürebildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen sistemin enerji verimli, güvenilir ve genişletilebilir bir akıllı ev çözümü sunduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Akıllı ev sistemleri, Nesnelerin İnterneti (IoT), ESP-NOW, dağıtık sistemler

ESP-NOW Based Distributed Smart Home System Application

Abstract

In recent years, increasing energy demand, security requirements, and comfort expectations have significantly enhanced the importance of home automation systems. Smart home systems continuously monitor environmental data to create safer and more energy-efficient living spaces. The development of these systems has been strongly influenced by the Internet of Things (IoT) and wireless communication technologies. While Wi-Fi-based solutions enable remote monitoring and control of devices via mobile applications, low-latency local communication protocols provide faster and more direct system responses. The aim of this study is to design and develop a low-cost, flexible, and modular distributed smart home control system based on the ESP-NOW protocol. In the proposed system, instead of relying on a single central controller, the workload is distributed between local control nodes and a central monitoring unit. Sensor data acquisition and device control are performed directly by local nodes. Communication between nodes is achieved using the ESP-NOW protocol, which operates

independently of internet connectivity, while user access is provided via Wi-Fi. As a result of the developed prototype and simulation studies, the system demonstrated stable operation without data loss. The distributed architecture reduced response time and ensured that the system continued to operate even in the absence of an internet connection. Consequently, the proposed system offers an energy-efficient, reliable, and scalable solution for smart home applications.

Keywords: Smart home systems, Internet of Things (IoT), ESP-NOW, distributed systems.

1. Giriş

Günümüzde teknolojik gelişmeler, fiziksel nesnelerin dijital sistemlerle bütünleşmesini mümkün hale getirmiş ve Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramının yaygınlaşmasını sağlamıştır. IoT, sensörler, mikrodenetleyiciler ve kablosuz haberleşme teknolojileri aracılığıyla cihazların veri alışverişi yapabilmesini ve çevresel koşullara göre otomatik olarak tepki verebilmesini sağlayan bir yapıdır [1], [2]. Bu özellikleri sayesinde IoT sistemleri, birçok alanda olduğu gibi akıllı ev uygulamalarında da önemli bir yer edinmiştir [3].

Akıllı ev sistemleri; aydınlatma, iklimlendirme, güvenlik ve enerji yönetimi gibi işlevleri sensör verilerine bağlı olarak otomatik şekilde gerçekleştiren yapılardır. Bu sistemler, kullanıcı konforunu artırmanın yanı sıra enerji verimliliği ve güvenlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır [4], [5], [6]. Kablosuz haberleşme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, akıllı ev sistemleri daha esnek, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir hale gelmiştir. Özellikle Wi-Fi tabanlı çözümler, cihazların uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır [7], [8].

Bununla birlikte, literatürde yer alan birçok akıllı ev sistemi merkezi kontrol yapısına dayanmaktadır. Bu durum, sistemin tek bir noktaya bağımlı olmasına ve olası arızalarda tüm sistemin etkilenmesine neden olabilmektedir. Ayrıca bazı uygulamalarda kullanılan haberleşme altyapılarının gecikme ve bağlantı bağımlılığı gibi sınırlamalar oluşturabileceği literatürde belirtilmektedir [9], [1].

Bu çalışmada, söz konusu sınırlamaları azaltmak amacıyla ESP-NOW protokolü tabanlı dağıtık bir akıllı ev otomasyon sistemi geliştirilmiştir. Önerilen sistemde, yerel kontrol düğümleri sensör verilerini doğrudan işleyerek ilgili aktüatörleri kontrol etmekte, merkezi kontrol birimi ise sistemin izlenmesi ve kullanıcı ile etkileşimi sağlamaktadır. Bu yaklaşım sayesinde sistemin tepki süresi azaltılmış, güvenilirliği artırılmış ve internet bağlantısına bağımlılığı önemli ölçüde azaltılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada geliştirilen akıllı ev otomasyon sistemi, dağıtık kontrol mimarisi temel alınarak tasarlanmıştır. Sistem, bir merkezi kontrol birimi ve farklı görevleri yerine getiren birden fazla yerel kontrol düğümünden oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde sistem bileşenleri arasında iş yükü paylaştırılmış ve kontrol işlemleri hızlandırılmıştır.

2.1. Materyal

Bu çalışmada geliştirilen akıllı ev otomasyon sisteminde kullanılan donanım bileşenleri aşağıda açıklanmıştır:

ESP32-S3 DevKitC-1: Sistemin merkezi kontrol birimi olarak kullanılmıştır. Sensör verilerinin toplanması, işlenmesi ve kullanıcı arayüzü ile haberleşme süreçlerinin yönetilmesinden sorumludur.

ESP32-C3 Super Mini: Yerel kontrol düğümlerinde kullanılan bu mikrodenetleyici, bağlı olduğu sensörlerden veri toplamakta ve ilgili aktüatörlerin kontrolünü gerçekleştirmektedir. Ayrıca ESP-NOW protokolü üzerinden diğer düğümlerle veri iletişimini sağlamaktadır.

12V 2A Adaptör: Sistemin ana enerji kaynağı olarak kullanılmış olup, tüm donanım bileşenlerinin beslenmesini sağlamaktadır.

LM2596 Güç Kaynağı Modülü: Giriş gerilimini düşürerek mikrodenetleyici ve düşük gerilimle çalışan bileşenler için gerekli stabil besleme gerilimini sağlamaktadır.

DHT22 Sıcaklık ve Nem Sensörü: Ortam sıcaklığı ve bağıl nem değerlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılan dijital çıkışlı sensördür.

MQ-2 Gaz Sensörü: Yanıcı gaz ve duman tespiti amacıyla kullanılan sensör olup, güvenlik odaklı kontrol senaryolarında kullanılmaktadır.

Toprak Nem Sensörü: Toprağın nem seviyesinin ölçülmesi amacıyla kullanılmış olup, sulama sisteminin kontrolünde temel veri kaynağını oluşturmaktadır.

5V Röle Modülü: Mikrodenetleyici tarafından üretilen kontrol sinyalleri doğrultusunda yüksek gerilim veya akım gerektiren yüklerin anahtarlanmasını sağlayan elektromekanik kontrol elemanıdır.

12V DC Fan: Ortam sıcaklığına bağlı olarak devreye alınan soğutma elemanı olarak kullanılmıştır.

12V Su Pompası: Toprak nem seviyesine bağlı olarak otomatik sulama işlemini gerçekleştiren aktüatör elemanıdır.

Buzzer: Kritik durumlarda kullanıcıya sesli geri bildirim sağlamak amacıyla kullanılan uyarı elemanıdır.

BC547 Transistör: Röle modülü ve diğer yüksek akım gerektiren yüklerin mikrodenetleyici çıkışları ile güvenli şekilde sürülebilmesi amacıyla anahtarlama elemanı olarak kullanılmıştır. Bu sayede mikrodenetleyici pinlerinin doğrudan yük altında kalması engellenmiştir.

1N4007 Diyot: Röle bobinleri üzerinde anahtarlama sırasında oluşan ters gerilimlerin (indüktif geri tepme) mikrodenetleyici ve diğer devre elemanlarına zarar vermesini önlemek amacıyla koruma elemanı olarak kullanılmıştır.

Buton: Fan ve su pompası gibi yüklerin manuel olarak kontrol edilebilmesi amacıyla sisteme entegre edilmiştir.

Anahtar: Aydınlatma sisteminin kullanıcı tarafından doğrudan açılıp kapatılabilmesi için kullanılan kontrol elemanıdır.

2.2. Metot

Geliştirilen akıllı ev otomasyon sistemi, dağıtık kontrol yaklaşımı temel alınarak tasarlanmıştır. Sistem, merkezi kontrol birimi ve yerel kontrol düğümlerinden oluşmakta olup, her düğüm kendi bağlı olduğu sensör ve aktüatörleri bağımsız olarak kontrol edebilmektedir. Bu yapı sayesinde sistemin tepki süresi azaltılmış ve tek bir noktaya bağımlılık ortadan kaldırılmıştır.

Şekil 1’de, sistemin merkezi kontrol birimi olarak kullanılan ESP32-S3 tabanlı donanım yapısının gerçek görüntüsü verilmiştir. Bu birim, sistem genelinde veri yönetimi, kullanıcı arayüzü ile haberleşme ve düğümler arası koordinasyonun sağlanmasından sorumludur.



Şekil 1. ESP32-S3 tabanlı merkezi kontrol biriminin gerçek görüntüsü

Sistemin genel haberleşme ve kontrol yapısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Yerel kontrol düğümleri ile merkezi kontrol birimi arasındaki veri iletişimi ESP-NOW protokolü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede düşük gecikmeli, doğrudan ve internet bağlantısına ihtiyaç duymayan bir haberleşme altyapısı elde edilmiştir. Merkezi kontrol birimi ise Wi-Fi bağlantısı üzerinden mobil uygulama ile haberleşerek kullanıcıya uzaktan izleme ve kontrol imkânı sunmaktadır.

Sistem çalışma süreci aşağıdaki adımlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir:

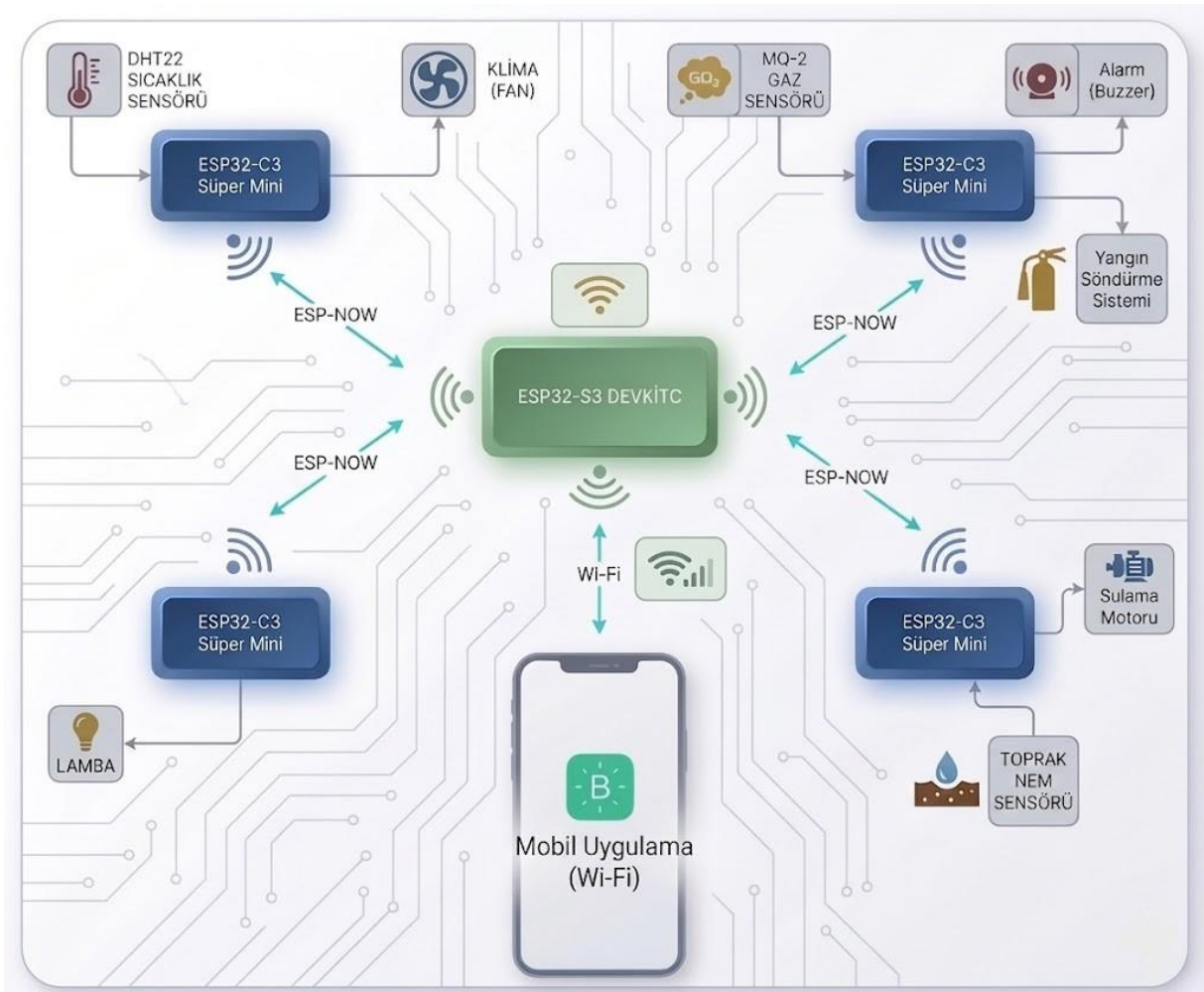
Veri Toplama: DHT22, MQ-2 ve toprak nem sensörlerinden elde edilen veriler belirli zaman aralıklarında mikrodenetleyici tarafından okunmuştur.

Veri İşleme: Okunan sensör verileri, sistem içerisinde tanımlanan eşik değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu aşamada sıcaklık, nem, gaz ve toprak nemi değerlerine bağlı karar mekanizması oluşturulmuştur.

Kontrol Mekanizması: Sensör değerlerinin belirlenen sınırların dışına çıkması durumunda röle modülleri devreye alınarak fan, su pompası, alarm ve aydınlatma sistemleri kontrol edilmiştir. Ayrıca kullanıcı tarafından buton ve anahtarlar aracılığıyla manuel kontrol imkânı sağlanmıştır.

Haberleşme: Mikrodenetleyici düğümleri arasında ESP-NOW protokolü ile veri iletimi sağlanmış, merkezi kontrol birimi ile kullanıcı arayüzü arasındaki iletişim ise Wi-Fi bağlantısı üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Uzaktan İzleme ve Kontrol: Sistem, mobil uygulama aracılığıyla kullanıcıya anlık veri izleme ve kontrol imkânı sunacak şekilde yapılandırılmıştır.

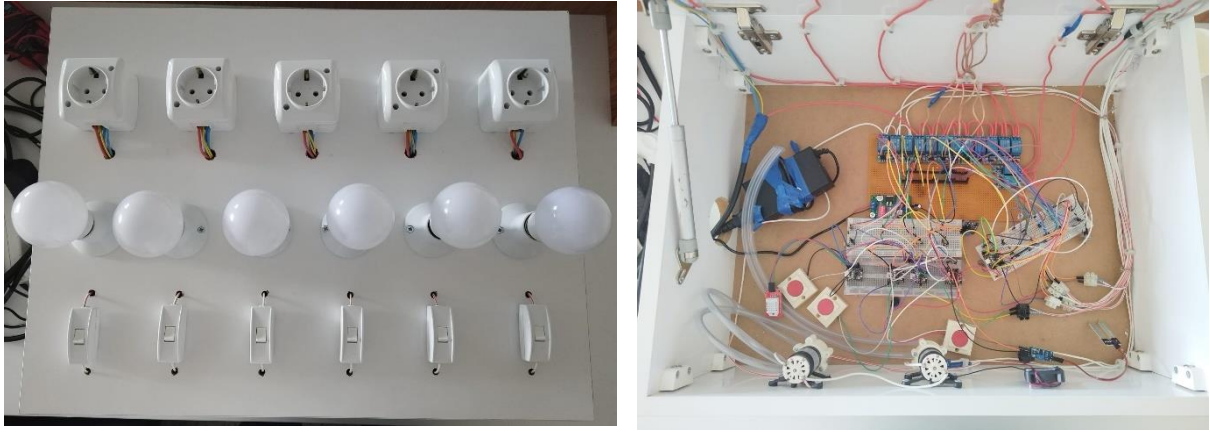


Şekil 2. ESP-NOW tabanlı dağıtık akıllı ev otomasyon sisteminin genel blok diyagramı

Ayrıca sistem performansını değerlendirmek amacıyla farklı test senaryoları uygulanmıştır. Bu kapsamda haberleşme mesafesi, sistem tepki süresi ve komut doğruluğu parametreleri analiz edilmiştir. Testler hem açık alan hem de engelli ortam koşullarında gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı olarak sunulmuştur.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Geliştirilen akıllı ev otomasyon sisteminin performansı, farklı ortam koşullarında gerçekleştirilen deneysel testler ile kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda sistemin haberleşme performansı, tepki süresi ve komut doğruluğu parametreleri analiz edilmiştir. Geliştirilen sistemin gerçek prototip uygulamasına ait görüntü Şekil 3'te verilmiş olup, bu prototip üzerinde yapılan testler sonucunda sistemin kararlı ve doğru şekilde çalıştığı doğrulanmıştır.



Şekil 3. Geliştirilen akıllı ev otomasyon sisteminin prototip uygulama görüntüsü

3.1. Haberleşme Performansı

Sistemin haberleşme performansını incelemek amacıyla açık alan ortamında farklı mesafelerde testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Açık Alan Haberleşme Performansı		
Mesafe (m)	Paket Başarı Oranı (%)	Tepki Süresi (s)
5	100	0.5
10	99	0.5
15	97	0.6
20	95	0.7

Tablo 1 incelendiğinde, mesafe arttıkça paket başarı oranında kademeli bir azalma ve tepki süresinde artış olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni, artan mesafeye bağlı olarak sinyal zayıflamasının meydana gelmesidir. Bununla birlikte kısa ve orta mesafelerde sistemin yüksek doğruluk oranı ile kararlı bir şekilde çalıştığı belirlenmiştir.

3.2. Engelli Ortam Performansı

Sistemin kapalı ve fiziksel engellerin bulunduğu ortamlardaki performansını değerlendirmek amacıyla farklı senaryolar altında testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Engelli Ortam Haberleşme Performansı			
Ortam Durumu	Mesafe (m)	Paket Başarı Oranı (%)	Tepki Süresi (s)

1 duvar	2.5	98	0.5
1 duvar	6	97	0.5
2 duvar	8	95	0.6
2 duvar	15	93	0.7
3 duvar	10	92	0.6
3 duvar	20	93	0.7

Tablo 2 değerlendirildiğinde, fiziksel engellerin sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Duvar sayısının artması ile birlikte paket başarı oranında düşüş meydana gelmiş ve tepki süresinde artış gözlemlenmiştir. Özellikle üç duvarlı senaryoda sinyal zayıflamasının daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir.

3.3. Komut Başarı Analizi

Sistemin kontrol performansını değerlendirmek amacıyla toplam 100 açma ve 100 kapatma olmak üzere 200 adet kontrol komutu gönderilmiştir. Her bir komut, sistem tarafından bağımsız bir kontrol sinyali olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Komut Başarı Analizi

Toplam Komut	Başarılı	Başarısız	Başarı Oranı (%)
200	193	7	96.5

Gerçekleştirilen testler sonucunda sistemin %96.5 oranında başarılı çalıştığı belirlenmiştir. Bu sonuç, geliştirilen sistemin yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu ve güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Hata durumları incelendiğinde, bu hataların büyük bir kısmının sistemin temel çalışma prensibinden ziyade geri bildirim (feedback) mekanizması ve haberleşme senkronizasyonu ile ilgili olduğu görülmüştür. Bazı durumlarda komut ilgili düğüm tarafından doğru şekilde uygulanmasına rağmen, merkezi kontrol birimine iletilen geri bildirim bilgisinin gecikmeli veya hatalı olduğu gözlemlenmiştir.

3.4. Genel Değerlendirme

Elde edilen tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen akıllı ev otomasyon sisteminin genel olarak kararlı, hızlı ve yüksek doğruluk oranı ile çalıştığı görülmektedir. Dağıtık kontrol mimarisi sayesinde sistemin tepki süresi azaltılmış ve yerel kontrol düğümleri üzerinden hızlı karar mekanizması sağlanmıştır.

Bununla birlikte, sistem performansının mesafe ve ortam koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle fiziksel engellerin artması, haberleşme kalitesini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca geri bildirim mekanizmasında gözlemlenen gecikmelerin azaltılması ve sistem senkronizasyonunun iyileştirilmesi, sistem performansının daha üst seviyelere çıkarılmasına katkı sağlayacaktır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, ESP-NOW tabanlı dağıtık mimariye sahip bir akıllı ev otomasyon sistemi tasarlanmış ve başarıyla uygulanmıştır. Geliştirilen sistemde, merkezi kontrol birimi ve yerel kontrol düğümleri arasında kablosuz haberleşme sağlanarak sensör verilerinin işlenmesi ve aktüatörlerin kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, sistemin açık alan ve engelli ortamlarda genel olarak kararlı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Açık alan testlerinde yüksek başarı oranı elde edilirken, fiziksel engellerin artması ile birlikte haberleşme performansında belirli düzeyde düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte sistemin çoğu senaryoda çalışmaya devam ettiği ve işlevselliğini koruduğu belirlenmiştir.

Komut doğruluğu analizinde ise gönderilen 200 kontrol komutunun 193'ünün başarılı şekilde gerçekleştirildiği ve sistemin %96,5 oranında doğruluk ile çalıştığı görülmüştür. Meydana gelen hataların büyük ölçüde geri bildirim mekanizması ve haberleşme senkronizasyonu ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, dağıtık mimarinin sistemin tepki süresini azaltmada ve esnek bir yapı sağlamada etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca ESP-NOW protokolünün düşük gecikmeli ve internet bağımsız haberleşme gerektiren uygulamalar için uygun bir çözüm sunduğu değerlendirilmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, sistemin geri bildirim mekanizmasının iyileştirilmesi, veri senkronizasyonunun optimize edilmesi ve farklı IoT platformları ile entegrasyonunun sağlanması ile sistem performansının daha da artırılabilmesi öngörülmektedir.

Kaynaklar

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems*. 29(7) (2013) 1645–1660.
- [2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, M. Ayyash, Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 17(4) (2015) 2347–2376.
- [3] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, M. Zorzi, Internet of Things for smart cities, *IEEE Internet of Things Journal*. 1(1) (2014) 22–32.
- [4] F. Gül, Akıllı Ev Sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2010.
- [5] S. K. Palanduz, Akıllı Ev Sistemleri ve Ürünleri, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, 2023.
- [6] D. Pal, S. Funilkul, V. Vanijja, B. Papasratorn, Analyzing the effect of smart homes on energy efficiency, *Energy Procedia*. 141 (2018) 79–83.
- [7] A. Kanyılmaz, IoT Sistemlerinde Kablosuz Haberleşme Altyapısı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2020.
- [8] İ. Avcı, Akıllı Evlerde IoT Teknolojileri ve Siber Güvenlik, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (34) (2022) 226–233.
- [9] M. A. Ebleme, Nesnelerin İnterneti Uygulama Katmanı Haberleşme Protokollerinin Başarım Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2019.



Yüksek Sıcaklık Koşullarında Sinterlenen Silis Dumanı Katkılı Tuğlaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Mohamad Eid Almohamad^{1*}, Erhan Kahraman

^{1*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, momo910163@gmail.com

^{2*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, ekahraman@aku.edu.tr

Özet

Silis dumanı, silisyum metali veya silisyum alaşımlarının elde edilmesi için yaklaşık 2000 °C'de elektrik ark fırınlarında ergitilmesi yöntemi esnasında elde edilirler. Ana bileşeni 1µm'den küçük olan camsı ve amorf yapıya sahip olup endüstriyel atık malzemelerdir. Yüksek sıcaklık ürünü olması dolayısıyla refrakter özelliğe sahiptir. Atık bir malzeme olan silis dumanının tuğla malzemelerde ikame edilerek geri dönüşüm yoluyla bertaraf edilmesi noktasında çalışmanın çevresel ve ekonomik faydalar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık koşulları altında silis dumanı katkısının tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Afyonkarahisar yöresi kiline, ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranında silis dumanı ikame edilerek tuğla numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C derecede sinterlenmiştir. Sinterlenen deney numuneleri üzerinde fiziksel ve mekanik testler uygulanmıştır. Testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek atık katkısının tuğla özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kil, tuğla, silis dumanı, sinterleme.

Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Silica Fume Added Bricks Sintered Under High-Temperature Conditions

Abstract

Silica fume is obtained during the smelting process of silicon metal or silicon alloys in electric arc furnaces at approximately 2000°C. It is an industrial waste material with a glassy and amorphous structure, with its main component being smaller than 1 µm. Due to being a high-temperature product, it possesses refractory properties. It is anticipated that the disposal of silica fume, which is a waste material, by substituting it into brick materials through recycling will provide both environmental and economic benefits. In this study, the effect of silica fume additives on the physical and mechanical properties of bricks under high-temperature conditions was investigated. Brick samples were produced by substituting silica fume into clay from the Afyonkarahisar region at ratios of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight. The produced samples were sintered at 900°C, 1000°C, and 1100°C. Physical and mechanical

tests were performed on the sintered experimental samples. The results obtained from these tests were evaluated to examine the impact of the waste additive on the properties of the bricks.

Keywords: Clay, brick, silica fume, sintering.

1. Giriş

İnşaat sektörü, küresel enerji tüketiminin ve ham madde kullanımının en yoğun olduğu alanlardan biridir. Geleneksel yapı malzemesi olan kil tuğlaların üretimi hem doğal kaynakların hızla tükenmesine hem de üretim sürecindeki yüksek enerji gereksinimi nedeniyle ciddi çevresel etkilere yol açmaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda endüstriyel atıkların yapı malzemelerinde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi hem çevresel kirliliğin önlenmesi hem de malzeme performansının iyileştirilmesi açısından kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir [1].

Tuğla, tarihsel süreç içinde inşaat sektörünün vazgeçilmez yapı malzemelerinden biri olma özelliğini korumaktadır. Konut ve duvar uygulamalarında yaygın biçimde kullanılan kil tuğlalar, hammaddesinin bolluğu ve üretim kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, artan yapı malzemesi talebi ve çevre bilincinin yükselmesi, araştırmacıları tuğla bünyesine farklı endüstriyel atık malzemelerin eklenmesi üzerine çalışmaya yöneltmiştir [2,3,4].

Silis dumanı, ferrosilis alaşımlarının üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan, çok yüksek amorf silis (SiO_2) içeriğine ve yüksek özgül yüzey alanına sahip puzolanik bir malzemedir. Çimento ve beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bu atığın, tuğla üretiminde kil ile ikame edilmesi son yıllarda dikkat çekmektedir. Silis dumanının mikron altı tane boyutu, tuğla bünyesinde daha yoğun bir mikroyapı oluşmasını sağlarken, yüksek silis içeriği sinterleme sırasında camlaşma sürecini etkileyerek mekanik dayanımı artırma potansiyeline sahiptir [5].

Tuğlaların son fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen en temel parametrelerden biri sinterleme sıcaklığıdır. Sinterleme işlemi sırasında gerçekleşen faz dönüşümleri, gözenek yapısı ve kristal oluşumları; malzemenin basınç dayanımı, su emme oranı ve birim hacim ağırlığı üzerinde belirleyici rol oynar. Literatürde, cam atıkları ve uçucu kül gibi farklı endüstriyel yan ürünlerin tuğla bünyesine katılmasına yönelik çalışmalar, sıcaklık artışının genellikle poroziteyi azalttığını ve yoğunluğu artırdığını göstermektedir [6]. Ancak silis dumanının yüksek sıcaklık koşullarında tuğla matrisi ile girdiği reaksiyonların analizi, ürünün dayanıklılığı açısından hala geliştirilmeye muhtaç bir alandır [7]. Literatürde silis dumanının beton ve çimento kompozitlerindeki etkisi kapsamlı biçimde incelenmiş olsa da pişmiş kil tuğlalardaki davranışını araştıran çalışmalar oldukça sınırlı kalmaktadır. Özellikle farklı sinterleme sıcaklıklarının ve değişen katkı oranlarının bir arada ele alındığı deneysel çalışmalara olan ihtiyaç hala devam etmektedir [8].

Bu çalışma; silis dumanının tuğla üretiminde ikame malzeme olarak kullanılabilirliğini sorgulamak, farklı katkı oranlarının ve sinterleme sıcaklıklarının tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak ortaya koymak amacıyla yürütülmüştür.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Üretim için gerekli hammadde ve katkıların karışım oranları, üretim aşamaları ve yapılan testler aşağıda açıklanmıştır. Çalışmada hammadde olarak Afyonkarahisar bölgesinde bir tuğla fabrikasından elde edilmiş olan yüksek plastisiteye sahip tuğla kili kullanılmıştır. Kil hammaddesinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan tuğla kilinin kimyasal bileşimi

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Kızd.Kay	TOPLAM
Kil	50.25	21.38	3.69	2.68	2.64	0.90	1.20	6.64	9.00	99.48

Tuğla hammaddesi üretime başlanmadan önce etüvde 105 °C’de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Daha sonra kurutulan hammadde seramik bilyalı değirmende istenen inceliğe gelinceye kadar öğütülmüştür.

Çalışmada katkı olarak kullanılan silis dumanı Antalya Etibank Elektrometalürji İşletmesinden temin edilmiştir. Silis dumanının kimyasal analizi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Silis Dumanının Kimyasal Analizi

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	CaO	MgO	Kızd. Kaybı
Silis Dumanı	81.4	0.92	0.32	82.64	2.86	8.05	3.01

Deney örneklerinin pişirilmesinde “Protherm” marka, 1500 °C sıcaklık ve otomatik termostatlı, ± 5 °C hassasiyetli, dijital göstergeli fırın kullanılmıştır.

2.2. Metot

Çalışmada tuğla numunelerinin üretiminde %0 silis dumanı (SD) kullanılan kontrol serisine ek olarak kil hammaddesine ağırlıkça %10, %20 ve %30 silis dumanı ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlar öncelikle kuru olarak homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmış ve sonrasında karışım suyu ilave edilerek manuel olarak yoğurulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. Kil ve silis dumanı karışımının hazırlanmış hali

Kontrol serisi ile birlikte toplam 4 farklı seri tuğla karışımı hazırlanmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında 30 mm çaplı metal silindir kalıp kullanılmıştır. Numunelerin narinlik oranları 2 olacak şekilde boyutlandırılmaları yapılmıştır. Numunelerin üretimi laboratuvar tipi manuel hidrolik preste 70 bar basınç altında yapılmıştır (Şekil 2). Karışım oranları Tablo 3’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2. (a) Numunelerin şekillendirilmesinde kullanılan 25 tonluk hidrolik el presi ve silindir kalıp, (b) silindir örnekler

Tablo 3. Çalışmada kullanılan malzemelerin karışım oranları

Seri	Tuğla Kili (%)	Silis Dumanı (%)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30

Karışımlara katılacak hammadde oranları ağırlıkça belirlenmiştir. Üretilen tuğla örnekleri değişmez ağırlığa gelinceye kadar laboratuvar tipi etüvde 105 °C’de kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında tuğla numuneleri laboratuvar tipi fırında; 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C’de, son sıcaklarda 2 saat bekleyecek şekilde üç farklı sıcaklıkta sinterlenmesi sağlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Tuğla numunelerinin fırın içerisindeki dizilimi

Sinterleme işlemi sonrasında fırın ısısı oda sıcaklığına ulaştığında numuneler fırından çıkartılmış pişmiş ağırlıkları tartılmıştır ve fiziksel testler için suya konmuştur. Suda 24 saat bekletilen numunelerin su içerisindeki asılı ağırlıkları, yüzey kuru doygun ağırlıkları alınarak Arşimet prensibine göre fiziksel özellikleri belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Pişmiş numunelerin ağırlıklarının ölçülmesi

Tüm karışım oranlarından ve farklı sinterleme sıcaklığına sahip numunelerden 5’er adet örnek alınarak mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanım testine tabi tutulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Basınç dayanımı testi

1100 °C'de % 20 ve %30 silis dumanı ikame edilen serilerde numuneler erimiş ve deformasyona maruz kaldıklarından dolayı ölçüm yapılamamıştır (şekil 6).



Şekil 6. 1100°C'de sinterlenen %20 ve %30 SD katkılı numunelerin fırın çıkışı görünümü.

3. Sonuçlar ve Tartışma

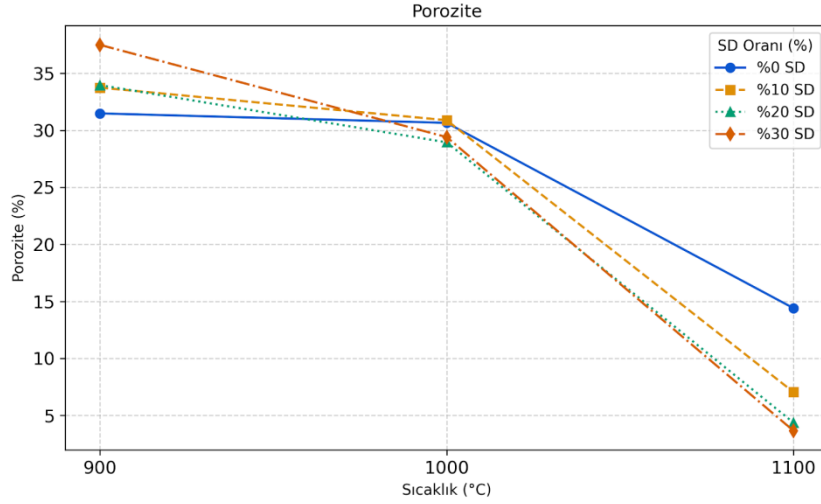
Çalışma ile ilgili yapılan fiziksel ve mekanik testlerden elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

3.1. Fiziksel Özellikler

Kil numunelere kuruma ve pişme testleri uygulanmıştır. Sonrasında etüv ağırlıkları ve pişmiş ağırlıkları tespit edilmiştir. Arşimet terazisinde tartımları yapılarak elde edilen verilere göre su emme, porozite ve birim hacim ağırlık özellikleri belirlenmiştir.

3.1.1. Porozite

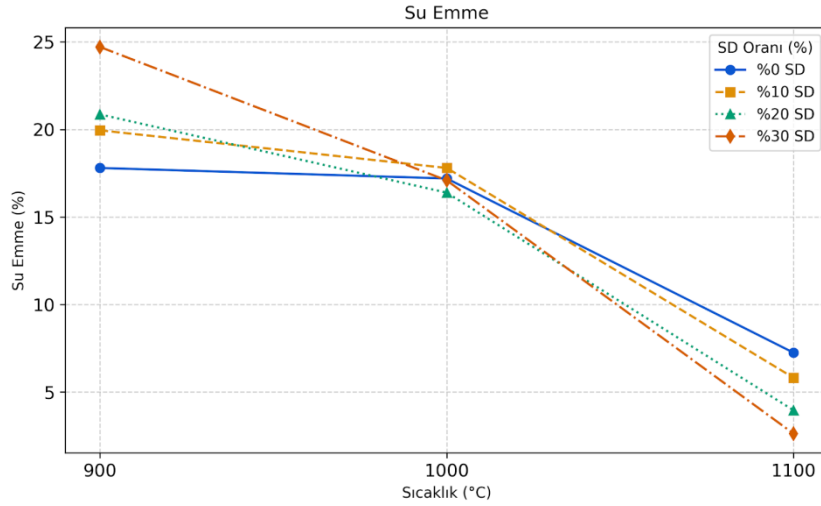
Elde edilen verilere göre 900 °C sıcaklıkta silis dumanı oranı arttıkça porozite değerleri yükselmektedir; %0 SD ile %31,49 olan porozite, %30 SD katkısıyla %37,50 seviyesine çıkmaktadır. 1100 °C sıcaklığa ulaşıldığında silis dumanı katkısı poroziteyi düşürücü bir etki oluşturmuştur. Bu sıcaklıkta %30 SD içeren numune, %3,66 ile serideki en düşük porozite değerine ulaşarak en yoğun yapıyı sergilemiştir. Silis dumanı düşük sıcaklıklarda gözenekliliği artırırken, yüksek sıcaklıklarda (1100 °C) matrisin daha sıkı bağlanmasını sağlayarak boşluk hacmini minimize ettiği düşünülmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Sıcaklık Değişimi- Porozite Grafiği

3.1.2 Su Emme

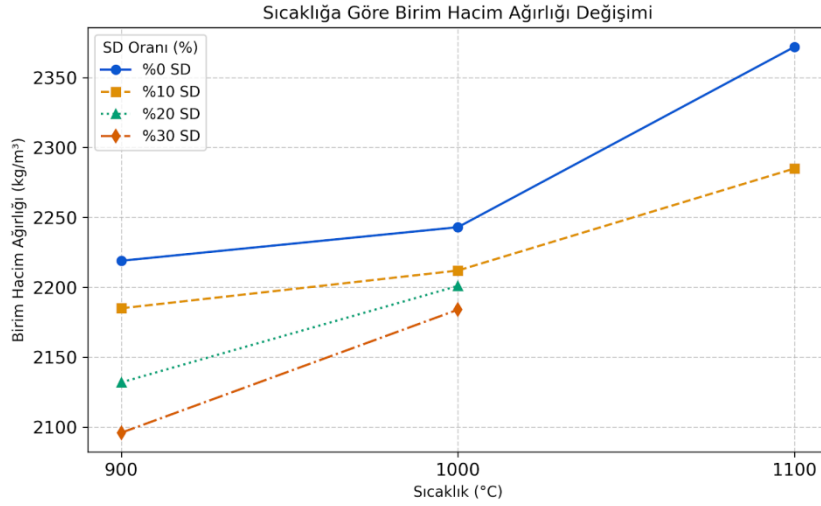
Tüm numune gruplarında, sıcaklık 900 °C'den 1100 °C'ye yükseldikçe su emme oranlarında ciddi bir düşüş yaşanmaktadır. Bu durum, sıcaklık artışıyla birlikte malzemenin sinterleşme derecesinin arttığını ve boşluklu yapının kapandığını göstermiştir. 1000 °C civarında tüm numunelerin su emme değerleri birbirine yaklaşmakta (%17-%18 aralığı), ancak 1100 °C'ye çıkıldığında SD katkısının numuneyi daha yoğun hale getirme (boşlukları kapatma) etkisinin baskın hale geldiği görülmüştür. Silis dumanı düşük sıcaklıklarda gözenekliliği artırıcı bir etki yaparken, 1100 °C gibi yüksek sıcaklıklarda camsı faz oluşumuna yardımcı olarak malzemenin su sızdırmazlığını ve yoğunluğunu artırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Sıcaklık Değişimi- Su Emme Grafiği

3.1.3 Birim Hacim Ağırlık

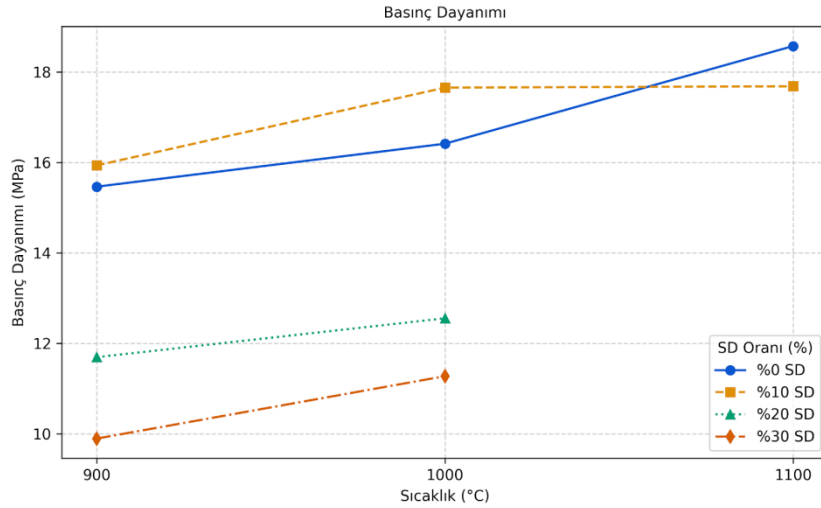
Pişirme sıcaklıklarında 1100 °C için %20 ve %30 SD ikame karışımlarda ölçüm yapılamamıştır. Malzeme bu sıcaklık ve katkı oranında fiziksel bütünlüğünü koruyamamış ve birim hacim ağırlık hesaplamada hacim için gerekli olan numune çapı ve boyu ölçülememiştir. Kontrol serisinde (%0) katkı ve %10 SD katkı numunelerde, sıcaklık arttıkça birim hacim ağırlığının da düzenli olarak arttığı görülmektedir. Bu durum, sinterleme sürecinin bu numunelerde stabil ilerlediğini göstermektedir. Silis dumanının özgül ağırlığının kil hammaddesinden düşük olması sebebiyle SD oranı arttırıldıkça birim ağırlığın düştüğü gözlemlenmiştir. (Şekil 9).



Şekil 9. Sıcaklık Değişimi- Birim Hacim Ağırlığı Grafiği

3.2. Mekanik özellikler

Sinterlenen numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir. Saf kil (%0 SD) ve %10 SD katkıli karışımlar, 900 °C'den 1100 °C'ye kadar sürekli bir artış sergilemektedir. %20 ve %30 SD katkıli numuneler ise 1000 °C sıcaklığa kadar test edilebilir değerler sunmuş, ancak 1100 °C'de numunelerin formunu kaybederek deformasyona uğramasından dolayı test gerçekleştirilememiş ve ölçüm dışı bırakılmıştır. En yüksek dayanım değeri 1100 °C sıcaklıkta saf kil numunesinde (18,57 MPa) görülürken, 1000 °C'de %10 SD katkısı (17,65 MPa) saf kilden daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 10. Sıcaklık Değişimi- Basınç dayanımı grafiği

4. Sonuç

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde silis dumanı katkısının ve oranlarının değişkenliğine bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonuçları, silis dumanının 1100 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çok düşük porozite ve su emme değerleri sağladığını, ancak mekanik dayanım açısından en dengeli sonucun %10 silis dumanı katkısı ve 1000 °C-1100 °C sıcaklık aralığında elde edildiğini göstermektedir. Hafiflik ve düşük su emme öncelikli olduğunda yüksek oranlı silis dumanı kullanımı daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Endüstriyel bir atık olan silis dumanının yapı sektöründe

geri kazanılarak daha sürdürülebilir ve yüksek performanslı yapı malzemeleri üretilebileceği düşünülmektedir. Sonraki çalışmalarda üretilen numuneler için ısı iletkenlik ve akustik testleri yapılarak ürünlerin yalıtım değerleri hakkında araştırmalar yapılması planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] S. P. Raut, R. V. Ralegaonkar, S. A. Mandavgane, "Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks." *Construction and Building Materials*, 25(10) (2011) 4037-4042. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038
- [2] L. Zhang, "Production of bricks from waste materials – A review." *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 643-655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043
- [3] M. Dondi, M. Marsigli, B. Fabbri, Recycling of industrial and urban wastes in brick production—A review. *Tile & Brick International*, 13(3) (1997) 218-225.
- [4] G. Cultrone, E. Sebastian K. Elert, M. J. Torre, O. Cazalla C. R. Navarro "Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks." *Journal of the European Ceramic Society*, 24(3) (2004) 547-564. DOI:10.1016/S0955-2219(03)00249-8
- [5] P. Turgut, Manufacturing of building bricks without Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 37 (2012) 361-367. DOI:10.1016/j.jclepro.2012.07.047
- [6] S. E. Chidiac, L. M. Federico, Effects of waste glass addition on the properties and microstructure of fired clay brick. *Construction and Building Materials*, 34(11) (2007) 1458-1466. DOI:10.1139/L07-120
- [7] N. Phonphuak, P. Chindaprasirt, Types of waste, properties and durability of pore-forming waste-based fired masonry bricks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20 (2015) 103-127. DOI:10.1016/B978-1-78242-305-8.00006-1
- [8] S. Karaman, S. Erşahin, H. Günel, "Firing temperature and firing time influence on mechanical and physical properties of clay bricks." *Journal of Scientific & Industrial Research*, 65(2) (2006) 153-159.



Görme Engelliler İçin 3 Boyutlu Dokunsal Harita Tasarımı ve Üretimi

Sedanur KIYAKLI^{1*}, Prof. Dr. İbrahim YILMAZ²

^{1*} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, sedanurkiyakli@gmail.com

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, iyilmaz@aku.edu.tr

*Sorumlu Yazar: Sedanur KIYAKLI

Özet

Coğrafi ve mekânsal bilgiye erişim, toplumun tüm bireyleri için evrensel bir hak olup "Mekânsal Adalet" kavramının temelini oluşturmaktadır. Kartografya ürünlerinin büyük bir kısmının görsel odaklı tasarlanması, görme engelli ve az gören bireylerin coğrafya eğitiminde ve mekânsal anlamlandırma süreçlerinde fırsat eşitsizliği yaşamasına neden olmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı; Harita Mühendisliği prensipleri doğrultusunda kurumsal ve açık kaynaklı verileri, Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM) teknolojisiyle entegre ederek dokunsal (haptik) harita okuryazarlığını destekleyecek eğitim materyalleri geliştirmektir. Metodoloji kapsamında; mülki ve idari detaylar için Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) standartlarındaki kurumsal veriler (Harita Genel Müdürlüğü [HGM], Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü [TKGM], Belediye Coğrafi Bilgi Sistemleri [CBS] vb.), topografik yüzeyler için Uzay Mekiği Radar Topografya Misyonu (Shuttle Radar Topography Mission-SRTM) ve mikro ölçekli kentsel alanlar için Açık Sokak Haritası (OpenStreetMap-OSM) gibi açık veri servisleri kullanılmıştır. Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımları (QGIS), OpenSCAD ve Blender yazılımlarıyla yürütülen süreçte; Creality K1C 3 Boyutlu (3B) yazıcı ve Creality Slicer dilimleme yazılımı kullanılarak hem az gören hem de tam görme engelli bireylerin eşzamanlı kullanımına uygun olan, idari sınırları belirginleştirilmiş yüksek kontrastlı ve Braille alfabeli modüler Türkiye haritası ile eş yükselti eğrisi mantığını somutlaştıran topografik yapılar prototip olarak üretilmiştir. Ayrıca kentsel doku eğitimine yönelik olarak, tarihi Afyon Kalesi ve çevresi için dokunsal navigasyon stratejileri kurgulanmıştır. Sonuçlar, 3B yazıcıların geleneksel kabartma yöntemlerine kıyasla daha ekonomik, güncellenebilir ve yüksek hassasiyetli bir "Engelsiz Kartografya" altyapısı sunduğunu; bu tasarımların dijital ortamda paylaşılarak eğitimde evrensel bir yaygın etki yaratabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Görme Engelliler; Dokunsal Harita, 3B Baskı, Braille Alfabesi, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Kartografya

Design And Production Of 3d Tactile Maps for the Visually Impaired

Abstract

Access to geographical and spatial information is a universal right and forms the basis of "Spatial Justice". The visual focus of most cartographic products leads to inequality of opportunity for visually impaired and low-vision individuals in geography education. The main objective of this study is to develop educational materials that support tactile map literacy by integrating institutional and open-source data with Fused Deposition Modeling (FDM) technology based on Map Engineering principles. Within the methodology; General Directorate of Mapping (HGM) vector data for administrative boundaries, NASA SRTM data for topographic surfaces, and OpenStreetMap (OSM) data for micro-scale areas were used. In the process carried out with QGIS, OpenSCAD, and Blender; a high-contrast modular map of Turkey with prominent administrative borders and Braille labels suitable for both low-

vision and totally blind individuals, along with topographic structures embodying contour line logic, were produced as prototypes using the Creality K1C 3-Dimensional (3D) printer and Creality Slicer software. Additionally, tactile navigation strategies for the historical Afyon Castle and its surroundings were established for urban texture education. The results show that 3D printers offer a more economical, updatable, and high-precision "Inclusive Cartography" infrastructure compared to traditional methods; and that sharing these designs digitally can create a universal impact in education.

Keywords: Visually Impaired; Tactile Map, 3D Printing, Braille Alphabet, Geographic Information Systems (GIS), Cartography

1. Giriş

Kartografya, mekânsal verilerin belirli semboloji ve ölçek kuralları çerçevesinde iletilmesini sağlar. Ancak haritaların büyük ölçüde görsel algıya hitap etmesi, görme yetersizliği olan bireylerin mekânı zihinlerinde canlandırmasını ve coğrafya eğitimini zorlaştırmaktadır [1]. Görme engelli bireylerin mekânsal algılarını geliştirmesinde ve coğrafi beceriler kazanmasında engeline uygun dokunsal materyallerin kullanımı kritik bir role sahiptir [2]. Geleneksel el işçiliği veya termoform gibi kabartma üretim yöntemleri, konumsal hassasiyetin düşük olması ve dijital paylaşım imkânı sunmaması sebebiyle günümüz mühendislik standartlarını karşılamakta yetersiz kalmaktadır [3]. Literatürde, açık kaynaklı coğrafi verilerin 3B yazıcılarla entegrasyonu [4] ile 3B baskının geleneksel yöntemlere kıyasla üstünlüğünü ve eğitimsel faydalarını ortaya koyan çalışmalar [5,6,7] dokunsal kartografyanın potansiyelini göstermektedir. Bu çalışma; kurumsal veriler (TUCBS) ve açık kaynaklı mekânsal verileri hibrit bir yapıda birleştirerek, Harita Mühendisliği tabanlı, yüksek coğrafi doğruluğa sahip dokunsal eğitim materyalleri geliştirmeyi hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada mekânsal doğruluk için TUCBS standartlarındaki HGM verileri, topografik analizlerde NASA SRTM ve kentsel modellemelerde OpenStreetMap (OSM) verileri kullanılmıştır. Geliştirilen bu altyapı; TKGM, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve Belediye CBS verilerinin entegrasyonuna da imkân tanımaktadır. Verilerin işlenmesi ve modellenmesi için QGIS, OpenSCAD, Blender ve Creality Slicer yazılımları; fiziksel üretim için ise Polilaktik Asit (PLA) hammadde kullanan FDM teknoloji Creality K1C 3B yazıcı tercih edilmiştir.

2.2. Metot

Mekânsal verilerin dokunulabilir materyale dönüşüm süreci; veri temini, işleme, 3B modelleme, dilimleme ve üretim olmak üzere 5 aşamada gerçekleştirilmiştir. Modellerin tasarımında, yükseklik kademelendirmelerinde ve Braille sembolojilerinde Kuzey Amerika Braille Otoritesi [8] standartları referans alınmıştır.

3. Araştırma Bulguları ve Uygulama

3.1. Geleneksel ve Dijital Üretim Yöntemlerinin Kıyaslaması

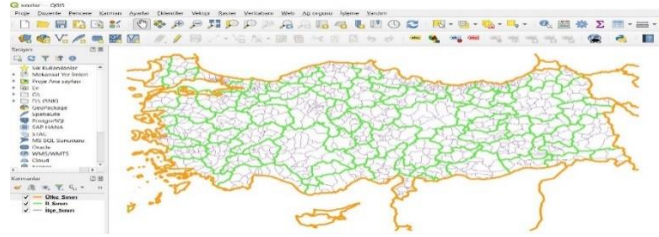
FDM teknolojisinin verimliliğini değerlendirmek amacıyla, el işçiliğine dayalı topografik bir maket ile sayısal verilere dayalı 3B baskı modeli fiziksel olarak karşılaştırılmıştır (Şekil 1). İncelemeler, 3B baskı teknolojisinin mikron seviyesinde doğruluk sağladığını göstermiştir. Geleneksel maketlerdeki kırılma riski ve kargo maliyetlerine karşın, 3B tasarımların dijital dosyalar (STL) halinde anında aktarılabilir yerelde basılabilmesi büyük bir lojistik avantaj sunmaktadır.



Şekil 1. Geleneksel Yöntemle Üretilen Maket ve 3B Baskı Modelinin Karşılaştırması

3.2. Kapsayıcı Kartografik Üretimler

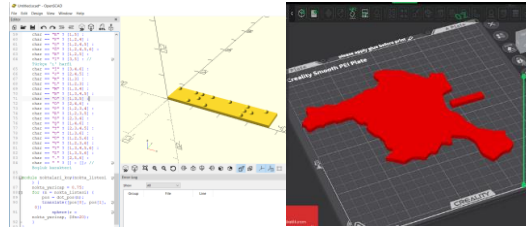
Türkiye sınırları QGIS ortamında sayısallaştırılarak (Şekil 2), az gören ve tam görme engelli bireylerin aynı materyalden faydalanabileceği evrensel bir tasarım kurgulanmıştır. Coğrafi bölge haritalarında, az gören bireyler için yüksek görsel kontrast sağlayan renkli filamentler kullanılmıştır (Şekil 3). İl bazlı tasarımlarda ise OpenSCAD kullanarak Braille etiketler parametrik olarak eklenmiştir (Şekil 4). Kapsayıcılığı artırmak adına az görenler için renkli (Şekil 5), tam görme engelliler için ise sınırların parmakla hissedilebildiği fiziksel yükseltili (basamak etkili) haritalar basılmıştır (Şekil 6).



Şekil 2. QGIS Ortamında Ülke, İl ve İlçe Sınırlarının Vektörel Analizi



Şekil 3. Görme Engelli Bireyler İçin 3B Basılmış Türkiye Coğrafi Bölgeler Haritası



Şekil 4. Braille Kodlama (OpenSCAD) ve Dilimleme Yazılımı (Crealty Slicer) Arayüzü



Şekil 5. Az Gören Bireyler İçin Yüksek Kontrastlı Renkli İdari Sınır Haritası



Şekil 6. Tam Görme Engelli Bireyler İçin Basamaklı (Fiziksel Yükselteli) İdari Sınır Haritası

3.3. Topografik Eğitim Modelleri

Eş yükselti eğrisi (izohips) kavramının kavranması için Ağrı Dağı iki farklı yaklaşımla modellenmiştir (Tablo 1). Bu sayede öğrenciler, arazinin doğal formunu ve yükselti basamaklarını parmak uçlarıyla doğrudan kıyaslayarak öğrenebilmektedir.

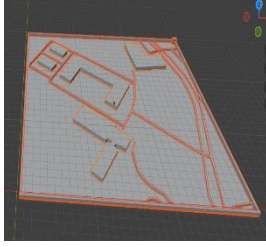
Tablo 1. Tanımlayıcı ve Analitik Modellerin Teknik Özellikleri ve Eğitim Amaçları

ÖZELLİK	1. MODEL: TANIMLAYICI (GERÇEKÇİ)	2. MODEL: ANALİTİK (KAVRAMSAL)
Teknik Yöntem	16-Bit İşleme (65.536 Ton Hassasiyet)	Standart Dilimleme (İzohips Tabanlı)
Yüzey Görünümü	Pürüzsüz, kesintisiz ve bütüncül yüzey.	Basamaklı, katmanlı (merdiven benzeri) yapı.
Temsil Ettiği	Dağın birebir doğal topografik formu.	Haritacılıktaki "Eş Yükselti Eğrisi" (İzohips) mantığı.
Eğitim Amacı	Görme engelli bireye arazinin gerçek eğimini hissettirmek.	Soyut bir kavram olan "yükselti basamaklarını" öğretmek.
Görünüm		

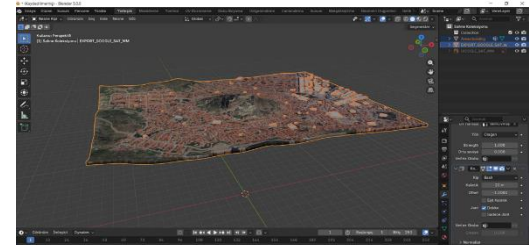
3.4. Kampüs İçi Navigasyon ve Kentsel Tasarım

AKÜ Mühendislik Fakültesi kampüsü Blender'da modellenmiş ve navigasyon amaçlı dokunsal bir harita olarak basılmıştır (Şekil 7). Kentsel farkındalığı artırmak amacıyla tarihi Afyon Kalesi ve çevresi de BlenderGIS ile modellenmiştir (Şekil 8). OSM verilerindeki yapı stoku eksikliklerini gidermek için çalışmada; manuel sayısallaştırma, kurumsal veri entegrasyonu ve yapay zeka (ör. Microsoft Global

Building Footprints) algoritmalarını içeren üç aşamalı "Hibrit Veri Tamamlama Stratejisi" uygulanmıştır.



Şekil 7. AKÜ Kampüs Alanı Sayısal Modeli (Blender) ve Dokunsal Harita Prototipi



Şekil 8. Afyon Kalesi ve Çevresinin OpenStreetMap Verileri Kullanılarak Oluşturulan 3B Kentsel Model

4.Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, FDM tabanlı 3B yazıcı teknolojilerinin Engelsiz Kartografya alanında sunduğu evrensel potansiyeli ortaya koymaktadır. Sistemin sağladığı en büyük avantajlardan biri sürdürülebilirliktir; güncelliğini yitiren veya hatalı basılan modeller geri dönüştürülerek yeniden hammadde (PLA) olarak kullanılabilir. Ayrıca, hazırlanan dijital tasarımların (STL formatı) dijital ağlar üzerinden paylaşılabilir olması, materyal erişiminde sınırları ortadan kaldırmaktadır.

Çalışmanın sunduğu metodoloji, kurumsal talepler doğrultusunda eğitim kampüslerinin veya belediye sınırlarının dokunsal haritalarının tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Bireysel ölçekte ise görme engelli bireylerin kendi mahallelerini veya acil toplanma alanlarını içeren "Kişiselleştirilmiş Navigasyon Haritaları" talep üzerine hızlıca üretilebilmektedir.

Gelecek çalışmalarda bu projenin vizyonunun genişletilmesi öngörülmektedir. Makro ölçekte; kıtaları, okyanusları ve başkentleri içeren "3B Dokunsal Dünya Atlası"nın yanı sıra, tektonik levha hareketlerini ve iklim kuşaklarını farklı yüzey dokularıyla sembolize eden küresel tematik haritalar tasarlanabilir. Türkiye ölçeğinde ise deprem risk haritaları, fay hatlarını kademeli olarak gösteren deprem risk haritaları, büyükşehirlerin karmaşık raylı sistem ağları, tarım ürünleri dağılım haritaları, arazi kullanım haritaları ve önemli tarihi rotalarını içeren turistik haritaların üretilmesi hedeflenmektedir. Bununla birlikte, özgün dokusal sembollerle harita yüzeyine aktarılması ve üretilen tüm modellerin sensörler yardımıyla dokunulduğunda sesli geri bildirim veren interaktif sistemlere dönüştürülmesi planlanmaktadır. Sonuç olarak, bu metodoloji açık kaynaklı mekânsal bilgiyi dijital ağlar üzerinden tüm bireyler için parmak uçlarında hissedilebilir, küresel çapta erişilebilir ve doğa dostu bir gerçekliğe dönüştürmeyi amaçlamaktadır.

Kaynaklar

- [1] S. J. Lederman, R. L. Klatzky, Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7) (2009) 1439-1459.
- [2] M. Tanrikulu, Kaynaştırma ortamlarında öğrenim gören 9. sınıf total görme engelli öğrencilere harita bilgisinin öğretimi. *TSA*, 15(3) (2011) 71-83.
- [3] J. Rowell, S. Ungar, The world of tactile cartography. *The Cartographic Journal*, 40(3) (2003) 211-214.
- [4] L. Holloway, K. Marriott, M. Butler, Accessible maps for the blind: Comparing 3D printed models with tactile graphics. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2018) (s. 1-13). Association for Computing Machinery.

- [5] J. Gual, M. Puyuelo, J. Lloveras, Three-dimensional printing: A new tool for the production of tactile graphics. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 109(6) (2015) 512-518.
- [6] T. Watanabe, T. Yamaguchi, S. Koda, K. Minatani, Tactile map automated creation system using openstreetmap. In *International Conference on Computers for Handicapped Persons* (2014) (pp. 42-49). Cham: Springer International Publishing.
- [7] S. Giraud, A. M. Brock, M. J. M. Macé, C. Jouffrais, Map learning with a 3D printed interactive small-scale model: Improvement of space and text memorization in visually impaired students. *Frontiers in Psychology*, 8 (2017) 930.
- [8] Braille Authority of North America [BANA], Guidelines and standards for tactile graphics. (2022) BANA. <https://www.brailleauthority.org/guidelines-and-standards-tactile-graphics>



Et, Tavuk ve Balık Ürünlerinin Biyoaktif Bileşenlerle Zenginleştirilmesi

Ayşenur Akdaş ¹, Dilek Demirbüker Kavak*, Ramazan Şevik ³

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, ayse99akdas@gmail.com

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, dkavak@aku.edu.tr

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, ramazansevik@aku.edu.tr

Özet

Et ve balık ürünleri, doğal olarak vitaminler, mineraller, biyoaktif peptitler ve esansiyel yağ asitleri gibi insan sağlığını destekleyen bileşikleri içeren zengin bir matrise sahiptir. Son yıllarda, bu ürünlerin polifenoller, bitki ekstraktları, uçucu yağlar ve doğal antioksidanlar gibi fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmesi, gıda bilimi alanında önemli bir araştırma yönelimi haline gelmiştir. Fonksiyonel gıda üretiminin temel anlayışı, orijinal ürünlerin sağlığı destekleyici bileşenlerle güçlendirilmesine dayanmaktadır. Bu çalışmada, biyoaktif bileşenlerin et ve balık ürünlerinde duyuusal özelliklerin korunmasına, fizikokimyasal bozulmaların yavaşlatılmasına ve raf ömrünün uzatılmasına olan katkılarını inceleyen güncel çalışmaları ortaya koymak amaçlanmıştır. Literatürdeki bulgular, doğal antioksidan ve antimikrobiyal maddelerin sentetik katkılara alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Bu maddeler, oksidatif reaksiyonları baskılayarak ürün kalitesini iyileştirmekte ve mikrobiyal gelişimi engellemektedir. Ayrıca yenilebilir film ve kaplama teknolojileri, bu bileşenlerin taşınmasında etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Zenginleştirme işlemlerinin, ürünlerin fonksiyonel özelliklerini geliştirirken tüketici kabulünü de olumlu yönde etkileyebileceği görülmektedir. Sonuç olarak, biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmiş et ve balık ürünleri, gıda güvenliğini sağlamanın ötesinde sağlık destekleyici özellikler taşıyan yeni nesil fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, geleneksel hayvansal ürünlerin sağlıklı gıda pazarındaki yerini güçlendirme potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: biyoaktif bileşenler; et ve balık ürünleri, fonksiyonel gıda, raf ömrü, antioksidan aktivite

Enrichment of Meat, Poultry and Fish Products with Bioactive Components

Abstract

Meat and fish products naturally possess a rich matrix naturally compounds that support human health, such as vitamins, minerals, bioactive peptides, and essential fatty acids. In recent years, enriching these products with functional ingredients including polyphenols, plant extracts, essential oils, and natural antioxidants has become a significant research trend in food science. The fundamental concept of

functional food production is based on strengthening original products with health-promoting components. This study aims to present contemporary research investigating the contributions of bioactive components to preserving sensory properties, slowing physicochemical degradation, and extending shelf life of meat and fish products. Findings in the literature indicate that natural antioxidant and antimicrobial substances serve as alternative to synthetic additives. These substances improve product quality by suppressing oxidative reactions and inhibiting microbial growth. Furthermore, edible film and coating technologies stand out as effective method for delivering these components. It is observed that enrichment processes can improve the functional properties of products while also positively impacting consumer acceptance. Consequently meat and fish products enriched with bioactive components allow for the development of next generation functional foods that carry health-promoting properties beyond ensuring food safety. This approach holds the potential to strengthen the position of traditional animal products in the healthy food market.

Keywords: bioactive components; meat and fish products, functional food, shelf life, antioxidant activity

1. Giriş

Et ve balık ürünleri; yüksek biyoyararlanıma sahip elzem amino asitler, yağ asitleri, vitaminler ve biyoaktif peptitler gibi sağlığı destekleyici bileşenler bakımından zengin bir matrise sahiptir [1]. Günümüzde artan tüketici bilinci ve endüstriyel rekabet, geleneksel ürünlerin polifenol, bitki ekstraktı ve uçucu yağ gibi fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmesini gıda biliminin odak noktasına taşımıştır. Fonksiyonel gıda üretimindeki temel prensip, ürünün orijinal yapısını bozmadan besin değerini artırmak, oksidatif bozulmaları önleyerek raf ömrünü uzatmak ve katma değerli ürünler geliştirmektir. Zenginleştirme işleminin başarısı, ilave edilen biyoaktif bileşenin gıda matrisiyle kurduğu yapısal etkileşime bağlıdır. Su, protein ve yağ kompozisyonunun biyoaktif bileşenin stabilitesi ve biyoyararlanımı üzerindeki rolünü ifade eden "matris etkisi", zenginleştirme stratejilerinin metodolojisini belirler. Nitekim sığır etindeki su (%75), protein (%22) ve yağ (%3) oranlarının, balık ürünlerindeki (%60 su, %15 protein, %25 yağ) dağılımdan farklılık göstermesi [2], kullanılacak yöntemin bu spesifik bileşimlere göre tasarlanmasını gerektirir.

Bu çalışmanın amacı; biyoaktif bileşenlerin et ve balık ürünlerinde duyu özelliklerinin korunmasına, fizikokimyasal bozulmaların yavaşlatılmasına ve raf ömrünün uzatılmasına olan katkılarını güncel literatür ışığında incelemektir. Derleme kapsamında; biyoaktif bileşenlerle zenginleştirmede uygun gıda matrisi, enkapsilasyon teknolojisi, oksidatif reaksiyonların baskılanması ve yenilebilir film/kaplama teknolojilerine tüketici yaklaşımları ve mevzuattaki yeri konusunda çeşitli yaklaşımlar ele alınarak, yeni nesil fonksiyonel gıdaların potansiyeli bu kapsamda değerlendirilmiştir.

2. Zenginleştirmede Kullanılan Biyoaktif Bileşenler ve Matris Etkileşimi

Et ve balık ürünlerinin fonksiyonel özelliklerini artırmak için kullanılan vitamin, mineral, omega-3 yağ asitleri, antioksidan ve diyet lifleri gibi bileşenler, gıda matrisiyle karmaşık moleküler etkileşimlere girmektedir. Bu etkileşimler hem ürünün biyolojik etkinliği hem de duyu kalitesi üzerinde belirleyici rol oynar. Biyoaktif bileşenlerin matris ile kurduğu etkileşimler olumlu veya olumsuz sonuçlar doğurabilir. Olumlu etkileşimler açısından, *Gardenia jasminoides* ve epigallokateşin galat gibi antioksidanlar, karbonhidrat metabolizmasını düzenleyerek postprandiyal kan şekeri artışını baskılayabilmektedir [3] Bu sinerjik etkiler, gıdanın fonksiyonel değerini artırarak kronik hastalık yönetimine katkı sağlar. Kısıtlayıcı etkileşimlere örnek olarak ise biyoaktif maddelerin protein veya yağ molekülleriyle istenmeyen bağlar kurması, bu bileşenlerin biyoyararlanımını düşürebilir. Örneğin, tanenlerin proteinlerle kompleks oluşturması hem besin emilimini zorlaştırmakta hem de üründe acı bir tat (astringency) geliştirerek tüketici kabulünü olumsuz etkilemektedir [14].

3. Et Ürünlerinde Biyoaktif Bileşenlerin Korunması: Enkapsülasyon Teknolojisi

Biyoaktif bileşenlerin stabilitesini ve çevresel direncini artırmada enkapsülasyon stratejik bir yöntemdir. Bu işlem, aktif bileşiklerin uygun duvar materyalleriyle izole edilerek hedeflenen noktada kontrollü salınımını sağlar [5]. Et ürünlerinde besinsel kaliteyi koruyarak fonksiyonel ürün geliştirmeyi amaçlayan bu teknoloji [6], sentetik katkılara güçlü bir alternatiftir. Nitekim Comunian ve ark. [7], tavuk sosislerinde enkapsüle askorbik asit kullanımının duyuşal profili korurken besin değeriğini artırdığını ve su aktivitesini stabilize ettiğini rapor etmiştir. Enkapsülasyon sistemi "çekirdek" materyalin mikro veya nano ölçeğinde koruyucu bir faza hapsedilmesine dayanır ve bu durum hassas bileşenlerin raf ömrü ile fonksiyonelliğini doğrudan iyileştirir [5]. Örneğin, sığır eti köftelerine dahil edilen enkapsüle nar kabuğu nanopartiküllerinin raf ömrünü 15 güne çıkardığı, su tutma ve pişirme verimini artırdığı saptanmıştır [8]. Endüstride püskürterek kurutma, koaservasyon, emülsifikasyon ve lipozom teknikleri yaygın olarak tercih edilmektedir [15]. Zeytin yaprağı özütünün çift emülsiyonla kapsüllenecek yağ ikamesi olarak kullanımı da oksidatif stabiliteyi ve duyuşal kaliteyi geliştirmektedir [9].

4. Duyusal Kalite ve Tüketici Kabulü

Duyusal analiz; ürünlerin tat, aroma, renk, tekstür ve görünüm gibi karakteristik özelliklerinin insan duyuşları aracılığıyla kantitatif ve kalitatif olarak değerlendirildiği bilimsel bir metodolojidir. Biyoaktif bileşenlerin et ürünlerine entegrasyonunda, fonksiyonel kazanımların yanı sıra duyuşal kalitenin korunması birincil önceliktir. Literatürde, enkapsüle edilmiş balık yağının sığır burgerlerinde pişirme kaybını minimize ettiği, tekstürel profili iyileştirdiği ve oksidasyona bağlı tat bozulmalarını önleyerek duyuşal kaliteyi artırdığı rapor edilmiştir [10]. Benzer şekilde, sazan eti ile zenginleştirilen ekmek çubuklarında %10-15 oranındaki balık ilavesinin, ürünün duyuşal karakteristikleri üzerinde pozitif bir etki yarattığı saptanmıştır [11].

5. Proses Tasarımı ve Uygulama Yöntemleri

Biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmiş ürünlerin üretiminde; kalite, maliyet etkinliği ve biyogüvenlik kriterleri temel alınarak bir proses tasarımı gerçekleştirilmelidir. Biyoaktif bileşenlerin et, tavuk ve balık matrisine dahil edilmesinde; enjeksiyon, daldırma, tamburlama (tumbling), kaplama ve doğrudan karıştırma tekniklerinden yararlanılmaktadır [12]. Bu yöntemler, fonksiyonel bileşenin ürün matrisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Proses sürecinde sıcaklık, pH, oksijen varlığı, ışık şiddeti ve su aktivitesi gibi parametreler, biyoaktif bileşiklerin kararlılığını doğrudan etkilemektedir [13]. Özellikle oksidasyona duyarlı bileşenlerin korunması amacıyla yenebilir film kaplama ile birlikte vakum paketlenme ve modifiye atmosfer paketlenme (MAP) gibi yöntemler yaygın olarak tercih edilmektedir.

6. Mevzuat ve Etiketleme Esasları

Zenginleştirilmiş gıdalar, ulusal ve uluslararası gıda otoritelerinin düzenlemelerine tabidir. Türkiye'de bu süreç, Türk Gıda Kodeksi (TGK) çerçevesinde yürütülmektedir. "Gıdalara Vitaminler, Mineraller ve Belirli Diğer Öğelerin Eklenmesi Hakkında Yönetmelik" [14], gıdalara eklenebilecek bileşenlerin kimyasal formları ve maksimum kullanım limitleri kesin çizgilerle tanımlanmıştır. Tüketicinin doğru bilgilendirilmesi adına, bu ürünlerin etiketleme işlemleri "TGK Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği" esaslarına tam uyum sağlamalıdır.

7. Et, Balık ve Tavuk Ürünlerinde Zenginleştirme Uygulamaları: Literatür Bulguları

Güncel çalışmalar, hayvansal matrislerin biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmesinin ürün kalitesi ve güvenliği üzerinde çok yönlü avantajlar sağladığını göstermektedir. Et ürünlerinde doğal antioksidan ve lif kullanımı öne çıkmaktadır; örneğin gül yaprağı özütü ilave edilen pastırmalarda nitrit ihtiyacının azaldığı, lipid oksidasyonunun baskılandığı ve raf ömrünün uzadığı bildirilmiştir [15]. Benzer şekilde, sığır burgerlerinde bezelye ve buğday lifi kullanımının su tutma kapasitesi ile pişirme verimini artırdığı saptanmıştır [16]. Balık ürünlerinde ise zenginleştirme stratejileri genellikle muhafaza

teknolojileri odaklıdır. Yenilebilir kaplama uygulamaları, mikrobiyal proliferasyonu inhibe ederek ürünün raf ömrünü ve mikrobiyolojik güvenliğini optimize etmekte, hassas balık matrisi için fonksiyonel bir bariyer oluşturmaktadır [17,18]. Tavuk ürünlerinde ise Moringa çiçeği ekstraktı kullanımının teknik ve biyokimyasal kazanımları dikkat çekicidir. Bu ekstraktın dahil edildiği tavuk nuggetlarda pişirme kayıpları azalmış; yüksek antioksidan kapasite sayesinde soğuk depolama sürecinde (20 gün, 4 ± 1 °C) lipid oksidasyonu ve mikrobiyal gelişim kritik düzeyde sınırlandırılmıştır [19]. Özetle literatür bulguları, biyoaktif bileşenlerin hayvansal ürünlerin teknolojik özelliklerini iyileştirirken oksidatif ve mikrobiyolojik stabiliteyi başarıyla sağladığını doğrulamaktadır.

8. Sonuç

Et, tavuk ve balık ürünlerinin biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmesi, gıda biliminde katma değerli ürün geliştirme stratejilerinin merkezinde yer almaktadır. Bu uygulamalar ürünlerin sadece besleyici değerini artırmakla kalmayıp, oksidatif stabiliteyi güçlendirerek raf ömrünü uzatmaktadır. Ancak, biyoaktif bileşenlerin biyoyararlanımının korunması, duyuşal niteliklerin sürdürülebilirliği ve proses parametrelerinin optimizasyonu endüstriyel başarı için kritik eşiklerdir. Bu noktada enkapsülasyon teknolojileri, stabiliteyi artıran ve fonksiyonel özellikleri optimize eden anahtar bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmiş et ve et ürünleri, temel beslenme işlevinin ötesine geçerek kronik hastalıkların önlenmesine destek olan yeni nesil fonksiyonel gıdalar kategorisinde güçlü bir potansiyele taşınmaktadır.

Kaynaklar

- [1] E. Pogorzelska-Nowicka, A. G. Atanasov, J. Horbańczuk, A. Wierzbicka, Bioactive compounds in functional meat products. *Molecules*, 23(2) (2018) 307.
- [2] M. Waqar, N. Sajjad, Q. Ullah, S. S. Vasanthkumar, F. Ahmed, W. Panpipat, T. A. Ageru, Fish By-Products Utilization in Food and Health: Extraction Technologies, Bioactive, and Sustainability Challenges. *Food Science & Nutrition*, 13(11) (2025) e71184.
- [3] Z. Arshad, S. Shahid, A. Hasnain, E. Yaseen, M. Rahimi, Functional foods enriched with bioactive compounds: therapeutic potential and technological innovations. *Food Science & Nutrition*, 13(10) (2025) e71024.
- [4] M. J. Rein, M. Renouf, C. Cruz-Hernandez, L. Actis-Goretta, S. K. Thakkar, M. da Silva Pinto Bioavailability of bioactive food compounds: A challenging journey to bioefficacy. *British journal of clinical pharmacology*, 75(3) (2013) 588-602.
- [5] S. Tutun, O. Yurdakul, Enkapsülasyon ve gıda teknolojisinde kullanımı. *Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni*, 13(2) (2022) 99–119.
- [6] T. Nuriler, A. Bağdatlı, Biyoaktif bileşiklerin enkapsülasyonu ve et ve et ürünlerinde uygulamaları. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(37) (2024) 50–60.
- [7] T. A. Comunian, C. S. Favaro-Trindade, M. Thomazini, N. A. Lopes, J. A. L. Pallone, Effect of incorporating free or encapsulated ascorbic acid in chicken frankfurters on physicochemical and sensory stability. *Journal of Food Research*, 3(3) (2014) 100–109.
- [8] M. K. Morsy, E. Mekawi, R. Elsabagh, Impact of pomegranate peel nanoparticles on quality attributes of meatballs during refrigerated storage. *Lwt*, 89 (2018) 489-495.
- [9] P. Robert, M. Zamorano, E. González, A. Silva-Weiss, S. Cofrades, B. Giménez, Double emulsions with olive leaves extract as fat replacers in meat systems with high oxidative stability. *Food Research International*, 120 (2019) 904-912.
- [10] D. F. Keenan, V. C. Resconi, T. J. Smyth, C. Botinestean, C. Lefranc, J. P. Kerry, R. M. Hamill, The effect of partial-fat substitutions with encapsulated and unencapsulated fish oils on the technological and eating quality of beef burgers over storage. *Meat Science*, 107 (2015) 75-85.

- [11] G. Tokarczyk, G. Bienkiewicz, K. Felisiak, P. Biernacka, T. Krzywiński, M. Bury, E. López Arroyos, Nutritional Composition, Bioactive Properties, and Sensory Evaluation of Breadsticks Enriched with Carp Meat (*Cyprinus carpio*, L.). *Foods*, 14(23) (2025) 4066.
- [12] H. Ergezer, R. Gökçe, Kanatli etlerinin marinasyon tekniği ile işlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2) (2004) 227-233.
- [13] A. Szpicer, W. Bińkowska, A. Stelmasiak, I. Wojtasik-Kalinowska, A. Czajkowska, S. Mierzejewska, A. Półtorak, Innovative Microencapsulation Techniques of Bioactive Compounds: Impact on Physicochemical and Sensory Properties of Food Products and Industrial Applications. *Applied Sciences*, 15(22) (2025) 11908.
- [14] Türk Gıda Kodeksi. Gıdalara Vitaminler, Mineraller ve Belirli Diğer Öğelerin Eklenmesi Hakkında Yönetmelik. T.C. Resmi Gazete, Sayı: 30000, (2017) 7 Mart 2017.
- [15] S. J. Konteles, N. A. Stavropoulou, I. V. Thanou, E. Mouka, V. Kousiaris, G. N. Stoforos, M. C. Giannakourou, Enriching Cured meat products with bioactive compounds recovered from *Rosa damascena* and *Rosmarinus officinalis* L. distillation by-products: The pursuit of natural antimicrobials to reduce the use of nitrites. *Applied Sciences*, 13(24) (2023) 13085.
- [16] S. Besbes, H. Attia, C. Deroanne, S. Makni, C. Blecker, Partial replacement of meat by pea fiber and wheat fiber: Effect on the chemical composition, cooking characteristics and sensory properties of beef burgers. *Journal of Food Quality*, 31(4) (2008) 480-489.
- [17] P. Dehghani, S. M. H. Hosseini, M. T. Golmakani, M. Majdinasab, S. Esteghlal, Shelf-life extension of refrigerated rainbow trout fillets using total Farsi gum-based coatings containing clove and thyme essential oils emulsions. *Food Hydrocolloids*, 77 (2018) 677-688.
- [18] R. Heydari, S. Bavandi, S. R. Javadian, Effect of sodium alginate coating enriched with horsemint (*Mentha longifolia*) essential oil on the quality of bighead carp fillets during storage at 4 C. *Food science & nutrition*, 3(3) (2015) 188-194.
- [19] P. Madane, A. K. Das, M. Pateiro, P. K. Nanda, S. Bandyopadhyay, P. Jagtap, J. M. Lorenzo, Drumstick (*Moringa oleifera*) flower as an antioxidant dietary fibre in chicken meat nuggets. *Foods*, 8(8) (2019) 307.



Postür ve Yürüme Bozuklukları Analiz ve Ölçüm Sistemi

Rema ISMAAEL¹, Zaid ALDURAYI¹, Nour İSMAİEL¹ ve Uğur FİDAN¹

1 Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, ayse99akdas@gmail.com

2 Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, ramazansevrik@aku.edu.tr

Özet

Yürüyüş ve postür bozukluklarının objektif olarak değerlendirilmesi, kas-iskelet sistemi problemleri, nörolojik rahatsızlıklar, rehabilitasyon süreçleri ve yaşlı bireylerde düşme riskinin izlenmesi açısından önemli bir gereksinimdir. Geleneksel hareket analiz sistemleri yüksek doğruluk sağlamasına karşın, maliyetli donanımlar, laboratuvar bağımlılığı ve uzman kullanım gereksinimi nedeniyle günlük yaşam koşullarında uzun süreli ölçüm yapılmasını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, giyilebilir ataletsel ölçüm birimleri kullanılarak postür ve yürüme bozukluklarının düşük maliyetli, taşınabilir ve kullanıcı dostu bir sistem ile analiz edilmesini hedefleyen bir ölçüm altyapısı sunulmuştur. Sistem mimarisi; üç adet MPU6050 sensörü, ESP32 mikrodenetleyici, seri haberleşme tabanlı veri aktarımı, 18650 Li-ion batarya destekli enerji birimi, baskı devre kartı tasarımı, başlangıç aşamasında kullanılan MATLAB tabanlı sinyal işleme yaklaşımı ve daha sonra geliştirilen Python/PyQt6 tabanlı analiz arayüzünden oluşmaktadır. Sensörler sol üst gövde, sağ üst gövde ve L4/merkez gövde bölgelerine yerleştirilerek ivme, açısal hız ve bu verilerden türetilen pitch-roll parametrelerinin eş zamanlı olarak toplanması amaçlanmıştır. Yöntem bölümünde örnekleme frekansı, filtreleme yaklaşımı, tamamlayıcı filtre ile oryantasyon hesabı ve pilot ölçüm protokolü açıklanmıştır. Ön pilot uygulamada sağlıklı yürüyüş, sağ ayak kısa ve sol ayak kısa senaryolarından seçilen kayıt pencereleri incelenmiş; özellikle omuz roll farkı ve L4 roll değişimi gibi parametrelerin yürüyüş asimetrisini gösterebilecek nitelikte olduğu görülmüştür. Önerilen sistemin klinik dışı ortamlarda ölçüm yapabilmesi, rehabilitasyon takibi, evde hasta izleme ve koruyucu sağlık uygulamalarında kullanılabilecek erişilebilir bir alternatif oluşturması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Yürüyüş analizi, postür analizi, giyilebilir sensör, IMU, ESP32, MATLAB, Python, PyQt6

Analysis and Measurement System for Posture and Gait Disorders

Abstract

Objective assessment of gait and posture disorders is an important requirement for monitoring musculoskeletal problems, neurological impairments, rehabilitation processes and fall risk in older adults. Conventional motion analysis systems provide high accuracy; however, their use is generally limited by expensive equipment, laboratory dependency, complicated installation and the need for trained operators. This study presents a low-cost, portable and wearable measurement architecture designed to analyze posture and gait abnormalities under conditions that are not restricted to clinical laboratories. The proposed system consists of three MPU6050 inertial measurement units, an ESP32

microcontroller, serial communication-based data transfer, an 18650 Li-ion battery-supported power unit, a printed circuit board design, an initial MATLAB-based signal processing workflow and a subsequently developed Python/PyQt6-based analysis interface. The sensors are positioned on the left upper trunk, right upper trunk and L4/central trunk region in order to collect motion-related signals synchronously. The revised method section defines the sampling frequency, filtering strategy, complementary-filter-based orientation estimation and preliminary pilot measurement protocol. In the pilot records, selected windows from healthy gait, right leg short and left leg short scenarios were evaluated. Preliminary findings indicate that parameters such as shoulder roll difference and L4 roll variation may reflect gait asymmetry. The proposed architecture may support rehabilitation followup, home-based patient monitoring and preventive healthcare applications after further validation.

Keywords: Gait analysis, posture analysis, wearable sensor, IMU, ESP32, MATLAB, Python, PyQt6

1. Giriş

İnsan yürüyüşü; kas-iskelet sistemi, vestibüler sistem, görsel geri bildirim ve merkezi sinir sistemi arasındaki koordinasyonun birlikte çalışmasıyla ortaya çıkan karmaşık bir hareket örüntüsüdür. Postür ise vücudun yerçekimine karşı dengeli biçimde konumlanmasını sağlayan dinamik bir kontrol sürecidir. Bu iki mekanizmada ortaya çıkan bozulmalar yalnızca hareket performansını değil, günlük yaşam aktivitelerini, rehabilitasyon başarısını ve düşme riskini de doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle yürüyüş ve postür parametrelerinin nicel, tekrarlanabilir ve erişilebilir yöntemlerle izlenmesi biyomedikal mühendisliği açısından güncel bir araştırma alanıdır. Yürüyüş ve postür analizinde optik hareket yakalama sistemleri, kuvvet platformları ve basınç tabanlı yürüme yolları gibi geleneksel yöntemler uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu sistemler ayrıntılı ölçüm olanağı sunmasına rağmen yüksek maliyet, sabit laboratuvar kurulumu, kalibrasyon gereksinimi ve günlük yaşam koşullarını temsil etmede sınırlılık gibi dezavantajlara sahiptir. Buna karşılık giyilebilir sensörler, özellikle ataletsel ölçüm birimleri (IMU), küçük boyutları, düşük güç tüketimleri ve taşınabilir yapıları sayesinde hareketin klinik dışı ortamlarda izlenmesine olanak sağlamaktadır [1,2]. IMU tabanlı sistemlerde ivmeölçer ve jiroskop verileri kullanılarak yürüyüş döngüsü, adım ritmi, gövde salınımı, denge değişimleri ve postüral sapmalar gibi kinematik özellikler hesaplanabilmektedir. Literatürde Parkinson hastalığı, yaşlı bireylerde düşme riski ve rehabilitasyon takibi gibi alanlarda taşınabilir sensörlerin başarılı biçimde kullanıldığı bildirilmektedir [3,4,6,7]. Ayrıca IMU verilerinden vücut segmenti oryantasyonunun hesaplanmasında sensör füzyonu ve tamamlayıcı filtre temelli yaklaşımlar, ham ivmeölçer ve jiroskop sinyallerinin tek başına kullanımına göre daha kararlı açı kestirimleri sağlayabilmektedir [5]. Bu çalışmanın temel amacı, giyilebilir IMU sensörleri ile postür ve yürüme bozukluklarının analiz edilmesine yönelik düşük maliyetli ve taşınabilir bir sistem mimarisi geliştirmektir. Önerilen yapı, ESP32 mikrodenetleyici üzerinden çoklu sensör verilerini toplamayı, başlangıç aşamasında MATLAB ortamında filtreleme ve temel kinematik analizleri gerçekleştirmeyi, sonraki geliştirme aşamasında ise Python/PyQt6 tabanlı arayüz ile gerçek zamanlı görselleştirme, CSV kayıt ve oturum sonu raporlama işlemlerini desteklemeyi hedeflemektedir. Çalışmanın revize edilen halinde, sistemin yalnızca tasarım düzeyinde kalmaması için ön pilot ölçümden elde edilen seçilmiş kayıt pencereleri de bulgular bölümüne eklenmiştir. Böylece sistemin veri toplama ve temel yürüyüş-postür parametrelerini çıkarma açısından uygulanabilirliği daha somut biçimde gösterilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sistem mimarisi ve donanım bileşenleri

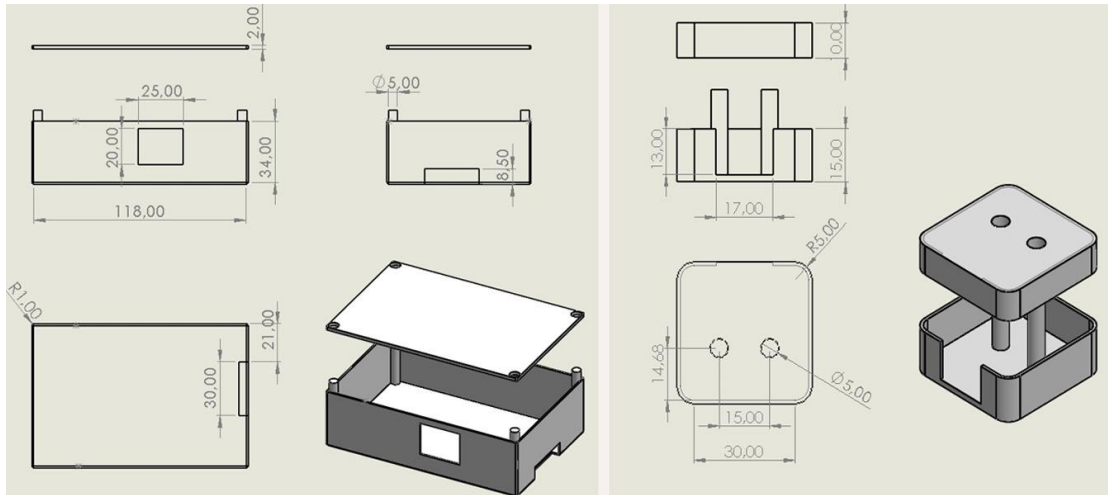
Geliştirilen sistem, vücuda yerleştirilen çoklu sensör düğümlerinden elde edilen hareket verilerinin kablosuz olarak bilgisayara aktarılması ve yazılım ortamında analiz edilmesi prensibine dayanmaktadır. Donanım yapısında temel ölçüm birimi olarak MPU6050 sensörü kullanılmıştır. MPU6050, üç eksenli ivmeölçer ve üç eksenli jiroskop içeren bir IMU sensörü olup doğrusal ivme ile

açısız hız verilerini I2C haberleşme protokolü üzerinden mikrodenetleyiciye iletmektedir. Sensörlerin sol üst gövde, sağ üst gövde ve L4/merkez gövde bölgelerine konumlandırılmasıyla postüral duruş ve yürüyüş sırasında oluşan gövde hareketlerinin eş zamanlı izlenmesi planlanmıştır. Sistemin merkezi kontrol birimi olarak ESP32 geliştirme kartı tercih edilmiştir. ESP32, entegre Bluetooth desteği, yeterli işlem kapasitesi, düşük güç tüketimi ve çoklu çevresel birim arayüzleri nedeniyle giyilebilir biyomedikal ölçüm sistemleri için uygun bir platformdur. Sensörlerden okunan veriler mikrodenetleyici tarafından belirlenen örnekleme frekansında toplanmakta, temel veri düzenleme işlemlerinden geçirilmekte ve 115200 baud hızında Bluetooth bağlantısı üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır. Kablo bağlantısının ortadan kaldırılması, ölçüm sırasında kullanıcının doğal hareketini kısıtlamadan veri alınmasına katkı sağlamaktadır.

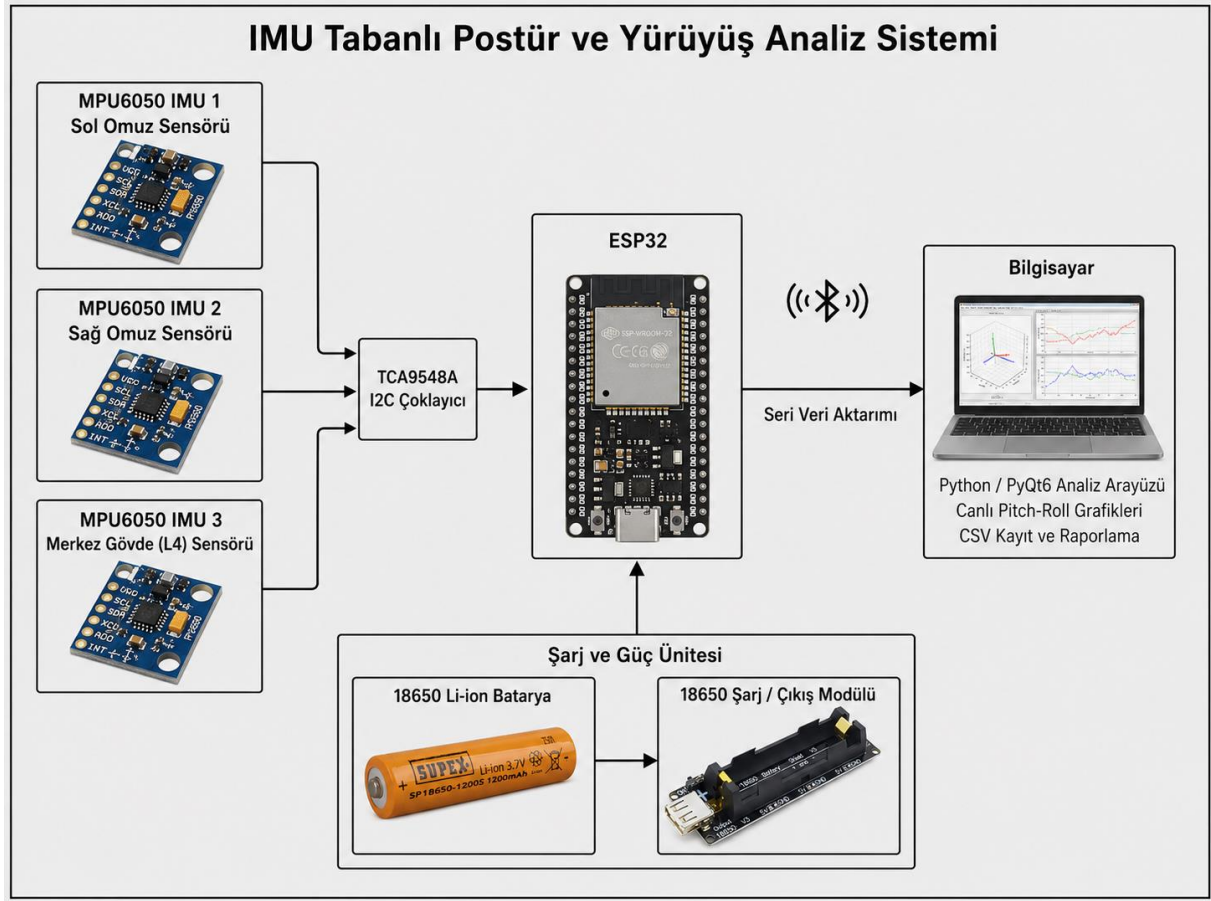
Tablo 1. Sistem bileşenleri ve kullanım amaçları

Bileşen	Görev	Seçim gerekçesi
MPU6050 IMU	İvme ve açısız hız ölçümü	Düşük maliyetli, küçük boyutlu, I2C destekli
ESP32	Veri toplama ve kablosuz aktarım	Bluetooth/Wi-Fi desteği, düşük güç tüketimi
Li-Po pil ve şarj devresi	Taşınabilir enerji beslemesi	Kablo bağımlılığını azaltma ve güvenli şarj
DC/DC dönüştürücü	Kararlı besleme gerilimi	Pil gerilimindeki değişimlere karşı süreklilik
PCB ve muhafaza	Elektronik yerleşim ve koruma	Giyilebilirlik, mekanik dayanım ve düzenli bağlantı
MATLAB arayüzü	Kayıt, filtreleme, analiz ve raporlama	Sinyal işleme ve görselleştirme kolaylığı

Enerji biriminde Li-Po pil, şarj devresi kullanılarak sistemin batarya ile çalışması hedeflenmiştir. Bu yapı, klinik dışı ölçümlerde taşınabilirliği artırmakta ve kısa süreli saha uygulamalarında kesintisiz veri toplanmasına olanak vermektedir. Elektronik bileşenlerin düzenli ve güvenli biçimde bir araya getirilmesi için baskı devre kartı tasarımı yapılmakta; sensör ve kontrol birimlerinin dış ortam etkilerinden korunması amacıyla SolidWorks ortamında bir muhafaza modeli oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Devre ve sensör kutularının tasarımı



Şekil 2. sistemin blok diyagramı

2.2. Veri toplama ve yazılım akışı

Ölçüm süreci kullanıcıdan deneye ait temel bilgilerin alınmasıyla başlatılmaktadır. Ardından yazılım arayüzü çevredeki Bluetooth cihazlarını taramakta, uygun ESP32 cihazı seçilmekte ve bağlantı durumu kontrol edilmektedir. Bağlantı başarısız olduğunda kullanıcıya uyarı verilerek yeniden bağlantı kurulması sağlanmaktadır. Bağlantının başarılı olması durumunda START komutu ile kayıt süreci başlatılmakta, STOP komutu verilene kadar sensörlerden gelen ivme ve açısal hız verileri zaman etiketli olarak bilgisayara aktarılmaktadır. Çalışmanın ilk geliştirme aşamasında sensörlerden alınan veriler MATLAB ortamında kaydedilmiş, filtrelenmiş ve pitch-roll değişimleri grafiksel olarak incelenmiştir. Bu aşama, sistemin temel sinyal işleme akışının doğrulanması ve pilot ölçüm verilerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Daha sonraki aşamada ise ölçüm sürecini daha kullanıcı dostu ve gerçek zamanlı hale getirmek amacıyla Python/PyQt6 tabanlı bir masaüstü arayüz geliştirilmiştir. ESP32'den gelen veriler seri port üzerinden 115200 baud hızında alınmış ve her sensör için pitch ve roll açıları ayrı ayrı izlenmiştir. Arayüzde sağ omuz, sol omuz ve boyun/ense sensörlerine ait pitch-roll eğrileri gerçek zamanlı olarak görüntülenmiş; ölçüm süresince elde edilen veriler CSV formatında kaydedilebilir hale getirilmiştir. Sinyal işleme aşamasında pitch açısı vücudun öne-arkaya eğilimini, roll açısı ise sağa-sola eğilimini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Sağ ve sol omuz sensörlerinden elde edilen pitch değişimleri yürüyüş ritmi ve topallama/asimetri değerlendirmesinde; roll değişimleri ise gövde salınımı ve yana eğilme davranışının incelenmesinde kullanılmıştır. Boyun/ense bölgesindeki sensör verileri ise başın öne eğilmesi, yana eğilmesi ve genel duruş değişikliklerinin izlenmesine katkı sağlamıştır. Arayüz yazılımında gelen veriler kısa süreli veri pencereleri içerisinde değerlendirilmiş; ortalama, standart sapma, genlik ve sağ-sol sensör farkı gibi temel parametreler hesaplanmıştır. Böylece sistem yalnızca ham veri toplayan bir düzenek olarak değil, aynı zamanda postür ve yürüyüş değişimlerini gerçek zamanlı olarak izleyen ve ön değerlendirme düzeyinde yorumlayabilen bir analiz

altyapısı olarak yapılandırılmıştır. Geliştirilen arayüz, sensör verilerini gerçek zamanlı grafikler, canlı vücut görselleştirmesi, anlık değerlendirme puanı ve oturum sonu raporu ile kullanıcıya sunacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı, sistemin yalnızca pasif veri toplama amacıyla değil, aynı zamanda ölçüm sırasında duruş ve yürüyüş değişimlerini izleyebilen etkileşimli bir ön değerlendirme platformu olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. İlerleyen çalışmalarda bu yapı, gerçek zamanlı uyarı mekanizmaları ve kişiye özel rehabilitasyon takibi ile genişletilebilir.



Şekil 3. Sistemin arayüzü

2.3. Oryantasyon hesabı ve sinyal işleme parametreleri

Ham IMU verilerinden anlamlı postür parametreleri elde edebilmek için ivmeölçer ve jiroskop verilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada postüral değişimin temel göstergeleri olarak pitch ve roll açıları seçilmiştir. Pitch açısı gövdenin öne-arkaya eğilimini, roll açısı ise sağ-sol yana eğilimini temsil etmektedir. İvmeölçerden elde edilen yerçekimi bileşenleri kısa süreli statik eğilim hakkında bilgi verirken, jiroskop verisi açısal hız değişimini daha hızlı izleyebilmektedir. Ancak ivmeölçer hareket sırasında gürültüye, jiroskop ise zamanla sürüklenmeye duyarlı olduğu için bu iki ölçümün birlikte kullanılması gereklidir [5]. Bu amaçla temel analiz akışında tamamlayıcı filtre yaklaşımı kullanılmıştır. Tamamlayıcı filtrede jiroskop verisinden elde edilen kısa süreli açı değişimi yüksek geçiren karakterde, ivmeölçerden hesaplanan eğim bilgisi ise düşük geçiren karakterde değerlendirilir. Böylece jiroskopun hızlı değişim takibi ile ivmeölçerin uzun süreli dengeleme özelliği birleştirilir. Uygulamada pitch ve roll açıları genel olarak $\theta_t = \alpha \times (\theta_{t-1}) + \omega \times \Delta t + (1 - \alpha) \times \theta_{acc}$ mantığıyla elde edilmektedir. Burada (t) güncel açı değerini, (t) jiroskop açısal hızını, (t) örnekler arası süreyi, (acc) ivmeölçerden hesaplanan eğim açısını ve (t) filtre katsayısını göstermektedir. Bu çalışmada ön uygulama için (98) değeri esas alınmıştır. Daha ileri doğrulama aşamalarında Madgwick veya Mahony filtreleri gibi daha gelişmiş sensör füzyonu algoritmalarıyla karşılaştırma yapılması planlanmaktadır. Ön pilot kayıt dosyasında zaman etiketleri üzerinden ortalama örnekleme aralığı yaklaşık 68 ms olarak hesaplanmış, bu da yaklaşık 15 Hz örnekleme frekansına karşılık gelmiştir. Giyilebilir yürüyüş analizinde düşük frekanslı gövde salınımları ön planda olduğundan MATLAB analiz akışında 2. dereceden düşük geçiren Butterworth filtre ve 4 Hz kesim frekansı kullanılacak şekilde filtreleme adımı tanımlanmıştır. Aykırı ve eksik değerler için kayıt öncesi bağlantı kontrolü, kayıt sırasında zaman etiketi izleme ve kayıt sonrasında veri temizleme adımları uygulanmaktadır.

2.4. Ön pilot ölçüm protokolü

Sistemin çalışabilirliğini göstermek amacıyla sağlıklı birey üzerinde ön pilot kayıtlar alınmıştır. Bu kayıtlar klinik tanı veya klinik validasyon amacı taşımamakta; yalnızca sistemin veri toplayabildiğini, sensörler arası farkları izleyebildiğini ve temel postür-yürüyüş parametrelerinin çıkarılabildiğini

göstermek için kullanılmıştır. Pilot veri setinde sağlıklı yürüyüş, sağ ayak kısa senaryosu ve sol ayak kısa senaryosu için seçilen kayıt pencereleri değerlendirilmiştir. Veri setinde kullanılan kısaltmalar makale metninde açık biçimde yazılmıştır: “SAK” ifadesi sol ayak kısa, “sağ-k” ifadesi sağ ayak kısa, “solAK” ifadesi sol aksak ayak ve “sagAK” ifadesi sağ aksak ayak olarak düzenlenmiştir. Ön pilot değerlendirmede her senaryo için 10 kayıt penceresi seçilmiştir. Her pencerede sol omuz, sağ omuz ve L4/merkez gövde sensörlerinden elde edilen pitch ve roll açıları incelenmiştir. Seçilen temel parametreler; sağ-sol omuz roll farkı, sağ-sol omuz pitch farkı, L4 roll ortalaması, L4 roll hareket açıklığı ve L4 pitch hareket açıklığıdır. Sağ-sol omuz farkları, gövde simetrisini ve yürüyüş sırasında oluşabilecek asimetrik salınımları değerlendirmek için kullanılmıştır. L4 bölgesi ise gövdenin merkezi hareketini temsil ettiği için postüral değişimin izlenmesinde temel referans noktası olarak kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Sistem tasarımına ilişkin bulgular

Bu çalışma kapsamında postür ve yürüyüş analizine yönelik düşük maliyetli, kablosuz ve modüler bir sistem tasarımı ortaya konulmuştur. Önerilen sistem, ölçüm sürecini laboratuvar ortamına bağımlı olmaktan çıkararak kullanıcının doğal hareket koşullarında veri toplanmasına imkân sağlamaktadır. Üç farklı gövde bölgesinden veri alınması, sağ-sol omuz asimetrisi, gövde salınımı ve duruş değişimlerinin birlikte değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Sistem tasarımında ESP32 ve MPU6050 gibi düşük maliyetli ve erişilebilir bileşenlerin kullanılması, prototipin ekonomik ve yeniden üretilebilir olmasını sağlamaktadır. Yaklaşık 1500 TL düzeyinde hedeflenen prototip maliyeti, sistemin eğitim, ön tarama, rehabilitasyon takibi ve saha uygulamaları için uygulanabilir bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Sinyal işleme açısından ilk ölçüm ve değerlendirme adımları MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş; bu süreçte pitch ve roll verileri filtrelenerek grafiksel olarak incelenmiştir. Daha sonra geliştirilen Python/PyQt6 tabanlı arayüz, sensör verilerinin gerçek zamanlı izlenmesine, pitch ve roll eğrilerinin görselleştirilmesine, verilerin CSV formatında kaydedilmesine ve oturum sonunda raporlanmasına olanak sağlamıştır. Bu yönüyle sistem yalnızca veri toplayan bir düzenek değil, aynı zamanda postür ve yürüyüş değişimlerini ön değerlendirme düzeyinde yorumlayabilen bir analiz altyapısı sunmaktadır.

3.2. Ön pilot ölçüm bulguları

Ön pilot ölçümde sağlıklı yürüyüş, sağ ayak kısa senaryosu ve sol ayak kısa senaryosu için seçilen kayıt pencereleri karşılaştırılmıştır. Bulguların amacı klinik sınıflandırma yapmak değil, sistemin farklı yürüyüş koşullarında değişen gövde ve omuz hareketlerini algılayabildiğini göstermektir. Seçilen verilerden elde edilen özet değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Ön pilot ölçümden seçilen özet değerler

Ölçüm koşulu	Kayıt penceresi sayısı	Ortalama omuz roll farkı (°)	L4 roll ortalaması $\pm$ SS (°)	L4 roll hareket açıklığı (°)
Sağlıklı yürüyüş	10	31,11	-29,04 $\pm$ 10,72	32,31
Sağ ayak kısa senaryosu	10	26,94	-27,77 $\pm$ 6,77	26,08
Sol ayak kısa senaryosu	10	53,15	-30,44 $\pm$ 8,28	28,43

Tablo 2’de görüldüğü gibi sol ayak kısa senaryosunda ortalama omuz roll farkı 53,15° olarak hesaplanmış ve bu değer diğer ölçüm koşullarına göre daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, sistemin sağ-sol omuz hareketleri arasındaki farkı algılayabildiğini ve asimetrik yürüyüş durumlarında omuz roll farkının ayırt edici bir ön parametre olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu ön bulgular,

sistemin ham sensör verilerinden anlamlı postür ve yürüyüş parametreleri üretebildiğini göstermesi açısından önemlidir. Bununla birlikte ölçümler sınırlı kayıt pencerelerine dayandığından sonuçlar klinik tanı veya kesin sınıflandırma amacıyla kullanılmamalıdır. Daha güvenilir değerlendirme için farklı gönüllülerle tekrar ölçümleri yapılmalı ve sistem referans ölçüm yöntemleriyle karşılaştırılmalıdır [8]. Ayrıca uzun süreli giyilebilir sensör çalışmalarında olduğu gibi, sistemin farklı kullanıcı gruplarında ve saha koşullarında test edilmesi gerekmektedir [4,6,7]

4. Sonuç

Bu çalışmada postür ve yürüme bozukluklarının değerlendirilmesine yönelik, IMU tabanlı, düşük maliyetli ve taşınabilir bir ölçüm sistemi önerilmiştir. Sistem; MPU6050 sensörleri, ESP32 mikrodenetleyici, seri haberleşme altyapısı, 18650 batarya destekli enerji birimi, başlangıç aşamasında kullanılan MATLAB tabanlı sinyal işleme süreci ve daha sonra geliştirilen Python/PyQt6 tabanlı analiz arayüzünün birlikte çalışmasıyla kurgulanmıştır. Revize edilen çalışmada yöntem bölümüne oryantasyon hesabı, tamamlayıcı filtre yaklaşımı, örnekleme frekansı ve filtreleme parametreleri eklenmiş; bulgular bölümüne ise ön pilot ölçümünden elde edilen seçilmiş sonuçlar dahil edilmiştir. Ön pilot değerlendirme, sistemin sağlıklı yürüyüş ve ayak uzunluğu/asimetri senaryolarında gövde ve omuz hareketlerindeki değişimleri kaydedebildiğini göstermiştir. Özellikle omuz roll farkı ve L4 roll hareket açıklığı gibi parametrelerin yürüyüş asimetrisine ilişkin ön değerlendirmede kullanılabilecek göstergeler olduğu görülmüştür. Ancak bu sonuçlar sınırlı sayıda kayıt penceresine dayandığından klinik tanı veya kesin sınıflandırma amacıyla değerlendirilmemelidir. Çalışmanın literatüre katkısı, laboratuvar bağımlılığı yüksek geleneksel analiz yöntemlerine alternatif olarak erişilebilir, geliştirilebilir ve pilot verilerle desteklenmiş bir giyilebilir ölçüm yaklaşımı sunmasıdır. Gelecek çalışmalarda prototipin farklı denek gruplarında test edilmesi, referans sistemlerle karşılaştırmalı doğrulama yapılması, gerçek zamanlı uyarı mekanizmasının eklenmesi ve sınıflandırma algoritmalarıyla normal-anormal yürüyüş ayrımının güçlendirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca Madgwick ve Mahony gibi sensör füzyonu algoritmalarının tamamlayıcı filtre yaklaşımıyla karşılaştırılması, sistemin oryantasyon kestirim performansının daha ayrıntılı değerlendirilmesini sağlayacaktır.



Şekil 4. sensör yerleşimi ve prototip tasarımı

Kaynaklar

- [1] A. Muro-de-la-Herran, B. Garcia-Zapirain ve A. Mendez-Zorrilla, "Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems," *Sensors*, 14(2) (2014) 3362-3394.

- [2] A. Godfrey, S. Del Din, G. Barry, J. C. Mathers ve L. Rochester, "Instrumenting gait with an accelerometer: A system and algorithm examination," *Medical Engineering & Physics*, 37(4) (2015) 400-407.
- [3] S. Patel, K. Lorincz, R. Hughes, N. Huggins, J. Growdon, D. Standaert ve P. Bonato, "Monitoring motor fluctuations in patients with Parkinson's disease using wearable sensors," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13(6) (2009) 864-873.
- [4] S. Del Din, A. Godfrey, C. Mazza, S. Lord ve L. Rochester, "Free-living monitoring of Parkinson's disease: Lessons from gait analysis using wearable sensors," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 13 (2016) 5. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0111-1>
- [5] A. M. Sabatini, "Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing," *Sensors*, 11(2) (2011) 1489-1525.
- [6] A. Salarian, H. Russmann, F. J. G. Vingerhoets, C. Dehollain, Y. Blanc, P. R. Burkhard ve K. Aminian, "Gait assessment in Parkinson's disease: Toward an ambulatory system for long-term monitoring," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(8) (2004) 1434-1443.
- [7] A. Weiss, T. Herman, N. Giladi ve J. M. Hausdorff, "Objective assessment of fall risk in Parkinson's disease using a body-fixed sensor worn for 3 days," *PLoS ONE*, 5(5) (2010) e10652. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010652>
- [8] G. García-Villamil, M. Neira-Álvarez, E. Huertas-Hoyas, A. R. Ramón-Jiménez ve C. Rodríguez-Sánchez, "A pilot study to validate a wearable inertial sensor for gait assessment in older adults with falls," *Sensors*, 21(13) (2021) Article 4334. <https://doi.org/10.3390/s21134334>



Durgun Su Kütleleri için Çözünmüş Oksijeni Arttıran Otonom Yüzey Havalandırma Sistemi

Melisa Yozgatlı^{1*}, Salihcan Orha², Murat Furat³

^{1*}İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Hatay, melisayozgatli35@gmail.com

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Hatay, orhasalihcan@gmail.com

³İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Hatay, murat.furat@iste.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, durgun ve yapay su kütlelerinde sıklıkla karşılaşılan çözünmüş oksijen (DO) yetersizliğini gidermek amacıyla güneş enerjili otonom bir yüzey havalandırma sistemi tasarımı ele alınmıştır. Yağmur suları ile beslenen ve sirkülasyonu yetersiz olan göletlerde artan organik yük ve sıcaklık, ötrofikasyona neden olmakta; bu durum çözünmüş oksijen seviyesini kritik değerlere düşürerek balık ölümleri ve kötü koku oluşumu gibi ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle, düşük maliyetli ve sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Önerilen sistem, çevresel ışık seviyesine duyarlı LDR sensör tabanlı bir kontrol mekanizmasına sahiptir. Gündüz saatlerinde güneş panelleri aracılığıyla elde edilen enerji, sistemin güvenliğini ve batarya ömrünü koruyan bir Batarya Yönetim Sistemi (BMS) denetiminde Li-ion bataryalarda depolanmaktadır. Fotosentezin durduğu ve oksijen seviyesinin azaldığı gece saatlerinde sistem otonom olarak devreye girerek bünyesindeki su pompaları vasıtasıyla suyu sirküle etmekte ve yüzey havalandırması gerçekleştirmektedir. Sistemin mekanik yapısı, su üzerinde maksimum dengeyi sağlamak ve hidrodinamik direnci azaltmak amacıyla katamaran formunda Solidworks ortamında modellenmiş; prototip üretiminde ise modülerlik sağlayan 3D yazıcı teknolojisi kullanılmıştır. Katamaran yapısındaki bu mobil platform, su yüzeyinde hareket ederek sabit sistemlerin aksine geniş alanlarda homojen oksijen dağılımı sağlamaktadır. Önerilen bu yaklaşım, tamamen yenilenebilir enerji ile çalışarak işletme maliyetlerini minimize eden, kimyasal müdahaleye ihtiyaç duymayan ve sürdürülebilir su yönetimine katkı sunan yenilikçi bir çözüm ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Otonom Yüzey Aracı (USV), Katamaran, Güneş Enerjisi, Çözünmüş Oksijen (DO), Yüzey Havalandırma, Sürdürülebilir Su Yönetimi

Solar-Powered Autonomous Surface Aerator for Dissolved Oxygen Augmentation in Stagnant Waters

Abstract

In this study, the design of a solar-powered autonomous surface aeration system is addressed to resolve the dissolved oxygen (DO) deficiency frequently encountered in stagnant and artificial water bodies. In ponds fed by rainwater with insufficient circulation, increasing organic load and temperature lead to eutrophication; this situation drops dissolved oxygen levels to critical values, causing serious environmental problems such as fish kills and foul odors. Therefore, the need for low-cost and sustainable solutions is increasing every day.

The proposed system features an LDR sensor-based control mechanism sensitive to ambient light levels. During daylight hours, the energy obtained through solar panels is stored in Li-ion batteries under the supervision of a Battery Management System (BMS), which ensures system safety and protects battery life. During nighttime, when photosynthesis stops and oxygen levels decrease, the system activates autonomously to circulate water via internal water pumps and perform surface aeration.

The mechanical structure of the system was modeled in Solidworks in a catamaran form to provide maximum stability on water and reduce hydrodynamic resistance, while 3D printing technology was utilized in prototype production to ensure modularity. This mobile platform with a catamaran structure moves across the water surface, providing a homogeneous oxygen distribution over wide areas, unlike stationary systems. This proposed approach presents an innovative solution that minimizes operating costs by running entirely on renewable energy, requires no chemical intervention, and contributes to sustainable water management.

Keywords: Unmanned Surface Vehicle (USV), Catamaran, Solar Energy, Dissolved Oxygen (DO), Surface Aeration, Sustainable Water Management

1. Giriş

Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir su yönetimi, günümüzde artan çevresel problemler ve iklim değişikliğinin etkileri nedeniyle önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle yapay göletler, durgun su kütleleri ve balık yetiştiriciliğinde kullanılan rezervuarlarda çözünmüş oksijen (DO) seviyesinin azalması; balık ölümleri, kötü koku oluşumu, yosunlaşma (ötrofikasyon) ve ekosistem dengesinin bozulması gibi ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır.

Durgun sulara meydana gelen oksijen yetersizliği problemi küresel ölçekte önemli bir çevresel tehdit olarak değerlendirilmektedir. Özellikle sıcaklık artışı, organik madde birikimi ve yetersiz su sirkülasyonu; göl ve göletlerde çözünmüş oksijen seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde "Dead Zone" olarak adlandırılan düşük oksijen bölgeleri, Norveç'te balık çiftliklerinde görülen ötrofikasyon problemleri ve İrlanda'da rapor edilen toplu balık ölümleri bu durumun önemli örnekleri arasında yer almaktadır.

Türkiye'de de benzer problemler son yıllarda daha sık görülmektedir. Tekirdağ'da oksijen azalmasına bağlı toplu balık ölümleri yaşanırken, Bursa/Gemlik bölgesinde durgun sulara oksijen yetersizliği ve kirlilik problemleri gözlemlenmiştir. Ayrıca İstanbul'daki bazı peyzaj göletlerinde yosunlaşma ve kirlilik kaynaklı oksijen kaybı meydana gelmiştir. Bu durum, düşük maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir havalandırma sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır.

Bu nedenle yenilenebilir enerji destekli, enerji verimliliği yüksek ve otonom çalışma yeteneğine sahip sistemlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda güneş enerjisi destekli otonom yüzey araçları (USV), çevresel izleme ve su kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilen yenilikçi teknolojiler arasında yer almaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada geliştirilen sistemde güneş paneli, Li-ion batarya, mikroişlemci tabanlı kontrol kartı, ultrasonik sensörler, LDR sensörü, MOSFET sürücü devresi, su pompaları, hava iletim boruları ve 3D baskı yöntemiyle üretilmiş katamaran gövdesi kullanılmıştır. Sistem bileşenleri otonom hareket, enerji yönetimi ve havalandırma işlemlerini gerçekleştirecek şekilde entegre edilmiştir.

2.2. Metot

Bu çalışmada, durgun su kütlelerinde meydana gelen çözünmüş oksijen eksikliğinin giderilmesi amacıyla güneş enerjisi destekli otonom bir yüzey sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen platform, su yüzeyinde hareket ederek havalandırma işlemini gerçekleştirmekte ve su sirkülasyonuna katkı sağlamaktadır.

Sistem içerisinde kullanılan havalandırma mekanizması sayesinde atmosfer havası su altına iletilmekte, oluşan hava kabarcıkları ile oksijen transferi gerçekleştirilmektedir. Böylece sudaki çözünmüş oksijen miktarının artırılması hedeflenmektedir. Çözünmüş oksijen transferi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C)$$

Burada C sudaki mevcut çözünmüş oksijen konsantrasyonunu, C^* doymuş çözünmüş oksijen konsantrasyonunu ve $k_L a$ oksijen transfer katsayısını ifade etmektedir.

Sistem, belirlenen bölge üzerinde otonom hareket kabiliyeti sayesinde geniş alanlarda homojen oksijen dağılımı sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca sistemin enerji ihtiyacı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanarak sürdürülebilir bir çalışma modeli hedeflenmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Fiziksel Özellikler

Geliştirilen sistem, su yüzeyinde dengeli hareket sağlayabilmek amacıyla çift gövdeli katamaran yapısında tasarlanmıştır. Gövde yapısı hafif, modüler ve taşınabilir olacak şekilde modellenmiş olup 3D baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Sistem üzerinde güneş paneli, sensörler, elektronik kontrol birimleri ve havalandırma mekanizması entegre şekilde konumlandırılmıştır.

Enerji ihtiyacı güneş paneli ve Li-ion batarya sistemi ile karşılanmaktadır. Platform, su yüzeyinde düşük enerji tüketimi ile hareket edebilecek şekilde tasarlanmış olup geniş alanlarda görev yapabilecek yapıya sahiptir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, durgun su kütlelerinde meydana gelen çözünmüş oksijen yetersizliğinin giderilmesine yönelik güneş enerjisi destekli otonom bir yüzey havalandırma sistemi tasarlanmış ve prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistem sayesinde su yüzeyinde hareketli havalandırma sağlanarak su sirkülasyonu artırılmış ve çözünmüş oksijen seviyesinin iyileştirilmesine yönelik sürdürülebilir bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

Sistemde kullanılan güneş paneli, Li-ion batarya ve BMS tabanlı enerji yönetim yapısı sayesinde şebeke elektriğine ihtiyaç duyulmadan çalışabilen enerji verimli bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca LDR sensörü ile gerçekleştirilen gece odaklı otonom çalışma mantığı sayesinde sistemin, çözünmüş oksijen seviyesinin kritik seviyelere düştüğü zaman aralığında otomatik olarak devreye girmesi sağlanmıştır. Katamaran formundaki hareketli yapı ise oksijenin yalnızca belirli bir bölgede değil, daha geniş alanlara homojen biçimde dağıtılmasına katkı sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin yapay göletler, balık çiftlikleri, peyzaj alanları ve düşük sirkülasyonlu su kütlelerinde uygulanabilir çevreci bir çözüm potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte sistemin gelecekte çözünmüş oksijen sensörleri, kablosuz haberleşme

modülleri ve gelişmiş otonom kontrol algoritmaları ile desteklenmesi; daha yüksek verimlilik, uzaktan izleme ve akıllı su yönetimi uygulamalarına olanak sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] NTV Haber, “Tekirdağ'da gölette binlerce balık kıyıya vurdu (Oksijen yetersizliği),” NTV, 28 Ağustos 2023. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.ntv.com.tr>
- [2] Demirören Haber Ajansı (DHA), “Seyhan Nehri'nde su çekildi, yosun ve koku sorunu başladı,” DHA, 15 Eylül 2022. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.dha.com.tr>
- [3] Anadolu Ajansı (AA), “Kuraklık ve kirlilik göllerde oksijeni bitiriyor,” Anadolu Ajansı, 12 Temmuz 2021. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.aa.com.tr>
- [4] Tarım ve Orman Bakanlığı, “Durgun Sularda Özümlene Kapasitesinin Belirlenmesi ve Su Kalitesinin İyileştirilmesi Projesi,” T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2019.
- [5] Tinkercad, “Online Circuit Simulator and PCB Design Platform.” [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.tinkercad.com>
- [6] SolidWorks, “3D CAD Design Software.” [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.solidworks.com>
- [7] R. J. Diaz, R. Rosenberg, R., “Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems,” *Science*, vol. 321, (2008) no. 5891, pp. 926–929.



Afyonkarahisar'da Üretilen Top (Roll) Ekmeklerin Bazı Fiziksel Özellikleri

Cafer Medetoğlu^{1,*}, Ayşe Janseli Denizkara¹, Harun Dıraman²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği, Afyonkarahisar

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği, Afyonkarahisar

*Sorumlu yazar: cafermetoglu@outlook.com

Özet

Türk toplumunun günlük diyetinde çok önemli bir yere sahip olan ekmeğin, endüstriyel olarak günlük tüketim için çeşitli tiplerde üretilmektedir. Hazır yemek (catering) endüstrisi ile lokanta ve restoranlar tarafından ekmeğin israfını minimize etmek için top (roll) ekmeğin tercih edilmektedir. Bu çalışmada Afyonkarahisar'da top ekmeğin üretimi yapan dört farklı işletmeye ait örneklerin bazı fiziksel özelliklerinin değişim alt ay süresince izlenmiştir. Yapılan analizlere göre tüm örneklerde 6 ay süresince ekmeğin ağırlığı 48.5 -53.9 g ; ekmeğin hacmi 298.72 – 331.91 ml; ekmeğin yoğunluğu 0.14 -0.17 g/ml; ekmeğin yüksekliği 85.77-98.94 mm; ekmeğin çapı 41.84 – 57.15 mm ve ekmeğin içi gözenek çapı 3.04-6.78 mm arasında bir değişim belirlenmiştir. Ayrıca top ekmeğin örneklerinde güncel bir enstrümental teknik olan renk analiz bulgularındaki değişimler ise Chroma ve Hue açısı cinsinden hesaplanmıştır. Örneklerin ekmeğin dış kabuk üstü, dış kabuk altı ve ekmeğin içi yüzey renk değişimleri sırasıyla chroma (C*) cinsinden 9.440 -25.490 ; 20.080- 38.170 ve 7.86 0– 12.920 arasında bulunmuş olup, Hue açısı (h0) cinsinden ise sırasıyla 55.360- 70.310; 57.04 0– 74.090 ve 63.050 – 79.790 arasında bir değişim tespit edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi açısından yapılması zorunlu olan kuru madde değerleri değişimi de tüm ekmeğin örnekleri için % 67.66 -76.21 olmuştur. Araştırma bulguları resmi norm ve literatür bilgisi ışığında tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: top (roll ekmeğin), ağırlık, hacim, renk analizi, chroma, hue açısı

Some Physical Characteristics of Roll Breads Produced in Afyonkarahisar

Abstract

Bread, which holds a very important place in the daily diet of Turkish society, is produced industrially in various types for daily consumption. To minimize bread waste, the catering industry and restaurants prefer roll bread. In this study, changes in some physical properties of samples from four different businesses producing roll bread in Afyonkarahisar were monitored over a six-month period. According to the analyses, in all samples, a change was determined in bread weight between 48.5 and 53.9 g; bread volume between 298.72 and 331.91 ml; bread density between 0.14 and 0.17 g/ml; bread height between 85.77 and 98.94 mm; bread diameter between 41.84 and 57.15 mm; and bread internal pore diameter between 3.04 and 6.78 mm over the 6-month period. Furthermore, changes in color analysis findings, a current instrumental technique, were calculated in terms of Chroma and Hue angles (h0) in the roll

bread samples. The color changes on the outer crust, under crust, and inner surface of the bread samples were found to be between 9.440 - 25.490, 20.08 0-38.170, and 7.860-12.920, respectively, in terms of chroma, while the hue angle change was between 55.36 0-70.310, 57.040-74.090, and 63.050-79.790, respectively. The change in dry matter values, which is mandatory according to the Turkish Food Codex, was 67.66-76.21% for all bread samples. The research findings were discussed in light of official norms and literature information.

Keywords: roll bread, weight, volume, color analysis, chroma, hue angle

1. Giriş

Türk toplumunun günlük diyetinde çok önemli bir yere sahip olan ekmek, endüstriyel olarak günlük tüketim için çeşitli tiplerde üretilmektedir. Hazır yemek (catering) endüstrisi ile lokanta ve restoranlar tarafından ekmek israfını minimize etmek için top (roll) ekmek tercih edilmektedir. Ağırlığı 50 ila 100gr. arasında değişen ekmekler israfa karşı da önemli bir çözümdür. Özellikle de 50 gr. altındaki ekmekler tek seferde insan sağlığı için yeterli enerjiyi barındırır. Kepekli, tam buğday, buğday unundan yapılan roll ekmeklerin üzerine çavdar, çekirdek, susam gibi farklı aroma verici ve tatlandırıcılar kullanılabilir. Neden ‘Roll Ekmek’ tercih etmeliyiz? Kişiye özeldir, el değmeden hazırlanır, tazeliğini koruyan tekli ambalajındadır. Derin dondurucuya konulabilir, ekmek makinasında ısıtıldığında tat kaybı olmaz. En önemlisi ekmek israfını önler, neyi ne kadar yediğinizi bilir ve kalori miktarını denglersiniz. Özellikle ekmek israfının minimize etmesinden dolayı toplu beslenme uygulamalarında (kışlalar, hazır yemek fabrikaları, hastaneler vb) yaygın bir şekilde yıllardır roll ekmek tüketilmektedir [1].

Ekmeğin fiziksel görünümü onun tüketici tarafından satın alınması ve tüketilmesi kararı ile doğrudan ilgili olup, ekmeğin kalitesinin iyileştirmesi ve üretim sürecinin de standartlaştırılması açısından incelenmesi gereken önemli bir parametreleri oluşturmaktadır [2]. Bu nedenle, üretim parametrelerine bağlı olarak ekmek kabuğunun renginin gelişimini belirlemek, tahmin etmek ve kontrol etmek, ekmek yapım endüstrisinde hayati bir rol oynar [3,4,5].

Bu çalışmada Afyonkarahisar’da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde tüketici tercihleri üzerinde etkili olduğu bilinen bazı fiziksel özelliklerinin değişimi 6 (altı) ay süresince izlenmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Materyal

Ekmeğin Örneklerinin Sağlanması: Bu çalışmada Afyonkarahisar’da (merkez 3 ve 1 ilçe) hazır yemek firmaları için ambalajlı roll (top) ekmek üretimi yapan üretim yapan 4 farklı işletmeden 30 ar gün ara ile 6 ay süresince (Nisan, Mayıs, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında) roll (top) ekmek örnekleri sağlanmıştır. Ekmek üretiminde ülkemizde yaygın olarak kullanılan doğrudan fermentasyon yöntemi kullanılmıştır. Son ürün olan top ekmekler orijinal Polietilen ambalaj içerisinde ambalajlı tüketime sunulmaktadır. Top ekmekler daha çok hazır yemek firmalarına gönderilmektedir.

Ekmeğin Yapım Prosesi: Ekmek üretiminde un, tuz ve maya (endüstriyel ve bazen ek olarak ekşi maya da) kullanılmaktadır. I. yoğurma: Un ve su önce hamur haline dönüştürülmekte (8 dk), II. Yoğurma: Tuz ve maya ilavesi yapılmaktadır. (8 dk) [Toplam 16 -18 dk], I.ve II. Yoğurmada Kitle fermentasyonu tamamlanır. Teşkil olunan hamur kes-tart makinasında 65 -70 gram civarında tartılıp, şekil (roll) verilir. Metal tepsilere dizilip, 1.5 -2 saat ana fermentasyon odasında (38 °C de ve %78-80 nemde) bekletilir. 320 °C deki fırında 16 dk’da pişirilir. Bir saat oda sıcaklığında soğutulur. Soğuk roll ekmek 25 mikron kalınlığında 34 cm eninde, gerdirmiş PP (poli propilen) ambalaj ile ambalaj

makinasında paketlenir. Hamurun yapışmaması için kest tart makinasında yağ, pasalarda rol hamur parçalarının yapışmaması için de un kullanılır.

2.2. Metod

2.2.1. Ekmek Örneklerinde Fiziksel Analiz Yöntemleri

Ekmek ağırlığı (gramaj): Ekmek işletmesinden alınan ambalajlı roll ekmekler bekletilmeden – 1 saat içinde- laboratuvarı laboratuvar tipi terazi ile tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir [6].

Ekmek Hacmi (ml): Her bir rop (roll) ekmeğinin hacmi beyaz haşhaş tohumu ile yer değiştirme prensibine göre belirlenmiş olup, örneklerin hacmin belirlenmesinde 1.5 litrelik kap kullanılmıştır. Ekmek hacmi sonuçları (ml) cinsinden verilmiştir [6].

Ekmek Boyutu (Kumpas): Top (roll) ekmeğin dış yuvarlak kısmı yani yataydaki çapı ile yerden yüksekliği bir kumpas yardımıyla ölçülmüştür [6].

Gözenek Çapı (mm) Gözenek boyutu hamurun pişmesine bağlı olarak farklılık gösterebileceğinden ekmek örneklerinde bu parametre kumpas ile ölçülmüştür [6].

Renk Analizi: Roll ekmek örneklerinin renk analizi için Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı Laboratuvarına ait Konica Minolta marka renk tayin cihazı kullanılmıştır. Top (Roll) ekmeğin üst dış kabuk, alt dış kabuk ve iç yüzey ölçülmüştür. Cihazda ölçülen Hunter renk değerleri (L*, a*, b*) oluşan üçlü skala bulgularına dayalı olarak; top ekmek örneklerinde renk analiz bulguları renk yoğunluğunu/saflığını ifade eden Chroma (C) ve rengin tonunu ifade eden Hue açısı (h) cinsinden verilmiştir [7]. Roll ekmek örneklerinde C ve (h) değerleri a ve b verileri kullanılarak ilgili formüller yardımı ile excel paket programı ile hesaplanmıştır;

$$\text{Chroma} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\text{Hue (h)} = (180/3.141592654) * \text{Arc Tan (b*/a*)}$$

2.2.2 Kimyasal Analiz

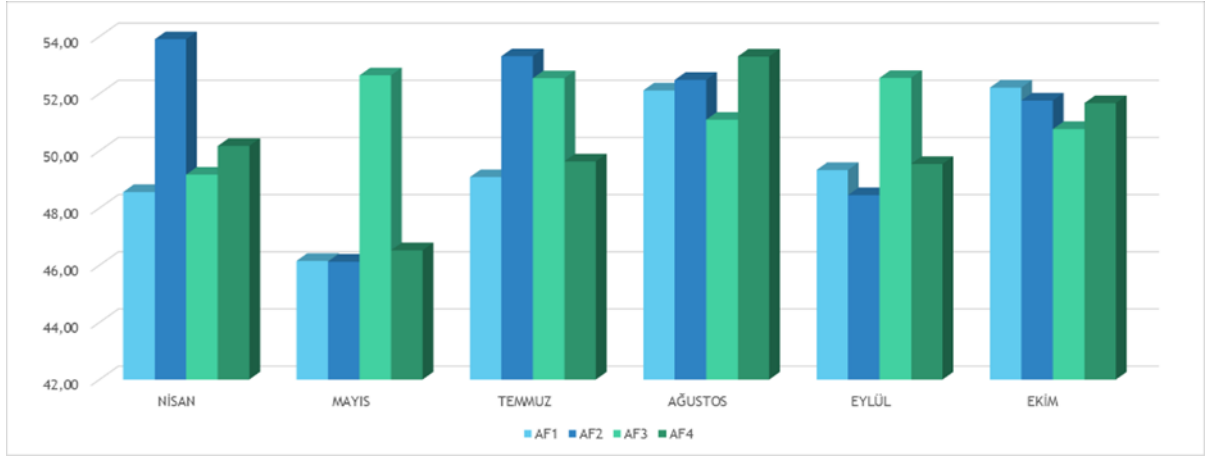
Nem Tayini: Top (Roll) ekmek örneklerinde nem miktarı tayini için ICC Standard No 110/1 ile TS-Ekmek standardı (TS-5000) verilen gravimetrik yöntem (105 °C’de sıcaklıktaki etüvde 4 saat kurutma) uygulanmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Fiziksel Bulgular

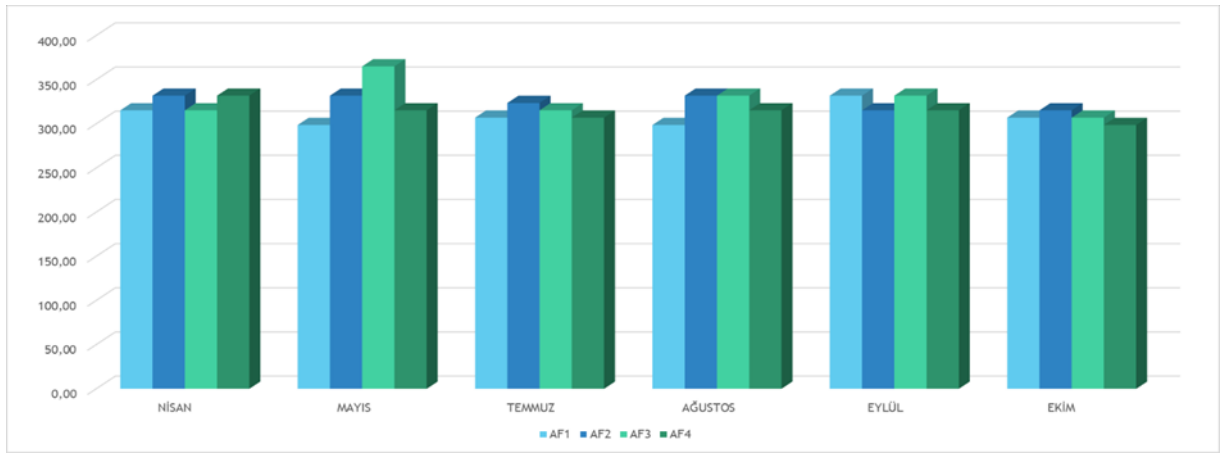
Afyonkarahisar’da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek ağırlığı 48.5 g ile 53.9 g arasında olmuştur (Şekil 1). Top (roll) ekmek ağırlığına ilişkin doğrudan resmi bir norm olmamasına karşın, TKG Ekmek tebliğinde [8] ekmek gramajının ellişer gram olarak arttırılabileceği hususu dikkate alındığında top ekmeği örneklerimizin ağırlıklarının bu açıdan uygun olduğu kabul edilebilir.

Afyonkarahisar’da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek ağırlığı 48.5 g ile 53.9 g arasında olmuştur (Şekil 1). Top (roll) ekmek ağırlığına ilişkin doğrudan resmi bir norm olmamasına karşın, TKG Ekmek tebliğinde ekmek gramajının ellişer gram olarak arttırılabileceği hususu dikkate alındığında top ekmeği örneklerimizin ağırlıklarının bu açıdan uygun olduğu kabul edilebilir.



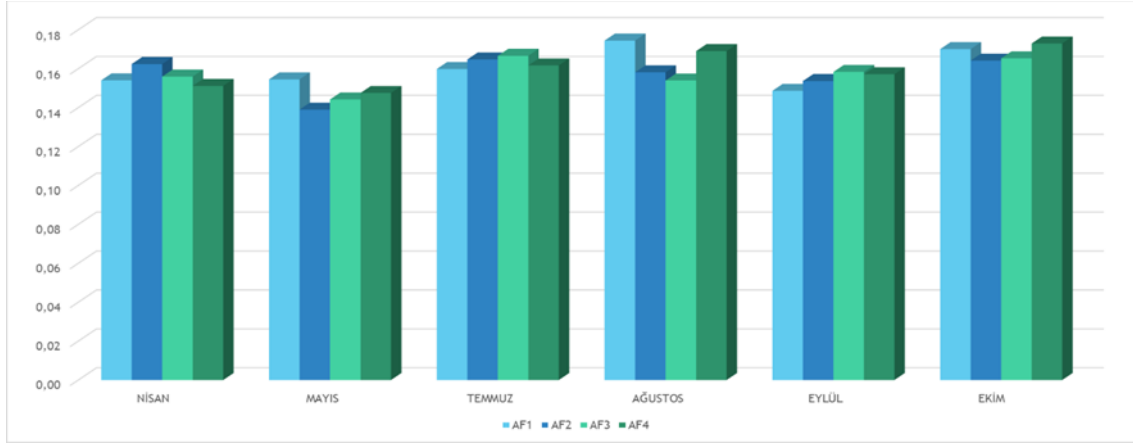
Şekil 1. Afyonkarahisar'da Üretilmiş Top Ekmeklerde Altı Ay Süresince Ekmek Ağırlığı Değişimleri (g)

Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek hacmi 298.72 – 331.91 cm³ / ml /cc arasında bulunmuştur (Şekil 2). Ekmekte hacim, ekmeğin ne kadar süngerimsi, gözenekli ve hafif olduğunu gösteren temel bir kalite kriteridir. Ekmek hacmi unun protein miktarından ve kalitesinden etkilenir. İyi bir ekmekte yüksek hacim istenir. Ekmek hacmi puanlaması doğrudan bu değere göre yapılır. Yüksek hacime sahip olan ekmek değeri, örneklerin daha hacimli, hafif, gözenekli ve iyi kabarmış olduğunu göstermektedir. Ancak düşük hacim ise ekmek örneklerinin sıkı, ağır ve basık (hacimsiz) olduğunu göstermektedir.



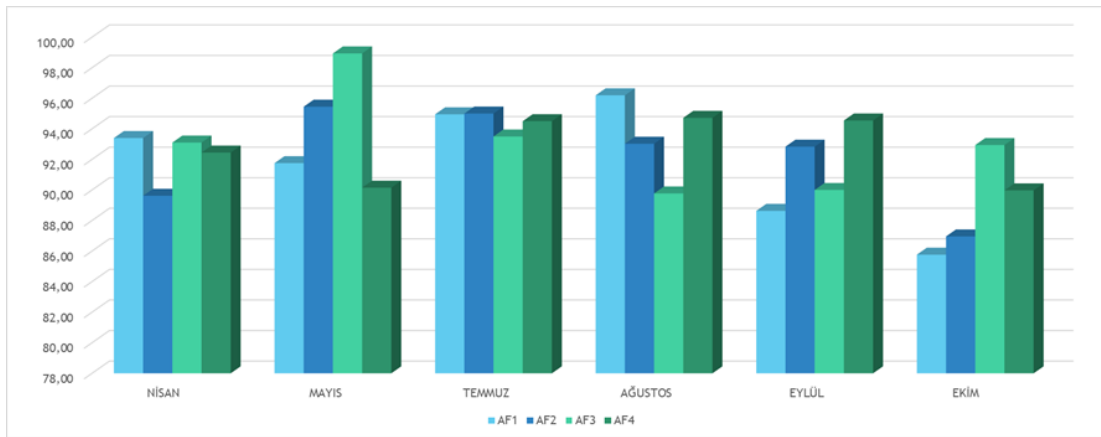
Şekil 2. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerde Altı Ay Süresince Ekmek Hacmi Değişimleri (ml)

Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümlere dayalı yapılan hesaplamalar ile ekmek yoğunluğu 0.14 -0.17 g/ml arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Ekmek yoğunluğu, ekmeğin hacmine göre ağırlığının (kütlesinin) ne kadar olduğunu ifade eden fiziksel bir özelliktir. Teknik olarak, ekmek hamurunun yoğrulma aşamasında kazandığı yapısal bütünlük, elastikiyet ve gözenek yapısının pişme sonrası aldığı nihai haldir. Tipik mayalı ekmeklerin yoğunluğu genellikle 0,22–0,29 g/cm³ (veya 290 kg/m³) civarındadır. Bu bakımdan çalışma örneklerimizin yoğunluk değerleri biraz düşüktür. Ekmek yoğunluğunu etkileyen faktörler yoğurma, kullanılan maya miktarı, hamurdaki su miktarı ve ekmeğin gözenek yapısı (özellikle iyi pişmiş bir ekmekte gözeneklerin homojen dağılması, ideal yoğunluğu sağlamaktadır) [6,9].



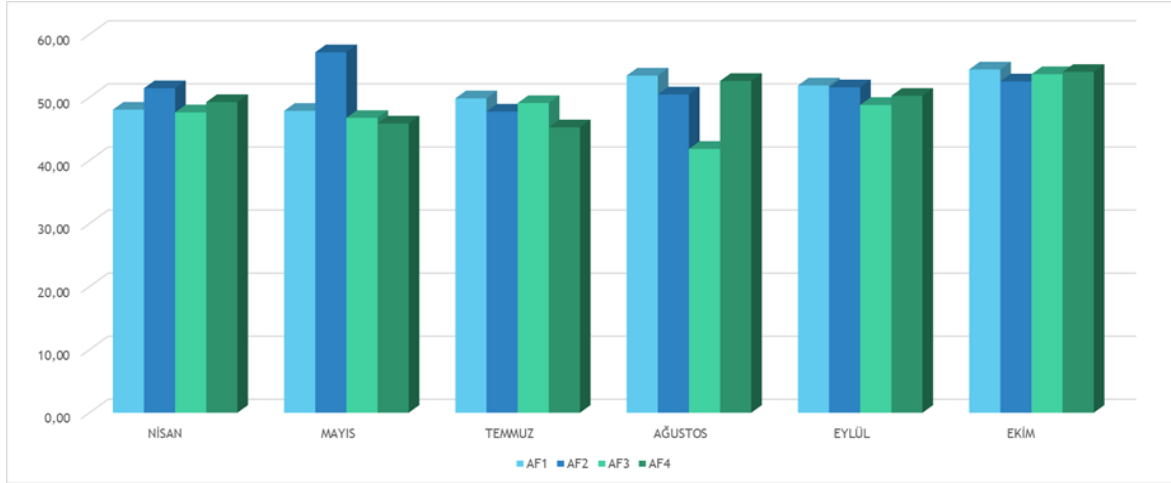
Şekil 3. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerde Altı Ay Süresince Ekmek Yoğunluğu Değişimleri (g/ml)

Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler sonucu ekmek yüksekliği değişimi 85.77-98.94 mm; arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 4).



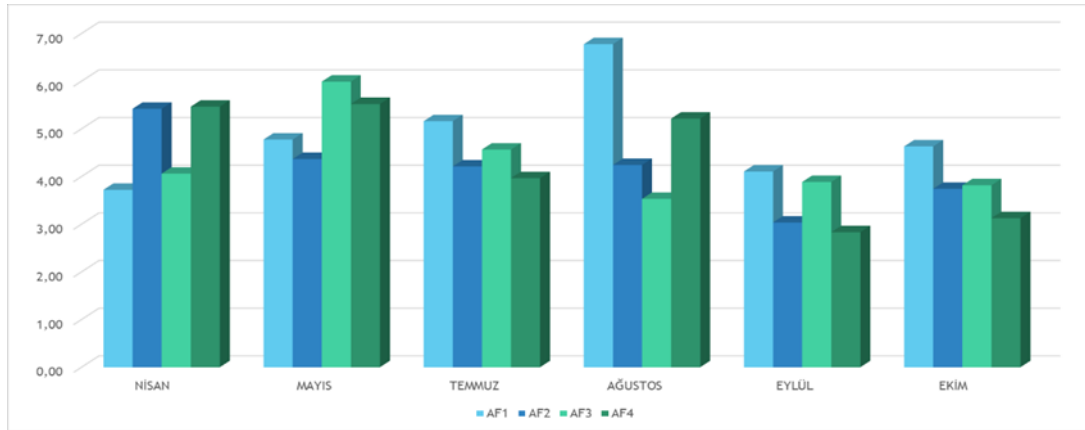
Şekil 4. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerde Altı Ay Süresince Ekmek Yüksekliği Değişimleri (mm)

Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek çapının 41.84 ile 57.15 mm arasında bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. (Şekil 5).



Şekil 5. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerde Altı Ay Süresince Ekmek Çapı Değişimleri (mm)

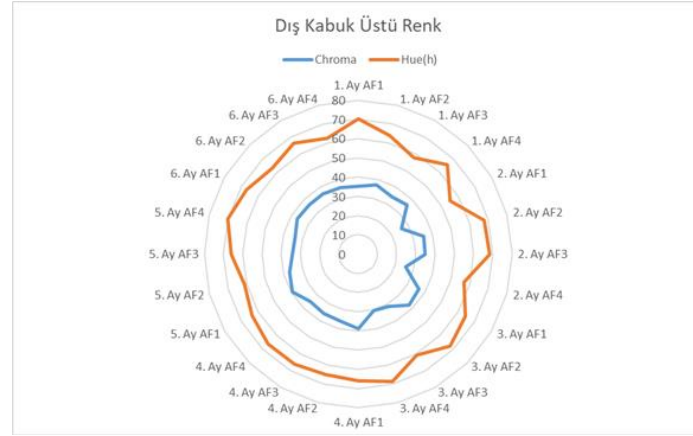
Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek içi gözenek çapının 3.04 ile 6.78 mm arasında bir değişim belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerde Altı Ay Süresince Ekmek İçi Gözenek Çapı Değişimleri (mm)

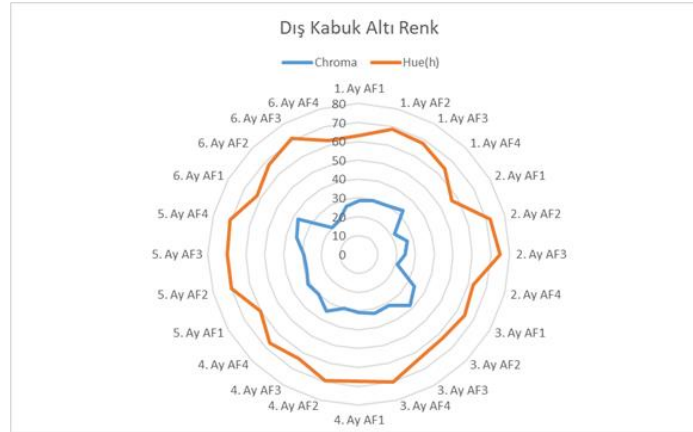
Ekmek örneklerindeki hacim ve boyut (yükseklik, ekmek çapı ve iç gözenek çapı) buğday unun sahip olduğu gluten (öz) proteinin en önemli fiziksel göstergesidir. Ekmek örneklerindeki hacim ve boyut (yükseklik, ekmek çapı ve iç gözenek çapı) arasındaki farklılıklar hammaddeye (özellikle unun içerdiği protein [yaş gluten miktarı/ gluten indeksi/ sedimentasyon düzeyi] ve kül miktarı) bağlı olarak üretim (özellikle fermentasyon) şartlarındaki (sıcaklık, kullanılan tuz ve su, ortam pH'sı) bazı değişimlerden kaynaklanmış olması kuvvetle muhtemeldir [9]. İyi bir ekmekte gözenekler küçük, homojen, kenarları ince ve aynı kalınlıkta olması gerektiği bildirilmiştir [6].

Araştırmada kullanılan top (roll) ekmek örneklerindeki ekmek dış kabuk üstü renk değişimleri chorma cinsinden 25.490 – 39.440 (Altın Sarısı / Sarımsı Turuncu) arasında olup, Hue açısı (h) cinsinden ise sırasıyla 55.360- 70.310 (Koyu Kızıl Kahve / Yanığa Yakın) değişim tespit edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerin Dış Kabuk Üstü İçin Altı Ay Süresince Enstrümental Olarak Ölçülen Renk Değerleri Değişimleri (Chroma ve Hue açısı)

Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek dış kabuk altı renk değişimleri sırasıyla chroma cinsinden; 20.080- 38.170 (Altın Sarısı / Sarımsı Turuncu) arasında bulunmuş olup, aynı top ekmek örnekleri için Hue açısı (h) cinsinden ise 57.040–74.900 (Karakteristik Kahverengi) arasında bir değişim tespit edilmiştir (Şekil 8).



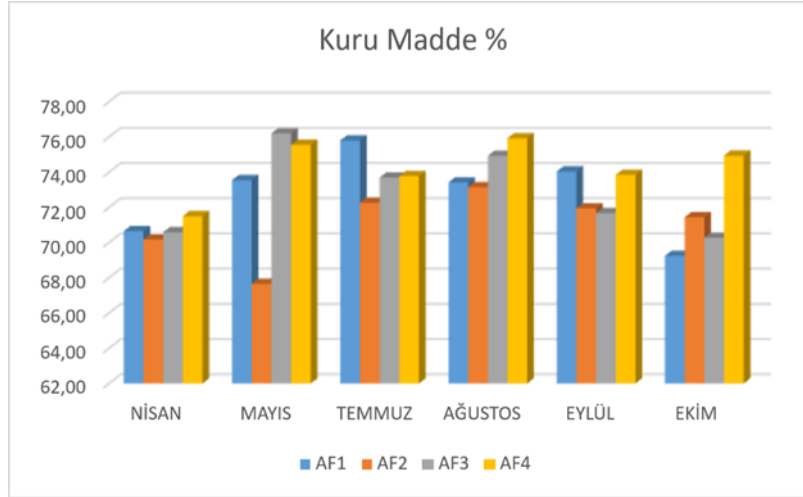
Şekil 8. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerin Dış Kabuk Altı İçin Altı Ay Süresince Enstrümental Olarak Ölçülen Renk Değerleri Değişimleri (Chroma ve Hue açısı)

Afyonkarahisar'da top (roll) ekmek üretimi yapan dört farklı işletmeye ait ekmek örneklerinde 6 ay süresince yapılan ölçümler ile ekmek içi yüzey renk değişimleri sırasıyla chroma cinsinden 7.860 – 12.920 (Kremsi Beyaz / Soluk Sarı) arasında bulunmuş olup, aynı örneklerde Hue açısı (h0) cinsinden ise 63.050 – 79.790 (Karakteristik Kahverengi) arasında bir değişim tespit edilmiştir (Şekil 9).

3.2. Kimyasal Bulgular

3.2.1 Top Ekmek Örneklerinde Kuru Madde Miktarı

Türk Gıda Kodeksi açısından yapılması zorunlu olan kuru madde değerleri değişimi de tüm top (roll) ekmek örnekleri için % 67.66 ile % 76.21 arasında bir değişim göstermiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Afyonkarahisarda Üretilmiş Top Ekmeklerin Altı Ay Süresince Kuru Madde Miktarı Değişimleri (%)

Ekmekğin kuru maddesi onun sahip olduğu temel kimyasal bileşenler olan; karbonhidrat (nişasta, toplam protein ve mineral madde (Tuz ve diğer mineraller) miktarları hakkında en sağlam ve doğru bilgi kaynağıdır. Top (roll) ekmek nem veya kuru madde miktarına ilişkin doğrudan resmi bir norm olmamasına karşın, TKG Ekmek tebliğinde [8] ekmekler için maksimum nem miktarının % 38 diğer bir ifade ile de minimum %62 Kuru Madde içermesi gerektiği bildirilmiştir. Bu husus dikkate alındığında top ekmeği örneklerimizin Kuru madde miktarlarının TKG Ekmek Tebliğine uygun olduğu görülmektedir. Ekmek örneklerindeki kuru madde miktarları arasındaki farklılıklar özellikle üretim (özellikle pişirme) şartlarındaki (sıcaklık) bazı değişimlerden kaynaklanmış olması kuvvetle muhtemeldir [9].

4. Sonuç

Ekmek israfı yıllardan beri ülkemizde güncel bir konudur. Top (Roll) ekmek üretimi bunun azaltılmasında en önemli uygulamalardan biridir. Top ekmek üzerine yapılmış bilimsel çalışmaların azlığı ve yetersizliği dikkate alındığında; top ekmekler için diğer kimyasal ve mikrobiyolojik kriterleri de kapsayacak şekilde konunun geniş bir şekilde ele alınması ile gıda güvenliği kapsamında ülkemizde ekmek sektörünün gelişmesi ve tüketicilere sağlıklı ve tercihi kalitesi yüksek güvenilir bir ürün sağlanması hususunda faydalar sağlayacağı kuşkusuzdur.

5. Kaynaklar

- [1] Ö. Kalkışım, M. Özdemir, O. Bayram, Ekmek Yapım Teknolojisi. Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, (2012) Gümüşhane.
- [2] E. Purlis, Browning development in bakery products – A review, Journal of Food Engineering, 99 (2010) 3:239-249, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.008>.

- [3] U. Gonzales-Barron, F. Butler, Discrimination of crumb grain visual appearance of organic and nonorganic bread loaves by image texture analysis. *Journal of Food Engineering*, 84 (2008) 3: 480-488. [10.1016/j.jfoodeng.2007.06.016](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.016).
- [4] P. B. Pathare, U. L. Opara, F. A. J. Al-Said, Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food Bioprocess Technol* 6 (2013) 36–60 <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>.
- [5] J. Lukinac, D. K. Komlenić, M. L. Čolić, G. Nakov, M. Jukić, Modelling the browning of bakery products during baking: a review. *Ukrainian Food Journal*, 11(2) (2022) 217- 234. DOI:10.24263/2304-974X-2022-11-2-3.
- [6] A. Elgün, Z. Ertugay, M. Certel, H. G. Kotancılar, Tahıl ve Ürünlerinde Analitik Kalite Kontrolü Laboratuar Uygulama Kılavuzu. Atatürk Üniversitesi Yayın No. 867, (2002) ss 245, Erzurum.
- [7] E. Yılmaz, M. Ögütçü, The texture, sensory properties and stability of cookies prepared with wax oleogels. *Food & Function*, 6(4) (2015) 1194-1204. <https://doi.org/10.1039/c5fo00019j>.
- [8] Anonymous, Türk Gıda Kodeksi, Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği (2012/2). Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, 4 Ocak 2012 tarih ve 28163 sayılı Resmi Gazete, Ankara.
- [9] E. J. Pyler, *Baking Science and Technology*, Sosland Publishing Company. (1988). USA.
- [10] E. Demiray, İ. Çelik O. Nogay Y. Tülek, Denizli Karahöyük Ekmeği Zığır'ın Renk ve Tekstürel Özellikleri *Akademik Gıda* 13 (3) (2015) 223 – 228.
- [11] B. Zanoni, C. Peri, D. Bruno, Modelling of browning kinetics of bread crust during baking, *LWT Food Science and Technology*, 28, (1995) 604–609.
- [12] Y. M. Mohd Jusoh, N. L. Chin, Y. A. Yusof, R. Abd. Rahman, R, Bread Crust Thickness Estimation Using L a b Colour System. *Pertanika J. Sci. & Technol.* 16 (2) (2008) 239 – 247.
- [13] Y. M. Mohd Jusoh N.L. Chin Y. A. Yusof, R. Rahman, Bread crust thickness measurement using digital imaging and L a b colour system. *Journal of Food Engineering* 94 (3–4) (2009) 366-371. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.04.002.
- [14] M. L. G. Monteiro, E. T. Mársico, M. S. Soares Junior, M. Caliarı, C. A. Conte-Junior, Physicochemical stability of bread fortified with tilapia-waste flour. *CyTA Journal of Food*, 17(1) (2019) 36–43. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1547793>.



Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin (Real Time Precise Point Positioning-RT-PPP) Doğruluğunun Araştırılması

Salih Kırılı^{1*}, İbrahim Tiryakioğlu², Zafer Köse³, Mehmet Ali Uğur⁴

^{1*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği A.B.D., salihkrl32@gmail.com

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, itiryakioğlu@aku.edu.tr

³Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Gölhisar Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, zafer38kose@gmail.com

⁴Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, maliugur@aku.edu.tr

Özet

Günümüzde GNSS tabanlı konumlama uygulamalarında yüksek doğrulukla birlikte hızlı sonuç elde edilmesi temel gereksinimlerden biri haline gelmiştir. Klasik yüksek hassasiyetli konumlama yöntemleri olan RTK (Real-Time Kinematic) ve Ağ-RTK teknikleri santimetre seviyesinde doğruluk sağlayabilmekle birlikte, bu sistemler iki veya daha fazla GNSS alıcısına ihtiyaç duymakta ve veri iletişimi için GSM veya radyo modem altyapısına bağımlı olarak çalışmaktadır. Son yıllarda geliştirilen uydu tabanlı düzeltme servisleri sayesinde, Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP, Real-Time Precise Point Positioning) tekniği, yalnızca tek bir GNSS alıcısı kullanılarak küresel ölçekte santimetre seviyesinde konum doğruluğu sağlama potansiyeli sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, gerçek zamanlı GNSS konumlama tekniklerinden biri olan RT-PPP yöntemi doğruluk ve yakınsama süresi açısından değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, Isparta-Burdur bölgesinde oluşturulan test ağı üzerinde RT-PPP ölçüleri gerçekleştirilmiştir. RT-PPP kullanılarak elde edilen koordinatlar, statik GNSS ölçüleri ile elde edilen koordinatlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, RT-PPP yöntemi ile belirlenen koordinatların statik GNSS ölçülerinden elde edilen koordinatlara göre yaklaşık 5–6 cm farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Genel değerlendirmede, RT-PPP yönteminin doğruluk açısından Ağ-RTK yöntemine yakın ve güvenilir sonuçlar üretebildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, yakınsama süresi bakımından RTK ve Ağ-RTK gibi diğer gerçek zamanlı konumlama yöntemlerine kıyasla daha yavaş bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: GNSS, PPP, Ağ-RTK, SBAS

Investigation of the Accuracy of the Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) Technique

Abstract

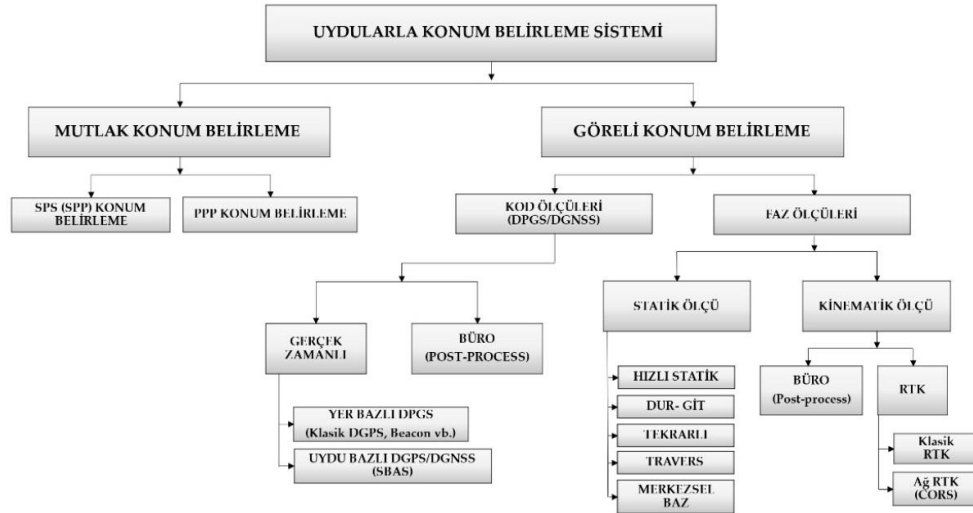
Today, obtaining rapid results together with high accuracy has become a fundamental requirement in GNSS-based positioning applications. Although RTK (Real-Time Kinematic) and Network RTK, which are

classical high-precision positioning techniques, can provide centimetre-level accuracy, these systems require two or more GNSS receivers and depend on GSM or radio-modem infrastructure for In this study, RT-PPP, one of the real-time GNSS positioning techniques, was evaluated in terms of positioning accuracy and convergence time. RT-PPP observations were conducted on a test network established in the Isparta–Burdur region. At a total of 10 pillar points, coordinates obtained using a multi-GNSS receiver were compared with those derived from static GNSS observations. The results indicate that the coordinates determined by RT-PPP differ from those obtained by static GNSS observations by approximately 5–6 cm. Overall, RT-PPP was found to produce reliable results with an accuracy comparable to that of the Network RTK method. However, in terms of convergence time, it showed slower performance than other real-time positioning methods such as RTK and Network RTK.

Keywords: GNSS, PPP, Network-RTK, SBAS

1. Giriş

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) ile gerçekleştirilen konum belirleme yöntemleri, temel olarak kullanılan alıcı sayısı, ölçü stratejisi ve gözlemlerin değerlendirilme biçimine bağlı olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır: Mutlak Konum Belirleme ve Görelî Konum Belirleme yöntemleri. Mutlak konum belirleme yöntemlerinde tek bir GNSS alıcısı kullanılarak, uydu yörünge ve saat bilgileri yardımıyla doğrudan nokta koordinatları elde edilmektedir [1]. Bu yaklaşımın en gelişmiş uygulamalarından biri olan Hassas Nokta Konumlama (PPP) ve gerçek zamanlı versiyonu olan RT-PPP teknikleri, harici bir referans istasyonuna ihtiyaç duymadan küresel ölçekte yüksek doğruluklu konum üretme potansiyeli sunmaktadır (Şekil 1).



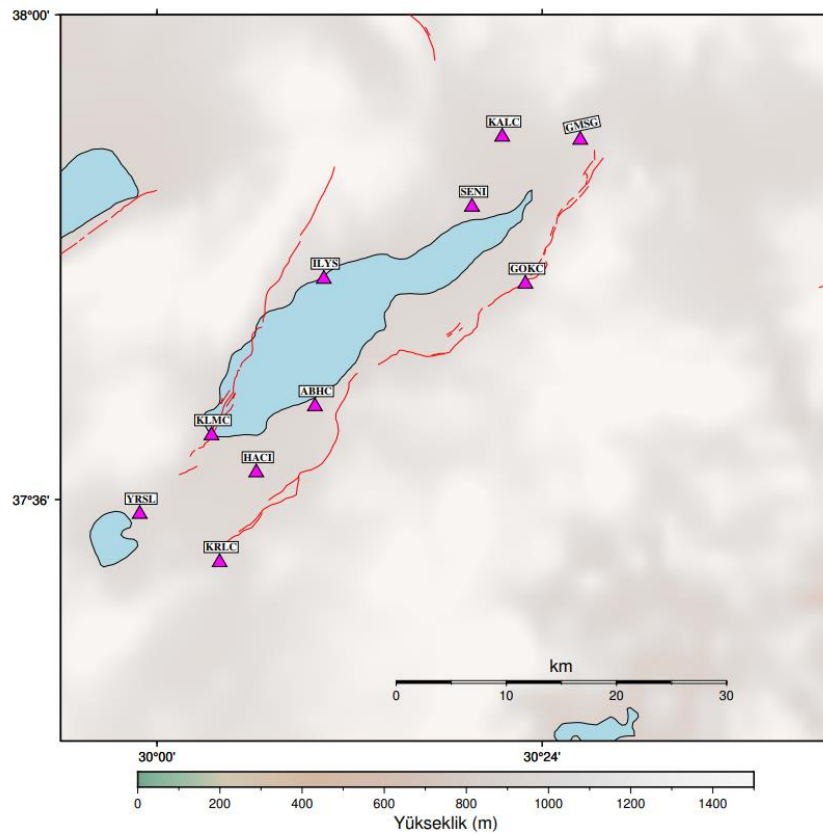
Şekil 1. Konum belirleme yöntemleri [2].

Görelî konum belirleme yöntemlerinde ise iki veya daha fazla GNSS alıcısından elde edilen eş zamanlı gözlemler birlikte değerlendirilmekte ve koordinatlar referans istasyonlarına göre hesaplanmaktadır. Statik GNSS, Hızlı Statik, RTK ve Ağ RTK (CORS) yöntemleri bu grupta yer almakta olup, özellikle kısa ve orta baz uzunluklarında santimetre seviyesinde doğruluk sağlamaktadır [2]. Ancak bu yöntemler, sabit referans istasyonlarına, veri iletişim altyapısına ve çoğu zaman GSM/radyo modem bağlantılarına bağımlı çalışmaktadır. Son yıllarda uydu tabanlı düzeltme servislerinin gelişmesiyle birlikte RT-PPP yöntemi, tek alıcı ile gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukla konum belirleme imkânı sunarak klasik görelî yöntemlere önemli bir alternatif hâline gelmiştir. Bu yönüyle RT-PPP, özellikle altyapı bağımlılığının sınırlı olduğu geniş alan uygulamaları, afet yönetimi, hassas navigasyon ve mühendislik ölçmeleri açısından dikkat çekici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [3].

Bu çalışma kapsamında, Burdur ili ve çevresinde kurulan GNSS ağında gerçekleştirilen statik GNSS, Ağ RTK ve RT-PPP ölçü yöntemlerinden elde edilen koordinat sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, RT-PPP yönteminin doğruluk, uygulanabilirlik ve operasyonel performans açısından değerlendirilerek ülkemizde mühendislik ölçmeleri ve haritacılık uygulamalarında kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda farklı konum belirleme tekniklerinden elde edilen sonuçlar ortak bir referans sisteminde analiz edilmiş ve yöntemler arasındaki doğruluk farklılıkları istatistiksel olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında Burdur ili ve çevresinde oluşturulan GNSS ağında statik GNSS, Ağ RTK (CORS-TR) ve RT-PPP ölçüleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen koordinat sonuçları karşılaştırılmak amacıyla toplam 10 adet pilye noktasından oluşan bir GNSS ağı kurulmuştur (Şekil 2).



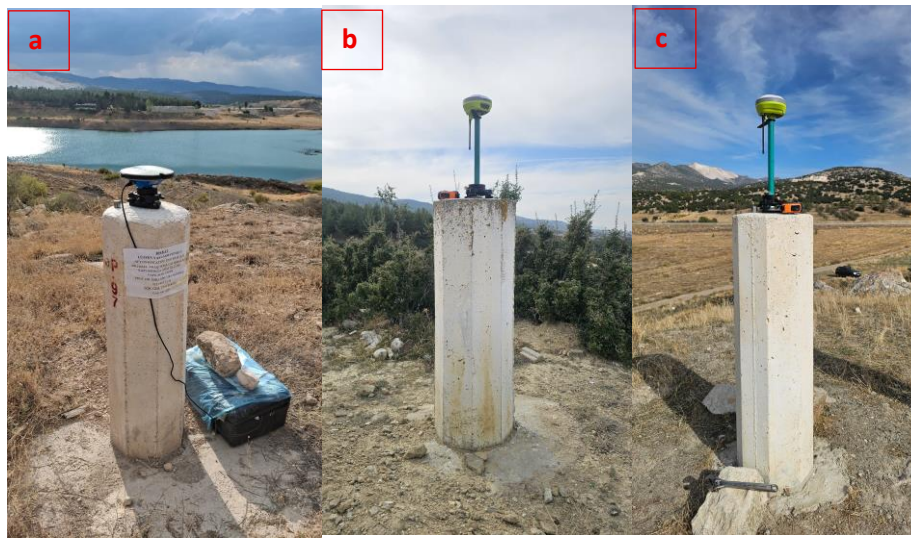
Şekil 2. Kurulan GNSS Ağı

Ağda önce Statik GNSS ölçüleri yapılmıştır. Ölçülerde ASTECH-THALES marka çift frekanslı GNSS alıcıları kullanılmıştır. Ölçüler, 15 saniye veri kayıt aralığında, 5° uydu yükseklik açısı ile gerçekleştirilmiştir. Her noktada iki gün tekrarlı olacak şekilde ve günlük en az 8 saat gözlem yapılmıştır (Şekil 3-a). Elde edilen statik GNSS verileri, GAMIT/GLOBK yazılımında değerlendirilmiş ve koordinatlar ITRF2014 datumunda ölçü epoğunda hesaplanmıştır [4].

Ağ RTK ölçülerinde TERSUS GNSS alıcıları kullanılmış ve ölçüler TUSAGA-Aktif (CORS-TR) düzeltme servisleri üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 3-b) [5-6]. Ölçü sırasında RTCM veri akışı alınmış ve VRS (Virtual Reference Station) modeli kullanılarak gerçek zamanlı konum çözümü elde edilmiştir. Her noktada 1 saniye aralıkla toplam 100 epok gözlem yapılmış ve elde edilen koordinatların ortalama değerleri değerlendirmelerde kullanılmıştır. Ağ RTK ölçüleri doğrudan ITRF96 datumunda ve 2005.0 epoğunda elde edilmiştir. RT-PPP ölçülerinde yine TERSUS GNSS alıcıları kullanılmıştır.

Ölçüler sırasında PPP-RTK altyapısından yararlanılmış ve uydu tabanlı düzeltmeler ile hassas yörünge-saat bilgileri gerçek zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Ölçü yöntemi değiştirilirken cihaz yerinden oynatılmamış ve aynı nokta üzerinde ölçü alınmasına dikkat edilmiştir. Her noktada 1 saniyelik veri aralığında toplam 100 epok gözlem yapılmış, elde edilen koordinatların ortalama değerleri kullanılmıştır. PPP çözümleri ITRF2020 datumunda ve ölçü epoğunda elde edilmiştir (Şekil 3-c).

Farklı yöntemlerden elde edilen koordinatların karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm veriler ortak bir referans sistemine dönüştürülmüştür. Çalışmada ortak datum ve epok olarak ITRF96 datumunda 2005.0 epogu tercih edilmiştir. Statik GNSS ve PPP verileri için önce koordinat dönüşümleri gerçekleştirilmiş, ardından epok kaydırma işlemleri uygulanmıştır. Koordinat dönüşümlerinde TUREF hız alanı kullanılarak noktalara ait hız değerleri elde edilmiş, coğrafi koordinatlar kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmüş ve ITRF dönüşümleri "ITRF Koordinat Dönüşüm ve Epok Kaydırma" yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [7].



Şekil 3. GNSS Ağında yapılan a) statik, b) Ağ RTK ve c) RT-PPP ölçüleri

Son aşamada statik GNSS ölçülerinden elde edilen koordinatlar referans kabul edilerek Ağ RTK ve RT-PPP çözümleri ile arasındaki farklar X, Y ve Z bileşenlerinde analiz edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, Isparta-Burdur bölgesinde oluşturulan GNSS test ağı üzerinde gerçekleştirilen ölçüler kullanılarak Statik GNSS, Ağ-RTK ve Kinematik PPP yöntemlerinin doğruluk ve uygulama performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, statik GNSS ölçülerinden elde edilen koordinatlar referans kabul edilerek diğer gerçek zamanlı konumlama tekniklerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

Statik ölçüler, IGS-F hassas yörünge ürünleri kullanılarak değerlendirildiğinden kesin koordinatlar ölçü gününden yaklaşık 21 gün sonra elde edilmiştir. Buna karşın, Ağ-RTK yönteminde TUSAGA-Aktif sistemine bağlantı sağlandıktan sonra yaklaşık 5-10 saniye içerisinde konum çözümü elde edilirken, Kinematik PPP yönteminde düzeltme uydularına bağlanması ve çözümün yakınsaması için yaklaşık 5-7 dakikalık bir süre gerektiği belirlenmiştir.

Statik ölçüler ile karşılaştırıldığında, Ağ-RTK yönteminde X, Y ve Z bileşenlerinde 8-10 santimetre düzeyinde koordinat farkları gözlenmiştir. Özellikle düşey bileşende meydana gelen farkların yatay bileşenlere göre daha büyük olduğu ve bu durumun atmosferik etkiler ile GNSS sinyal hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Kinematik PPP yöntemi ile statik ölçüler arasındaki karşılaştırmada ise koordinat farklarının daha düzenli dağılım gösterdiği ve çoğu noktada 5-6 santimetre seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Hassas yörünge ve uydu saat düzeltmelerinin kullanılması sayesinde PPP yönteminin yüksek doğruluk üretebildiği görülmüştür. Ancak bazı noktalarda ortaya çıkan yatay koordinat farklarının, uydu geometrisi, gözlem süresi ve çözümün yakınsama sürecine bağlı olarak değişebileceği değerlendirilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Kinematik PPP yönteminin özellikle tek alıcı ile çalışabilmesi ve ek bir referans istasyonuna ihtiyaç duymaması nedeniyle önemli avantajlar sunduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, çözüm yakınsama süresinin uzun olması yöntemin temel sınırlayıcı unsuru olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulgular, RT-PPP yönteminin uygun gözlem koşulları altında santimetre seviyesinde güvenilir sonuçlar üretebildiğini ve gelecekte gerçek zamanlı hassas konumlama uygulamalarında önemli bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] M. Kahveci, Kinematik GNSS ve RTK CORS ağları (2. bs.). (2009) Zerpa Turizm Yayıncılık.
- [2] M. Kahveci, F. Yıldız, GPS/GNSS: uydularla konum belirleme sistemleri: teori ve uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık. (2009).
- [3] İ. Demirel, Statik GNSS, Ağ-RTK, PPP, PPP-RTK ve SBAS yöntemlerinin ve bunlardan elde edilen koordinat doğruluklarının karşılaştırılması (Tez No. 947178), Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi, (2025).
- [4] T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky, Introduction To Gamit/Globk. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, (2010) 400, 401.
- [5] URL 1: <https://ataymuhendislik.com/urun/tersus-oscar-tap-ultimate-gnss-alicisi/>
- [6] URL 2: <https://www.tusaga-aktif.gov.tr/>
- [7] URL 3: <https://www.harita.gov.tr/temel-jeodezik-hesaplamalar>



Sanal Gerçeklik ve Sensör Tabanlı Teknolojiler ile Bilişsel Gelişimi Destekleyen Adaptif Bir Platform Geliştirilmesi

Aslıhan Şahan³, Uğur Fidan², Yüksel Oğuz^{1*}

^{1*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, aslihansehan00@gmail.com

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği, ufidan@aku.edu.tr

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, yukseloguz@aku.edu.tr

Özet

Bilişsel gelişimi desteklemeye yönelik mevcut dijital yaklaşımlar çoğunlukla kullanıcıyı edilgen bir konumda bırakmakta ve bilişsel süreçlerin motor sistem ile olan bütünleşik yapısını yeterince dikkate almamaktadır. Bu çalışmanın amacı, sanal gerçeklik (VR) ve gömülü sensör teknolojilerini kullanarak bilişsel gelişimi destekleyen adaptif bir donanım-yazılım platformu tasarlamak ve sistemin kognitif etkilerini nicel olarak değerlendirmektir. Geliştirilen sistemde; postüral denge analizi için yük hücreli statik bir platform ve gövde yönelimini takip eden ivmeölçer tabanlı dinamik bir platform tasarlanmıştır. ESP32 mikrodenetleyicisi ile elde edilen veriler, kablosuz olarak Unity oyun motoruna aktarılmış ve kullanıcı hareketleri VR ortamındaki bilişsel oyun tasarımlarıyla "çift görev" (dual-task) paradigması altında entegre edilmiştir. Sistemin adaptif yapısı, kullanıcı performansına dayalı kademeli oyun seviyesi geçişlerine dayanmaktadır. Geliştirilen platformun kognitif esneklik ve enterferans yönetimi üzerindeki etkisini doğrulamak amacıyla n=30 katılımcı üzerinde Stroop Testi uygulanmıştır. Ön test ve son test verilerine uygulanan Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi analizleri sonucunda; katılımcıların tamamında (%100) reaksiyon tamamlama sürelerinin azaldığı ve her üç test aşamasında istatistiksel açıdan yüksek düzeyde anlamlı gelişim sağlandığı p=0,000) tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, fiziksel hareket ve sanal gerçeklik ortamının entegre edildiği bu sistemin, geleneksel pasif yöntemlere kıyasla bireysel performans farklarını minimize ederek homojen bir kognitif ivmelenme sağladığını kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Sanal Gerçeklik, Bilişsel Gelişim, Sensör Tabanlı Sistemler, Adaptif Öğrenme, Oyunlaştırma

Development of an Adaptive Platform Supporting Cognitive Development Using Virtual Reality and Sensor-Based Technologies

Abstract

Current digital approaches aimed at supporting cognitive development often keep the user in a passive role and do not sufficiently consider the integrated nature of cognitive processes with the motor system. The aim of this study is to design an adaptive hardware-software platform that supports cognitive

development using virtual reality (VR) and embedded sensor technologies, while providing real-time feedback and quantitatively evaluating its cognitive effects. In the proposed system, two distinct physical platforms were designed according to different measurement objectives: a static platform performs postural balance analysis using strain gauge-based load cells, whereas a dynamic platform tracks trunk orientation and motion dynamics using a three-axis accelerometer. Sensor data from both platforms are transmitted in real time to the Unity game engine via an ESP32 microcontroller using wireless communication, integrating user movements with cognitive game designs under a dual-task paradigm. The adaptive architecture of the system relies on performance-based progressive game level transitions. To validate the impact of the developed platform on cognitive flexibility and interference management, the Stroop Test was administered to a sample group of $n=30$ healthy participants. As a result of the Wilcoxon Signed-Ranks Test analysis applied to pre-test and post-test data, reaction completion times decreased for 100% of the participants, and a statistically highly significant improvement ($p=0.000$) was observed across all three test stages. The findings demonstrate that this embodied cognition model, which integrates physical movement data and the virtual reality environment, minimizes individual performance differences and provides a homogenous cognitive acceleration compared to traditional passive methods.

Keywords: Virtual Reality, Cognitive Development, Sensor-Based Systems, Adaptive Learning, Gamification

1. Giriş

Teknolojik gelişmeler, sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) teknolojilerinin duyuşsal, bilişsel ve motor süreçleri eş zamanlı aktive eden etkileşimli ortamlar sunmasını sağlamıştır. Dikkat, çalışma belleği ve yürütücü işlevleri kapsayan bilişsel gelişim, bireyin çevresiyle kurduğu etkileşim ve anlık duyuşsal geri bildirimlerle şekillenmektedir. Piaget ve Vygotsky'nin yapılandırmacı yaklaşımları, öğrenmenin aktif keşif ve uyarlanabilir süreçler içerisinde gerçekleştiğini savunmaktadır. Geleneksel pasif eğitim ve ölçüm yöntemlerinin aksine VR tabanlı uygulamalar; aktif katılımı teşvik etmekte, anlık geri bildirim mekanizmaları kurmakta ve kullanıcının performansına göre uyarlanabilir içerikler sunarak kognitif süreçleri daha yoğun uyarabilmektedir.

Modern nörobilim çalışmaları da yürütücü işlevlerden sorumlu ön alın bölgesi (prefrontal korteks) ile motor sistemlerin entegre çalıştığını göstermektedir. Bu bütünleşik yapı, bireyin aynı anda hem bilişsel hem de motor bir görevi yerine getirdiği "çift görev (dual-task)" paradigmlarında belirginleşmektedir. Literatürdeki mevcut çalışmaların önemli bir kısmı yalnızca yazılım tabanlı uygulamalara odaklanmakta, fiziksel veri toplama sistemleri ile bilişsel performansın bütüncül değerlendirilmesi sınırlı kalmaktadır. Özellikle denge, postür ve hareket verileri ile bilişsel performans arasındaki ilişkinin gerçek zamanlı olarak analiz edilmesine yönelik mühendislik temelli sistemlerin sayısı oldukça azdır.

Bu çalışmada, sanal gerçeklik teknolojileri kullanılarak geliştirilen oyun tabanlı uygulamalar aracılığıyla bireylerin bilişsel gelişimini destekleyen bütünleşik bir sistem tasarlanması amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında, ölçüm parametrelerinin doğasına uygun olarak iki farklı fiziksel platform geliştirilmiştir: Yük sensörleri ile denge ve postür verilerinin toplandığı statik platform ile ivme sensörleri aracılığıyla hareket ve hız verilerinin elde edildiği dinamik platform. Toplanan veriler mikrodenetleyici sistemler aracılığıyla işlenmekte ve Unity oyun motoru kullanılarak geliştirilen VR ortamına gerçek zamanlı olarak aktararak kognitif oyunlarla entegre edilmektedir.

2. Materyal ve Metot

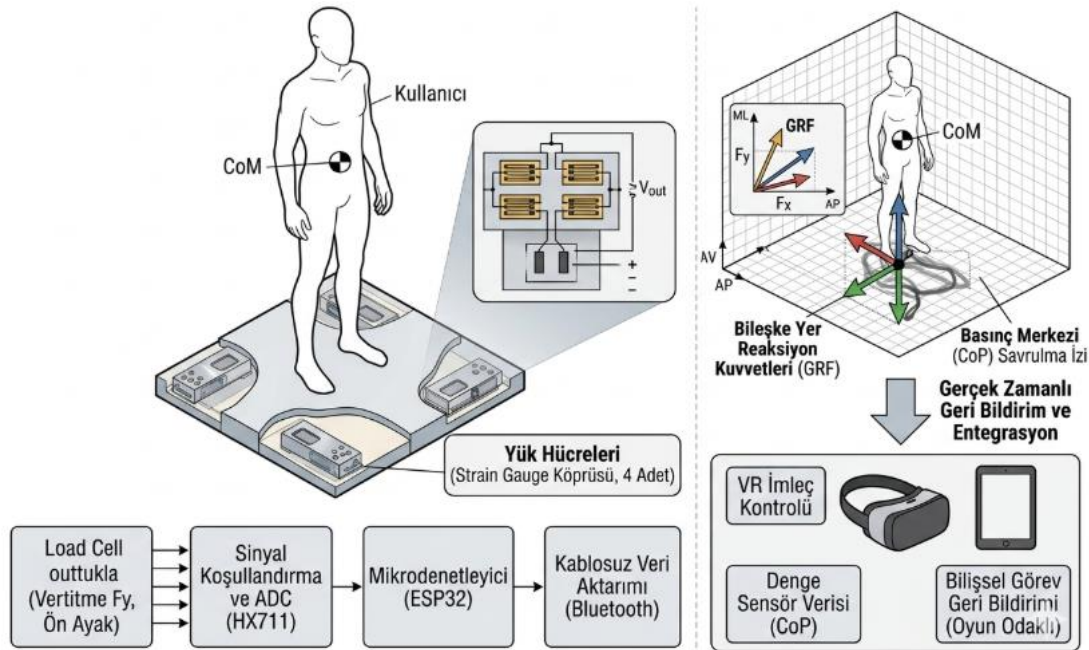
Geliştirilen sistemin genel mimarisi (Şekil 1); temel olarak elektronik donanım, gömülü sistem yazılımı, PC yazılımı ve mekanik konstrüksiyon kısımlarından oluşmaktadır. Sistem; veri toplama, veri işleme ve kullanıcı etkileşim katmanlarından oluşan, modüler bir yapıya sahiptir. Bu yapı, fiziksel ortamlardan elde edilen verilerin gerçek zamanlı işlenmesini ve sanal gerçeklik ortamında anlamlı kontrol girdilerine dönüştürülmesini sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

2.1. Materyal

Sistemin donanım altyapısı, verilerin yüksek doğruluk, düşük gecikme ve kararlı çalışma koşulları altında toplanmasını sağlayan bileşenlerden oluşmaktadır. Veri toplama ve işleme süreçlerinin merkezinde, çift çekirdekli işlemci mimarisine ve entegre Bluetooth özelliğine sahip ESP32 mikrodenetleyici yer almaktadır. Çalışmada veri toplama yaklaşımı iki farklı fiziksel platform üzerinden yürütülmektedir:

Statik Platform: Kullanıcının zeminle etkileşimi sırasındaki ağırlık dağılımını ve postüral denge salınımlarını ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Platformun dört köşesine, L6E model yük hücreleri yerleştirilmiş ve elde edilen sinyaller 24-bit çözünürlüklü HX711 ADC entegresiyle sayısallaştırılmıştır.

Dinamik Platform: Kullanıcının doğrusal ivme, açısal hız ve gövde yönelim bilgilerini doğal hareket koşullarında elde etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu yapıda, üç eksenli ADXL345 dijital ivmeölçer kullanılmış, sensör ile mikrodenetleyici haberleşmesi I2C protokolü üzerinden sağlanmıştır.



Şekil 1. Sistemin genel mimarisi

2.2. Metot

Sensörlerden sürekli örnekleme prensibiyle alınan ham veriler, doğrudan yorumlanabilir nitelikte olmadığından matematiksel modelleme süreçlerinden geçirilmektedir. Dinamik platformdaki ivme sensöründen elde edilen üç eksenli veriler kullanılarak, kullanıcının eğim açıları (pitch, roll, yaw) trigonometrik dönüşümlerle hesaplanmaktadır.

Statik platformun dört köşesinden alınan kuvvet verileri ise uzamsal konumlara göre ağırlıklandırılarak kullanıcının basınç merkezi koordinatları belirlenmekte ve denge stabilitesi nicel olarak modellenmektedir. Elde edilen tüm parametreler belirli bir protokol çerçevesinde paketlenerek ESP32'nin dahili Bluetooth modülü üzerinden bilgisayar ortamına gerçek zamanlı aktarılmaktadır. Bu kapsamda sistemin yeniden üretilebilirliğini sağlamak amacıyla belirlenen teknik çalışma parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sistem Teknik Performans Ölçütleri

Parametre	Değer / Kullanılan Yöntem
Örnekleme Frekansı (Statik)	80 Hz
Örnekleme Frekansı (Dinamik)	100 Hz
Haberleşme Hızı (Baud Rate)	9600 bps
Bluetooth Veri Gecikme Süresi	< 25 ms
Gürültü Filtreleme Yöntemi	Dahili Alçak Geçiren Filtre (Low-Pass Filter)

Sistemin kullanıcı etkileşim ve görselleştirme katmanı, C# programlama dili ve Unity oyun motoru kullanılarak geliştirilmiştir. Bluetooth üzerinden Unity ortamına aktarılan veriler, sanal nesnelerin konum ve hareket davranışlarını belirlemede doğrudan kontrol girdisi olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, dikkat, görsel takip ve problem çözme gibi bilişsel süreçleri desteklemek amacıyla VR ortamında kognitif oyunlar tasarlanmıştır. Kullanıcı, fiziksel platformlar üzerindeki hareketleriyle cihazlar yardımıyla doğrudan oyun içi kontrolü sağlamaktadır. Geliştirilen oyunlar, farklı bilişsel yükler sunmak adına kolaydan zora doğru ilerleyen seviyelerden ve tasarımlardan oluşmaktadır. Kullanıcı bulunduğu seviyeyi başarıyla tamamladığında bir sonraki oturumda daha zorlu tasarımların yer aldığı bir üst seviyeye geçiş yaparak devam edebilir. Sistemin adaptif yapısı, bu performans odaklı kademeli oyun tasarımlarına ve seviye geçişlerine dayanmaktadır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Donanım Ölçüm Kararlılığı ve Sinyal İşleme Kapasitesi

Sistemin donanım performans testleri, statik ve dinamik analizlerin iki ayrı fiziksel platform mimarisiyle yürütülmesinin biyomekanik ölçüm kararlılığını artırdığını göstermektedir. Statik platformda yer alan yük hücreleri ve 24-bit çözünürlüklü HX711 ADC birimi, insan vücudunun ayakta durma esnasında gösterdiği mikro düzeydeki sürekli salınımları ve ağırlık transferlerini yüksek bir hassasiyetle yakalamayı başarmıştır. Gömülü sistem düzeyinde uygulanan sinyal koşullandırma adımları, ham sensör verilerindeki doğal gürültüleri filtreleyerek Unity yazılım katmanına kararlı ve tutarlı veri paketlerinin ulaşmasını sağlamıştır. Dinamik platformda ise ADXL345 sensöründen I2C hattı ile çekilen ivme verilerinin hızlı trigonometrik dönüşümü, uzaysal hareket karakteristiğinin kesintisiz izlenmesine imkan tanımıştır.

3.2. VR Entegrasyonu ve Çift Görev (Dual-Task) Başarımı

Yazılım ve haberleşme katmanında, ESP32'nin entegre Bluetooth arabirimi üzerinden sağlanan seri veri iletim hızı, görsel veri akışı ile sensör mekaniği arasındaki zaman senkronizasyonunu milisaniyeler düzeyinde korumuştur. Bu düşük gecikme performansı, sanal gerçeklik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan ve görsel-vestibüler uyumsuzluktan kaynaklanan siber hastalık riskini minimize etmiştir. Çift görev paradigmasının entegrasyon başarımı incelendiğinde; kullanıcının bilişsel odağı sanal ortamdaki oyunlaştırılmış hedeflere yöneldiğinde meydana gelen postüral denge değişimleri ve gövde salınımları, platformlar vasıtasıyla nesnel ve nicel olarak başarıyla kaydedilmiştir. Sistem, sadece yazılım çıktısı üreten klasik VR uygulamalarının aksine, bilişsel yük altındaki motor stabilite kayıplarını anlık analiz edebilen adaptif bir ölçüm ortamı sunmuştur.

3.3. Stroop Testi ve Bilişsel Performans Analizi

Geliştirilen adaptif platformun kognitif etkisini doğrulamak amacıyla $n=30$ sağlıklı katılımcıya Stroop Testi uygulanmıştır. Verilerin normal dağılım göstermemesi ($p<0,05$) nedeniyle ön/son test karşılaştırmalarında Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi kullanılmıştır. Analiz sonucunda, katılımcıların 1. aşama ($Z=-4,618$), 2. aşama ($Z=-4,783$) ve 3. aşama ($Z=-4,783$) reaksiyon süreleri arasında istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı düşüşler saptanmıştır ($p=0,000$). İleri düzey bilişsel yük barındıran aşamalarda 30 katılımcının tamamının (%100) görev tamamlama süreleri kısalmıştır (negatif sıralar=30). Bu bulgular, adaptif VR tasarımlarının prefrontal korteks aktivasyonunu optimize ederek homojen bir kognitif ivmelenme sağladığını kanıtlamaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bilişsel süreçlerin fiziksel hareket ve proprioseptif algı ile etkileşimli olarak geliştirilmesine olanak tanıyan, disiplinlerarası bir donanım-yazılım platformu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Kuramsal temelini Piaget ve Vygotsky'nin yapılandırmacı yaklaşımları ile prefrontal korteksin yürütücü işlevlerindeki rolünden alan bu sistem; veri toplama hassasiyetini optimize etmek adına statik (yük hücreli) ve dinamik (ivme sensörlü) olmak üzere iki farklı fiziksel platform mimarisi üzerine inşa edilmiştir. ESP32 mikrodenetleyicisi ile toplanan hareket ve postür parametreleri, Bluetooth haberleşmesi üzerinden Unity VR ortamına aktararak çift görev paradigmalarının nesnel bir şekilde yürütülmesini sağlamıştır. Geliştirilen bu bütünleşik ve adaptif yapı; geleneksel durağan değerlendirme metotlarının sınırlılıklarını aşarak eğitim, nörolojik rehabilitasyon, spor bilimleri ve bilişsel terapi alanlarında kullanılabilir, veri odaklı ve modüler bir mühendislik modeli sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, planlanan Stroop testi ile kullanıcı deneyim anketlerinin (SSQ ve PQ) denek grupları üzerinde uygulanmasıyla sistemin bilişsel esneklik ve postüral stabilite üzerindeki klinik istatistiksel etkilerinin ortaya konması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] J. R. Best, Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, 30(4), (2010) 331–351.
- [2] A. Diamond, Close interrelation of motor development and cognitive development. *Child Development*, 71(1), (2000) 44–56.
- [3] J. Piaget, The origins of intelligence in children. International Universities Press. (1952).
- [4] A. A. Rizzo, S. T. Koenig, Is clinical virtual reality ready for primetime? *Neuropsychology*, 31(8) (2017) 877–899.
- [5] L. S. Vygotsky, Mind in society: The development of higher psychological processes. Harvard University Press. (1978).
- [6] M. Woollacott, A. Shumway-Cook, Attention and the control of posture and gait: A review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, 16(1) (2002) 1–14.
- [7] Analog Devices. ADXL345: 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer Data Sheet. (2010) Analog Devices Inc.
- [8] Avia Semiconductor. HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. (2020).
- [9] A. Mirelman, L. Rochester, I. Maidan, S. Del Din, L. Alcock, F. Nieuwhof, J. M. Hausdorff, Addition of a non-immersive virtual reality component to treadmill training to reduce fall risk in older adults (V-TIME): a randomised controlled trial. *The Lancet*, 388(10050) (2016) 1170–1182.
- [10] K. H. Cho, K. J. Lee, C. H. Song, Virtual-reality balance training with a video-game system improves dynamic balance in chronic stroke patients. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 228(1) (2012) 69–74.



Ozmotik Kurutmanın Meyve ve Sebzelerin Kalitesi Üzerindeki Etkileri

Dilber Onur¹, Dilek Demirbüker Kavak^{2*}

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, dilberonur2@gmail.com

^{2*} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, dkavak@aku.edu.tr

Özet

Ozmotik kurutma, hipertonik çözelti içinde bekletme yoluyla suyun uzaklaştırılmasına dayanan, termal olmayan bir ön işlem yöntemidir. Bu çalışmanın amacı, ozmotik kurutma yönteminin meyve ve sebzelerin besinsel, duyu ve fiziksel kalite özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Ozmotik kurutma işlemi geleneksel sıcak hava ile kurutmaya kıyasla, düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi sayesinde hücre membran bütünlüğü büyük ölçüde korunur. Bu sayede ısıya duyarlı vitaminler ile fenolik bileşiklerin degradasyonu engellenirken, polifenol oksidaz aktivitesi de baskılanır ve enzimatik esmerleşme gecikir. Besin kayıpları minimize edilir, ürünün doğal yapısı ve rengi daha iyi muhafaza edilir. Ozmotik işlem yalnızca suyu uzaklaştırmakla kalmaz; aynı zamanda antioksidanlar, vitaminler, mineraller gibi bileşenlerin ürüne kazandırılması için bir taşıyıcı ortam oluşturur. Hipertonik çözelti içindeki şeker veya tuzun dokuya nüfuz etmesiyle ürünün asit-şeker dengesi iyileşir, pigment kararlılığı artar. Kurutma veya dondurma sırasında hücresel parçalanmalar ve çökmeler engellenerek doğal doku yapısı korunur. Su aktivitesindeki düşüş, mikroorganizmaların yaşamak ve çoğalmak için ihtiyaç duyduğu serbest suyu ortamdan uzaklaştırarak faaliyetlerini durdurur; bu da raf ömrünü önemli ölçüde uzatır. Bununla birlikte, çözelti konsantrasyonu ve işlem süresine bağlı olarak düşük molekül ağırlıklı fenoliklerin dış ortama sızması nedeniyle kısmi kayıplar görülebilmektedir. Sonuç olarak, ozmotik kurutma ürünün kalitesini koruyan, biyoerişilebilirliği artırabilen ve raf ömrünü uzatan etkili bir yöntemdir. Optimum işlem koşullarının (sıcaklık, süre, uygun çözelti) belirlenmesi, istenen bileşiklerin korunması ve istenmeyen madde geçişinin sınırlandırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Anahtar kelimeler: ozmotik kurutma, kalite, biyoaktif bileşenler, raf ömrü

Effects of Osmotic Dehydration on the Quality of Fruits and Vegetables

Abstract

Osmotic dehydration is a non-thermal pretreatment method based on the removal of water by immersing food materials in a hypertonic solution. The aim of this study is to reveal the effects of osmotic dehydration on the nutritional, sensory, and physical quality properties of fruits and vegetables. Compared to conventional hot-air drying, osmotic dehydration occurs at lower temperatures, thereby largely preserving cell membrane integrity. In this way, degradation of heat-

sensitive vitamins and phenolic compounds is prevented, while polyphenol oxidase activity is suppressed and enzymatic browning is delayed. Nutrient losses are minimized, and the natural structure and color of the product are better preserved. Osmotic treatment not only removes water but also provides a carrier medium for the incorporation of compounds such as antioxidants, vitamins, and minerals into the product. The penetration of sugar or salt from the hypertonic solution into the tissue improves the acid-sugar balance and increases pigment stability. During drying or freezing, cellular disintegration and collapse are prevented, preserving the natural tissue structure. The decrease in water activity removes the free water required for microorganisms to survive and multiply, thereby inhibiting their activity and significantly extending shelf life. However, depending on solution concentration and processing time, partial losses may occur due to the leaching of low molecular weight phenolic compounds into the surrounding medium. As a result, osmotic dehydration is an effective method that preserves product quality, can improve bioavailability, and extends shelf life. Determination of optimum processing conditions (temperature, time, and appropriate solution) is critically important for preserving desired compounds and limiting the transfer of undesirable substances.

Keywords: osmotic dehydration, quality, bioactive compounds, shelf life

1. Giriş

Yeterli ve dengeli beslenme, bireylerin büyüme, gelişme ve sağlığın korunması açısından temel gereksinimlerden biridir [1]. Besin öğelerinin yetersiz veya dengesiz alınması, sağlık üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir [2]. Bu nedenle besinlerin işlenmesi ve saklanması sırasında besin değerinin korunması büyük önem taşımaktadır [3].

Meyve ve sebzeler; vitamin, mineral ve biyoaktif bileşikler açısından zengin olmaları nedeniyle günlük beslenmede önemli yer tutmaktadır [4]. Günümüzde tüketiciler, doğal yapısını koruyan, katkı maddesi içermeyen ve duyuşal özellikleri kabul edilebilir ürünlere yönelmektedir [5]. Ancak yüksek nem içerikleri nedeniyle hasat sonrası bozulmaya oldukça yatkındırlar. Bu durum, uygun muhafaza yöntemlerinin uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir. Kurutma, gıdalardaki serbest suyun uzaklaştırılmasıyla mikrobiyal gelişmeyi sınırlandıran ve raf ömrünü uzatan geleneksel bir muhafaza yöntemidir [6]. Bununla birlikte yüksek sıcaklıkta uygulanan klasik kurutma işlemleri; renk kaybı, aroma bozulması, dokusal sertleşme ve besin ögesi kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda ürün kalitesini daha iyi koruyabilen alternatif kurutma yöntemlerine yönelik çalışmalar artmıştır. Bu yöntemler arasında yer alan ozmotik kurutma, düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi ve ürünün doğal özelliklerini daha iyi koruması nedeniyle özellikle meyve ve sebzelerin işlenmesinde dikkat çekmektedir [7]. Bu çalışmanın amacı, ozmotik kurutma yönteminin meyve ve sebzelerin besinsel, duyuşal ve fiziksel kalite özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

2. Ozmotik Kurutma ve Temel Prensibi

Ozmotik kurutma, meyve ve sebze gibi yüksek nem içeren ürünlerin yüksek derişimli çözeltiler içerisine daldırılması ile gerçekleştirilen bir ön kurutma işlemidir [7]. Uygulamada genellikle sakkaroz, glikoz, tuz veya bunların kombinasyonlarından oluşan hipertonic çözeltiler kullanılmaktadır. Ürün ile çözelti arasında oluşan ozmotik basınç farkı sayesinde su, üründen dış ortama geçmektedir [8].

Bu işlem sırasında yalnızca su kaybı gerçekleşmez; aynı zamanda çözeltide bulunan bazı maddeler de ürün içerisine difüze olabilir [9]. Böylece ozmotik kurutma, sadece su uzaklaştırmaya yönelik bir işlem değil, aynı zamanda ürün kompozisyonunun kontrollü şekilde değiştirilmesine olanak sağlayan bir uygulamadır. Özellikle vitamin, mineral, antioksidan veya aroma bileşenlerinin ürüne kazandırılmasında taşıyıcı sistem olarak kullanılabilir [5].

Doğal kurutmaya kıyasla çevresel koşullardan bağımsız olması ve hijyenik kontrol sağlaması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda daha avantajlıdır [8]. Ayrıca daha düşük sıcaklıklarda uygulanması, ürün kalitesinin korunmasına katkı sağlamaktadır.

3. Ozmotik Kurutmada Kütle Transferi

Ozmotik kurutma sırasında üç temel kütle transferi gerçekleşmektedir. Bunlar; üründen çözeltiye su geçişi, çözeltiden ürüne çözünen madde transferi ve ürünün doğal bileşenlerinin dış ortama sızmasıdır [7,11]. Bu süreç, ürün dokusunun geçirgenliği ve çözeltinin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. İşlemin ilk saatlerinde su kaybı daha hızlı gerçekleşmekte, bazı çalışmalarda toplam su kaybının yaklaşık %70'inin ilk üç saat içerisinde meydana geldiği bildirilmektedir [12]. Uygulama süresi uzadıkça kütle transfer hızı azalmakta ve dengeye yaklaşmaktadır.

Kütle transferini etkileyen başlıca faktörler; ürünün başlangıç nemi, hücre yapısı, porozitesi, çözeltinin konsantrasyonu, sıcaklık, işlem süresi ve karıştırma [12]. Özellikle sıcaklık artışı hücre geçirgenliğini artırarak su kaybını hızlandırmaktadır. Ancak sıcaklığın aşırı yükselmesi ürün dokusunda yapısal bozulmalara yol açabilmektedir. Son yıllarda fruktooligosakkarit gibi fonksiyonel bileşenlerin kullanıldığı ozmotik çözeltiler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu bileşiklerin kullanımı hem infüzyon sırasında kütke transfer hızını değiştirmekte hem de son ürünün fonksiyonel özelliklerini geliştirmektedir [13,14].

4. Ozmotik Kurutmanın Meyve ve Sebze Kalitesi Üzerine Etkileri

Ozmotik kurutmanın en önemli avantajlarından biri, ürünün fiziksel ve duyuşal özelliklerini daha iyi koruyabilmesidir. Düşük sıcaklıklarda uygulanması nedeniyle özellikle ısıya duyarlı vitaminlerde kayıp daha sınırlıdır [15,16]. C vitamini ve bazı B grubu vitaminler, klasik sıcak hava kurutmaya göre daha yüksek düzeyde korunabilmektedir. Renk, tüketici tercihinde önemli kalite kriterlerinden biridir. Ozmotik işlem sırasında enzimatik esmerleşmenin azalması ve pigmentlerin daha kararlı kalması sayesinde ürünün doğal görünümü korunmaktadır [12]. Bu durum özellikle elma, muz, kayısı ve çilek gibi renk değişimine hassas ürünlerde önemli avantaj sağlamaktadır. Doku açısından değerlendirildiğinde, çözeltiden geçen çözünen maddeler hücre yapısını destekleyerek kurutma sonrası büzülmeyi azaltmaktadır. Rehidrasyon sırasında ürünün yapısal dayanıklılığını artırarak doğal dokuya daha yakın sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır [12]. Bu nedenle kurutulmuş ürünlerde görülen aşırı sertleşme ve kırılganlık daha düşük düzeyde ortaya çıkmaktadır. Su aktivitesinin azalması ise mikrobiyal gelişmeyi sınırlandırarak meyve sebzelerin raf ömrünü uzatmaktadır. Serbest su miktarının azalması, mikroorganizmaların çoğalmasını baskılamakta ve ürün stabilitesini artırmaktadır [6]. Bazı literatür çalışmaları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Meyve sebzelerin ozmotik dehidrasyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar

Çalışma amacı	Temel bulgular	Kaynak
Hindistan cevizi cipsi üretiminde alternatif ajan kullanımı	Pekmez ve hindistan cevizi şekeri uygulamalarının ürünün duyuşal özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmiştir.	[14]
Acerola meyvesinde ozmotik dehidrasyonun değerlendirilmesi	Yüksek C vitamini içeriğinin korunabildiği, aroma ve dokusal özelliklerin kabul edilebilir düzeyde kaldığı belirlenmiştir.	[10]
Muz halkalarında osmo-solar kurutma performansı	Ozmotik ön işlem toplam kuruma süresini azaltmış ve kalite özelliklerinin korunmasına katkı sağlamıştır.	[18]

Meyve ve sebzelerde kalite avantajlarının değerlendirilmesi	Düşük sıcaklık uygulamasının pigment kaybını azalttığı ve esmerleşmeyi geciktirdiği belirtilmiştir.	[16]
Limon halkalarında kurutma koşullarının optimizasyonu	Ozmotik süre değişiminin büzülme ve renk korunumu üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir.	[19]
Hint bektaşı üzümünde FOS infüzyonu	Fruktooligosakkarit geçişinin sıcaklığa bağlı değiştiği ve 50°C’de daha yüksek infüzyon sağlandığı belirlenmiştir.	[13]

5. Sonuç

Ozmotik kurutma, meyve ve sebzelerde kalite kayıplarını azaltan etkili bir ön işleme yöntemidir. Geleneksel kurutma yöntemlerinde görülen termal hasar, renk değişimi ve dokusal bozulmaların azaltılmasında önemli avantaj sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklarda uygulanması sayesinde ısıya duyarlı bileşenlerin korunmasına katkı sağlamakta, ürünün doğal renk, aroma ve doku özelliklerinin daha iyi muhafaza edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemin temelini oluşturan çift yönlü kütle transferi mekanizması, yalnızca suyun uzaklaştırılmasını değil, aynı zamanda çözelti ortamındaki istenen bileşenlerin ürüne kazandırılmasını da mümkün kılmaktadır. Böylece ozmotik kurutma, ürünün besinsel değerini destekleyen ve fonksiyonel özelliklerini geliştirebilen bir taşıyıcı sistem olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca su aktivitesinin düşmesiyle mikrobiyal gelişim sınırlandırılmakta ve raf ömrü uzamaktadır. Hibrit kurutma teknolojileriyle birlikte kullanıldığında ise işlem süresi kısalmakta, enerji verimliliği artmakta ve kalite özellikleri korunmuş ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlanmaktadır. Bu nedenle ozmotik kurutma, meyve ve sebzelerin işlenmesinde hem ürün kalitesinin korunması hem de fonksiyonel ürün geliştirilmesi açısından önemli bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] E. Çakırca Avcu, Sağlıklı beslenme Neleri gözden geçiriyoruz? Klinik Tıp Bilimleri Dergisi, 5(5) (2017) 1-5.
- [2] B. Aksoy, Ö. Küçükdönmez, A. Aydoğdu, G. Samur, Tip 2 diyabet hastalarında besin gruplarının diyetin enerji ve makro besin öğelerine katkısı. Beslenme ve Diyet Dergisi, 43(3) (2015) 213-218.
- [3] A. Baysal, Sağlıklı beslenme ve Akdeniz diyeti. Beslenme ve Diyet Dergisi, 25(1) (1996) 21-29.
- [4] O. Özünlü, H. Ergezer, İnfüzyon yöntemi hackleme enginar çanak yaprağı katkılı soğuk yeşil çay üretimi. Akademik Gıda, 17(4) (2019) 458-467.
- [5] İ. Çınar, Ozmotik dehidrasyon, mekanizması ve uygulamaları. Gıda, 34(5) (2009) 325-329.
- [6] İ. Çınar, F. K. Erafşar, Köpük kurutma tekniğinin meyve ve sebze işlemede kullanımı. Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2) (2018) 89-100.
- [7] F. Us, Ozmatik kurutma. 9. Gıda Kongresi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, (2006) 65-68.
- [8] G. Tan Gıda endüstrisinde kullanılan kurutma sistemleri. (2021). Ankara.
- [9] F. Şahbaz, H. Gündüz, Ozmotik dehidrasyon ve uygulamaları. Gıda, 23(2) (1998) 105-112.
- [10] D. G. Alves, J. L. Barbosa Jr, G. C. Antonio, F. E. X. Murr, F. E. X. Osmotic dehydration of acerola fruit (Malpighia punicifolia L.). Journal of Food Engineering, 68(1) (2005) 99-103.
- [11] A. L. Raoult-Wack, Recent advances in the osmotic dehydration of foods. Trends in Food Science & Technology, 5(8) (1994) 255-260.
- [12] T. Evgin, Ozmatik işlemlerle kısmi kurutulmuş kavun dilimlerinin dondurulmasının deneysel ve kurumsal olarak incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, (2012) İzmir.

- [13] S. S. Nambiar, A. Basu, N. P. Shetty, N. K. Rastogi, S. G. Prapulla, Infusion of fructooligosaccharide in Indian gooseberry (*Emblica officinalis*) fruit using osmotic treatment. *Journal of Food Engineering*, 190 139-146.
- [14] M. Pravitha, M. R. Manikantan, V. A. Kumar, P. P. S. Beegum, R. Pandiselvam, Comparison of drying behavior and product quality of coconut chips treated with different osmotic agents. *LWT*, 162 (2022) 113455.
- [15] E. Eroğlu, H. Yıldız, Gıdaların ozmotik kurutulmasında uygulanan yeni tekniklerin enerji verimliliği bakımından değerlendirilmesi. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2) (2011) 41-48.
- [16] A. K. Yadav, S. V. Singh, Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of food science and technology*, 51(9) (2014) 1654-1673.
- [17] İ. Çınar, Ozmatik dehidrasyon, mekanizması ve uygulamaları. *Gıda*, 34(5) (2008) 325-329.
- [18] Z. Yıldız, V. Alcan, The prediction of drying performance of banana rings dried by osmo-solar dehydration method. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(2) (2022) 227-236.
- [19] Z. Yıldız, S. Reyhan, Ozmotik dehidrasyon ve mikrodalga kurutma ile birlikte limon halkalarının kurutma koşullarının optimizasyonu. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(4) (2023) 845-856.



Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayınevi