

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 10 Sayı/Issue: 4 Aralık/December 2022



İmtiyaz Sahibi / Owner

Deanery of Engineering Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKIYE

Editörler / Editors

Gultekin OZDEMİR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Baş Editör / Editor-in-Chief)

Mehmet AVCAR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Erdal AYDEMİR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Turgay AYDOĞAN

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Çaglayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yıl University, Van

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

Artvin Coruh University, Artvin

Ahmet CAGLAR

Akdeniz University, Antalya

Habib GURBUZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Barış GUREL

Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK

Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Karani KURTULUŞ

Suleyman Demirel University, Isparta

Alper KUSCU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet OZCELİK

Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf OZTURK

Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT

Pamukkale University, Denizli

Fatih Ahmet ŞENEL

Suleyman Demirel University, Isparta

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Kerim YAPICI

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

Erol TUTUMLUER
University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

Gerhard-Wilhelm WEBER
Poznan University of Technology, Poznan, PL

Yayın Editörleri / Technical Editors

Ayşe BIYIKLI
Suleyman Demirel University, Isparta

Yasemin SIMSEK TURKER
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa UZUM
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Yabancı Dil Editörü / Foreign Language Editor

Ahmet ONAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / Abstracting & Indexing

/ TR-DIZIN / EBSCOhost / SCILIT / ROAD / EuroPUB / SOBIAD /
/ Google Scholar / CrossRef

Duyurular / Announcements

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.

As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

İçindekiler / *Contents*

Araştırma / *Research*

[1. U-NET BASED CAR DETECTION METHOD FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES](#)

[Oğuzhan KATAR Erkan DUMAN](#)

Sayfa: 1141-1154

[2. COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ TABANLI ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ KULLANILARAK TAŞKIN TEHLİKE HARİTALAMASI](#)

[Can Bülent KARAKUŞ Şeyma CEYLAN](#)

Sayfa: 1155-1173

[3. DERİN ÖĞRENME TEKNİĞİ KULLANILARAK KARS İLİNİN HAVA SICAKLIK TAHMİNİ](#)

[Muhammet Ali KARABULUT Emre TOPÇU](#)

Sayfa: 1174-1181

[4. METEOROLOJİK PARAMETRELERİN HAVA KİRLİLİĞİNE ETKİSİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ – MUŞ İLİ \(2021\)](#)

[Zinnur YILMAZ](#)

Sayfa: 1182-1193

[5. THE EFFECT OF USING PHASE CHANGE MATERIALS AND EXAMINING THE ASPECT RATIO IN AN AIR-COOLED SYSTEM OF A PLATE BATTERY CONNECTED TO A SOLAR SYSTEM](#)

[Nevzat AKKURT](#)

Sayfa: 1194-1211

[6. PREDICTING DIAGNOSIS OF COVID-19 DISEASE WITH ADABOOST AND NAIVE BAYES MACHINE LEARNING ALGORITHMS](#)

[Ahmet ÇELİK](#)

Sayfa: 1212-1221

[7. THE EFFECTS OF CONSTRUCTION WASTE ON CLIMATE CHANGE: IS A MORE GREEN CONSTRUCTION INDUSTRY POSSIBLE?](#)

[Pınar ÖZTÜRK KARDOĞAN Ahmet ERDAĞ](#)

Sayfa: 1222-1231

[8. ELEKTRİKLİ ARAÇ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM SİSTEMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE ŞARJ İSTASYONU ALTYAPISININ TAYİN EDİLMESİ](#)

[Dilan YILDIZHAN Ayşe Kübra ERENOĞLU Ozan ERDİNÇ](#)

Sayfa: 1232-1242

[9. CONCEPTUAL DESIGN OF A TRANSPORT MACHINE FOR CONVEYING BALL-LIKE MATERIAL](#)

[Zeynep PARLAR](#)

Sayfa: 1243-1250

[10. A THEORETICAL INVESTIGATION ON TRAINING OF PIPE-LIKE NEURAL NETWORK BENCHMARK ARCHITECTURES AND PERFORMANCE COMPARISONS OF POPULAR TRAINING ALGORITHMS](#)

[Özlem İMİK ŞİMŞEK Barış Baykant ALAGÖZ](#)

Sayfa: 1251-1271

[11. GRAFEN OKSİT TAKVİYESİNİN AA1050 METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ELEKTRİKSEL DİRENÇ VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ](#)

[Jülide Hazal TÜRKCAN Oğuz Kaan OZDEMİR Mehmet Fahri SARAÇ](#)

Sayfa: 1272-1277

[12. OPTIMIZATION OF ALKALINE-THERMAL HYDROLYSIS TO OBTAIN STRUVITE FROM DIGESTED SLUDGE USING A BOX-BEHNKEN DESIGN: SOLUBILIZATION OF NUTRIENTS AND METALS](#)

[Ayla UYSAL Mehmet AYDOĞAN](#)

Sayfa: 1278-1289

[13. HİBRİT YAKIT HÜCRESİ-PV DESTEKLİ BİR TRAMVAYIN EKONOMİK İŞLETİMİ](#)

[İbrahim ŞENGÖR Alper ÇİÇEK](#)

Sayfa: 1290-1302

[14. TOPLU TAŞIMA YOLCULARININ SOSYO-DEMOGRAFİK ÖZELLİKLERİNİN ERİŞİLEBİLİRLİK, BEKLEME VE SEYAHAT SÜRESİ ALGISINA ETKİSİ](#)

[Buket ÇAPALI Serdal TERZİ Mehmet SALTAN](#)

Sayfa: 1303-1314

[15. KÖPÜK DOLGULU HAFİFLETİLMİŞ DONATILI ZEMİN PANELLERİNİN DAVRANIŞI](#)

[Burak EVİRGEN Onur TUNABOYU Barış BÜYÜK Gizem Tuğçe ÇİL](#)

Sayfa: 1315-1324

[16. FARKLI ALTTAŞ BİRİKTİRME SICAKLIKLARINDA KAPLANMIŞ NİTİ KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ](#)

[Mehmet POYRAZ](#)

Sayfa: 1325-1332

[17. TOZ AKTİF KARBONUN NİTRİK ASİT VE SÜLFONİK ASİT İLE KİMYASAL MODİFİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU](#)

[Betül AYKUT ŞENEL Şehnaz Şule KAPLAN BEKAROĞLU Nuray ATEŞ](#)

Sayfa: 1333-1340

[18. AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN BİR VOLANIN PARAMETRİK OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE TASARIMININ İYİLEŞTİRİLMESİ](#)

[Mehmet Yalçın SIRMALILAR Murat HAKTANIR Nursen SAKLAKOĞLU Caner EŞ](#)

Sayfa: 1341-1353

[19. YAPIŞKAN PÜSKÜRTME YÖNTEMİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ÖNEMİ VE ÖRNEK UYGULAMA](#)

[Hasan BAŞ Fatih YAPICI İbrahim İNANÇ](#)

Sayfa: 1354-1361

[20. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE STATİK ANALİZİ](#)

[Muhittin TURAN](#)

Sayfa: 1362-1374

[21. OTELLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ İYİLEŞTİRMEYE YÖNELİK ÇEŞİTLİ YAKLAŞIMLARIN TASARRUF ORANLARINA ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: ANTALYA ÖRNEĞİ](#)

Seren Öykü YAZGAN Sezgi KOÇAK SOYLU

Sayfa: 1375-1388

[22. EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE TO MICROSTRUCTURE IN METAL BINDER JETTING](#)

Mert GÜRGEN Cengiz KAYACAN

Sayfa: 1389-1399

[23. NESNELERİN İNTERNETİ AĞLARINDA TIKANIKLIK KONTROL MEKANİZMALARI İLE RPL AMAÇ FONKSİYONLARININ KARŞILIKLI PERFORMANS ANALİZİ](#)

Rıdvan SÖYÜ Alper Kamil DEMİR Selma Ayşe ÖZEL

Sayfa: 1400-1416

[24. VERİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİ İLE TARIMSAL VERİ ANALİZİ: BİR AKILLI TARIM SİSTEMİ ÖNERİSİ](#)

Burak ÖZER Sümeyra KUŞ Oktay YILDIZ

Sayfa: 1417-1429

[25. APPLICATION OF REBA AND KARAKURI KAIZEN TECHNIQUES TO REDUCE ERGONOMIC RISK LEVELS IN A WORKPLACE](#)

Aynur GÜR SOY ÖZCAN

Sayfa: 1430-1444

[26. SERİ BAĞLI U-BORULU VAKUM TÜPLÜ GÜNEŞ KOLEKTÖRÜNÜN ISIL VERİMİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ](#)

İsmail ÖZCAN Arif Emre ÖZGÜR Ahmet ÖZSOY

Sayfa: 1445-1454

[27. TOPRAK DAĞITIMINDA OLUŞABİLECEK GİRİŞİM DURUMUNUN ÖNLENMESİ İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI ÇÖZÜM YAKLAŞIMI](#)

Ziya ÇAKICI Mehmet Sinan YILDIRIM

Sayfa: 1455-1473

[28. DOĞAL ALKALİ MALZEMELERİN ÇİMENTOLU MACUN DOLGUNUN DAYANIM-DURAYLILIK VE MİKROYAPI PERFORMANSINA ETKİSİ](#)

Tekin YILMAZ Bayram ERÇIKDI

Sayfa: 1474-1483

Derleme / Review

[29. KARBON NANOTÜPLERİN KARBONDİOKSİT TUTUCU OLARAK KULLANIMI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME](#)

Aysun ÖZKAN Gamze YILMAZ Zerrin GÜNKAYA Mufide BANAR

Sayfa: 1484-1494

[30. A LITERATURE REVIEW ABOUT EFFECTS of PHASE CHANGING MATERIALS on COMPRESSIVE STRENGTH and THERMAL CONDUCTIVITY of BUILDING COMPONENTS](#)

Ali İhsan ÇELİK Ramazan KAYABAŞI Ahmet ŞENER

Sayfa: 1495-1508

İmtiyaz Sahibi / Owner

Deanery of Engineering Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKIYE

Editörler / Editors

Gultekin OZDEMİR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Baş Editör / Editor-in-Chief)

Mehmet AVCAR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Erdal AYDEMİR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Turgay AYDOĞAN

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Çaglayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yil University, Van

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

Artvin Coruh University, Artvin

Ahmet CAGLAR

Akdeniz University, Antalya

Habib GURBUZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Barış GUREL

Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK

Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Karani KURTULUŞ

Suleyman Demirel University, Isparta

Alper KUSCU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet OZCELİK

Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf OZTURK

Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT

Pamukkale University, Denizli

Fatih Ahmet ŞENEL

Suleyman Demirel University, Isparta

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Kerim YAPICI

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

Erol TUTUMLUER
University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

Gerhard-Wilhelm WEBER
Poznan University of Technology, Poznan, PL

Yayın Editörleri / Technical Editors

Ayşe BIYIKLI
Suleyman Demirel University, Isparta

Yasemin SIMSEK TURKER
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa UZUM
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / Abstracting & Indexing

/ TR-DIZIN / EBSCOhost / SCILIT / ROAD / EuroPUB / SOBIAD /
/ Google Scholar / CrossRef

Duyurular / Announcements

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.

As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

İçindekiler / Contents

Araştırma / Research

1. U-NET BASED CAR DETECTION METHOD FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Oğuzhan KATAR Erkan DUMAN

Sayfa: 1141-1154

2. COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ TABANLI ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ KULLANILARAK TAŞKIN TEHLİKE HARİTALAMASI

Can Bülent KARAKUŞ Şeyma CEYLAN

Sayfa: 1155-1173

3. DERİN ÖĞRENME TEKNİĞİ KULLANILARAK KARS İLİNİN HAVA SICAKLIK TAHMİNİ

Muhammet Ali KARABULUT Emre TOPÇU

Sayfa: 1174-1181

4. METEOROLOJİK PARAMETRELERİN HAVA KİRLİLİĞİNE ETKİSİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ – MUŞ İLİ (2021)

Zinnur YILMAZ

Sayfa: 1182-1193

5. THE EFFECT OF USING PHASE CHANGE MATERIALS AND EXAMINING THE ASPECT RATIO IN AN AIR-COOLED SYSTEM OF A PLATE BATTERY CONNECTED TO A SOLAR SYSTEM

Nevzat AKKURT

Sayfa: 1194-1211

6. PREDICTING DIAGNOSIS OF COVID-19 DISEASE WITH ADABOOST AND NAIVE BAYES MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Ahmet ÇELİK

Sayfa: 1212-1221

7. THE EFFECTS OF CONSTRUCTION WASTE ON CLIMATE CHANGE: IS A MORE GREEN CONSTRUCTION INDUSTRY POSSIBLE?

Pınar ÖZTÜRK KARDOĞAN Ahmet ERDAĞ

Sayfa: 1222-1231

8. ELEKTRİKLİ ARAÇ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM SİSTEMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE ŞARJ İSTASYONU ALTYAPISININ TAYİN EDİLMESİ

Dilan YILDIZHAN Ayşe Kübra ERENOĞLU Ozan ERDİNÇ

Sayfa: 1232-1242

9. CONCEPTUAL DESIGN OF A TRANSPORT MACHINE FOR CONVEYING BALL-LIKE MATERIAL

Zeynep PARLAR

Sayfa: 1243-1250

[10. A THEORETICAL INVESTIGATION ON TRAINING OF PIPE-LIKE NEURAL NETWORK BENCHMARK ARCHITECTURES AND PERFORMANCE COMPARISONS OF POPULAR TRAINING ALGORITHMS](#)

[Özlem İMİK ŞİMŞEK Barış Baykant ALAGÖZ](#)

Sayfa: 1251-1271

[11. GRAFEN OKSİT TAKVİYESİNİN AA1050 METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ELEKTRİKSEL DİRENÇ VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ](#)

[Jülide Hazal TÜRKCAN Oğuz Kaan OZDEMİR Mehmet Fahri SARAÇ](#)

Sayfa: 1272-1277

[12. OPTIMIZATION OF ALKALINE-THERMAL HYDROLYSIS TO OBTAIN STRUVITE FROM DIGESTED SLUDGE USING A BOX-BEHNKEN DESIGN: SOLUBILIZATION OF NUTRIENTS AND METALS](#)

[Ayla UYSAL Mehmet AYDOĞAN](#)

Sayfa: 1278-1289

[13. HİBRİT YAKIT HÜCRESİ-PV DESTEKLİ BİR TRAMVAYIN EKONOMİK İŞLETİMİ](#)

[İbrahim ŞENGÖR Alper ÇİÇEK](#)

Sayfa: 1290-1302

[14. TOPLU TAŞIMA YOLCULARININ SOSYO-DEMOGRAFİK ÖZELLİKLERİNİN ERİŞİLEBİLİRLİK, BEKLEME VE SEYAHAT SÜRESİ ALGISINA ETKİSİ](#)

[Buket ÇAPALI Serdal TERZİ Mehmet SALTAN](#)

Sayfa: 1303-1314

[15. KÖPÜK DOLGULU HAFİFLETİLMİŞ DONATILI ZEMİN PANELLERİNİN DAVRANIŞI](#)

[Burak EVİRGEN Onur TUNABOYU Barış BÜYÜK Gizem Tuğçe ÇİL](#)

Sayfa: 1315-1324

[16. FARKLI ALTTAŞ BİRİKTİRME SICAKLIKLARINDA KAPLANMIŞ NİTİ KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ](#)

[Mehmet POYRAZ](#)

Sayfa: 1325-1332

[17. TOZ AKTİF KARBONUN NİTRİK ASİT VE SÜLFONİK ASİT İLE KİMYASAL MODİFİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU](#)

[Betül AYKUT ŞENEL Şehnaz Şule KAPLAN BEKAROĞLU Nuray ATEŞ](#)

Sayfa: 1333-1340

[18. AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN BİR VOLANIN PARAMETRİK OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE TASARIMININ İYİLEŞTİRİLMESİ](#)

[Mehmet Yalçın SIRMALILAR Murat HAKTANIR Nursen SAKLAKOĞLU Caner EŞ](#)

Sayfa: 1341-1353

[19. YAPIŞKAN PÜSKÜRTME YÖNTEMİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ÖNEMİ VE ÖRNEK UYGULAMA](#)

[Hasan BAŞ Fatih YAPICI İbrahim İNANÇ](#)

Sayfa: 1354-1361

[20. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE STATİK ANALİZİ](#)

[Muhittin TURAN](#)

Sayfa: 1362-1374

[21. OTELLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ İYİLEŞTİRMEYE YÖNELİK ÇEŞİTLİ YAKLAŞIMLARIN TASARRUF ORANLARINA ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: ANTALYA ÖRNEĞİ](#)

Seren Öykü YAZGAN Sezgi KOÇAK SOYLU

Sayfa: 1375-1388

[22. EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE TO MICROSTRUCTURE IN METAL BINDER JETTING](#)

Mert GÜRGEN Cengiz KAYACAN

Sayfa: 1389-1399

[23. NESNELERİN İNTERNETİ AĞLARINDA TIKANIKLIK KONTROL MEKANİZMALARI İLE RPL AMAÇ FONKSİYONLARININ KARŞILIKLI PERFORMANS ANALİZİ](#)

Rıdvan SÖYÜ Alper Kamil DEMİR Selma Ayşe ÖZEL

Sayfa: 1400-1416

[24. VERİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİ İLE TARIMSAL VERİ ANALİZİ: BİR AKILLI TARIM SİSTEMİ ÖNERİSİ](#)

Burak ÖZER Sümeyra KUŞ Oktay YILDIZ

Sayfa: 1417-1429

[25. APPLICATION OF REBA AND KARAKURI KAIZEN TECHNIQUES TO REDUCE ERGONOMIC RISK LEVELS IN A WORKPLACE](#)

Aynur GÜR SOY ÖZCAN

Sayfa: 1430-1444

[26. SERİ BAĞLI U-BORULU VAKUM TÜPLÜ GÜNEŞ KOLEKTÖRÜNÜN ISIL VERİMİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ](#)

İsmail ÖZCAN Arif Emre ÖZGÜR Ahmet ÖZSOY

Sayfa: 1445-1454

[27. TOPRAK DAĞITIMINDA OLUŞABİLECEK GİRİŞİM DURUMUNUN ÖNLENMESİ İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI ÇÖZÜM YAKLAŞIMI](#)

Ziya ÇAKICI Mehmet Sinan YILDIRIM

Sayfa: 1455-1473

[28. DOĞAL ALKALİ MALZEMELERİN ÇİMENTOLU MACUN DOLGUNUN DAYANIM-DURAYLILIK VE MİKROYAPI PERFORMANSINA ETKİSİ](#)

Tekin YILMAZ Bayram ERÇIKDI

Sayfa: 1474-1483

Derleme / Review

[29. KARBON NANOTÜPLERİN KARBONDİOKSİT TUTUCU OLARAK KULLANIMI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME](#)

Aysun ÖZKAN Gamze YILMAZ Zerrin GÜNKAYA Mufide BANAR

Sayfa: 1484-1494

[30. A LITERATURE REVIEW ABOUT EFFECTS of PHASE CHANGING MATERIALS on COMPRESSIVE STRENGTH and THERMAL CONDUCTIVITY of BUILDING COMPONENTS](#)

Ali İhsan ÇELİK Ramazan KAYABAŞI Ahmet ŞENER

Sayfa: 1495-1508



U-NET BASED CAR DETECTION METHOD FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Oğuzhan KATAR^{1*}, Erkan DUMAN²

¹ Firat University, Faculty of Technology, Department of Software Engineering, Elazig, Turkey

² Firat University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Elazig, Turkey

Keywords

UAV,
U-Net,
Detection,
Image Processing,
Semantic Segmentation.

Abstract

With the developments in computer hardware technology, studies in the fields of computer vision and artificial intelligence has accelerated. However, the number of areas where autonomous systems are used has also increased. Among these areas are unmanned aerial vehicles, which are one of the most important parameters of today's military technology. In this study, which includes two different scenarios, we aimed to improve the vision capabilities of unmanned aerial vehicles based on artificial intelligence. Within the scope of Scenario-1, the U-Net model suitable for binary semantic segmentation method was trained with the help of images taken by unmanned aerial vehicle camera. Within the scope of Scenario-2, which is designed for moving or stationary vehicle detection, the U-Net model is trained in accordance with multi-class semantic segmentation method. In all these training processes, a publicly available dataset was used. The model trained for Scenario-1 reached mean Intersection over Union (mIoU) value of 84.3%, while the model trained for Scenario-2 reached 79.7% mIoU. In this study, approaches were shared about the use of high-resolution images in model training and testing stages. Applying such studies in the field can help improve precision and reliability in arms industry.

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN U-NET TABANLI ARAÇ TESPİT YÖNTEMİ

Anahtar Kelimeler

İHA,
U-Net,
Tespit,
Görüntü İşleme,
Anlamsal Bölütleme.

Öz

Bilgisayar donanımı teknolojisindeki gelişmelerle birlikte bilgisayar görmesi ve yapay zeka alanlarındaki çalışmalar hız kazanmıştır. Bununla birlikte otonom sistemlerin kullanıldığı alanların sayısı da artmıştır. Bu alanlar arasında günümüz askeri teknolojisinin en önemli parametrelerinden biri olan insansız hava araçları yer almaktadır. İki farklı senaryoyu içeren bu çalışmamızda insansız hava araçlarının görüş yeteneklerini yapay zeka tabanlı olarak geliştirmeyi hedefledik. Senaryo-1 kapsamında ikili anlamsal bölütleme yöntemine uygun U-Net modeli sadece araç objesinin tespitini yapabilmek için insansız hava aracı kamerasıyla çekilen görüntüler yardımıyla eğitilmiştir. Hareketli veya durağan araç tespiti için tasarlanan Senaryo-2 kapsamında, U-Net modeli çok sınıflı anlamsal bölütlemeye uygun olarak eğitilmiştir. Tüm bu eğitim süreçlerinde kamuya açık veri seti kullanılmıştır. Senaryo-1 kapsamında eğitilen model %84,3 ortalama birleşim üzerinden kesişme (mIoU) değerine ulaşırken, Senaryo-2 kapsamında eğitilen model %79,7 mIoU değerine ulaşmıştır. Bu çalışmada yüksek çözünürlüklü görüntülerin model eğitiminde ve test aşamalarında kullanılabilirliği hakkında yaklaşımlar paylaşıldı. Bu tür çalışmaların sahada uygulanması, savunma sanayisinde hassaslığı ve güvenilirliği iyileştirmeye yardımcı olabilir.

Alıntı / Cite

Katar, O., Duman, E., (2022). U-Net Based Car Detection Method for Unmanned Aerial Vehicles, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1141-1154.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

O. Katar, 0000-0002-5628-3543
E. Duman, 0000-0003-2439-7244

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.03.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	14.04.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: okatar@firat.edu.tr,+90-424-607-4301

1. Introduction

Unmanned aerial vehicles are complex robots that can fly autonomously or remotely with the help of ground stations (Nonami et al., 2010). In today's technology, unmanned aerial vehicles are used in various fields due to their size, cost and mobility (Boukoberine et al., 2019). Unmanned aerial vehicles take part in almost every part of our lives, such as military operations, traffic monitoring, search and rescue, and photography (Howard et al., 2018).

Thanks to the developments in computer hardware technology, the number of technologies in which autonomous systems are used has also increased. The main purpose of developing an autonomous system is to minimize the human factor (Shareef et al., 2021). Artificial intelligence-based solutions are used for this function. The main benefits of artificial intelligence-based solutions; minimizing decision-making time and margin of error. One of the technologies that needs less margin of error and decision-making time is unmanned aerial vehicle technology (Mohamed et al., 2020). For this reason, it is inevitable to use artificial intelligence supported autonomous systems in unmanned aerial vehicle technology.

By integrating the camera and other necessary hardware parts, unmanned aerial vehicles can be given the ability to visual abilities (Kuru, 2021). Today, the vision functions of unmanned aerial vehicles are used in the tasks such as monitoring the target vehicle and destroying it when necessary, during the observations made for the collection of intelligence information (Haulman, 2003). In the target detection phase, unmanned aerial vehicles usually identify the target vehicles within a predetermined rectangular area (Xu et al., 2016). Sometimes the area occupied by the target vehicles on the image does not exactly match the dimensions of the defined rectangular area. For this reason, the margin of error is accepted as the difference between the area occupied by the rectangular area and the space occupied by the vehicle object in the detection of vehicle objects. This acceptance reduces the sensitivity of the task to be performed and may negatively affects the decision-making. The ability to vision alone is not sufficient for the decision-making mechanism. In order for the computer to decide on its own, it needs to analyse the image it receives from its camera. Traditional image processing methods can be used in this analysis process, but today, advanced models based on deep learning are preferred (Dargan et al., 2020). Deep learning models can efficiently process large amounts of data, thanks to high-powered graphics processing units (Blumberg et al., 2018). A large number of samples are needed in the training of deep learning models. In addition to segmentation studies, mask images are required. Creating mask images is very costly in terms of time. For this reason, finding a public dataset is a big challenge for researchers. Many datasets have been shared in order to eliminate this difficulty for researchers (Du et al., 2018; Mueller et al., 2016). In this study, we used a public dataset, including mask images, by customizing it. Thanks to our models suitable for binary and multi-class semantic segmentation, pixel-based marking capability can be added to the unmanned aerial vehicle. In this way, the system will create the relevant environment for the interpretation of the image and taking the relevant action in return, without the need for any human intervention. With such approaches, undesirable events caused by human factors such as carelessness, demoralization, and wrong decision-making can be prevented.

The main purpose of this study is to provide autonomous unmanned aerial car with the ability to detect vehicle objects with deep learning-based segmentation methods. With its application in the field, it is aimed to increase efficiency and precision in traffic monitoring and military operations. The rest of this paper is organized as follows. Section 2 includes other studies in the literature. The details of the models, dataset and performance metrics is described in Section 3. The analysis of test results and experimental results of U-Net models are given in Section 4. Conclusion part of the study is in Section 5.

2. Related Works

In this section, some studies from computer vision in car detection are examined. The main idea behind these studies is to contribute to the computer vision systems with various methods. Zhao and Nevatia (2001) proposed a system to detect vehicle objects from aerial images. Various edge extraction algorithms were used in this study. Ammour et al. (2017) proposed a deep learning-based car detection method. This method is a two-stage method that includes the extraction and classification of candidate regions. The researchers used the mean-shift algorithm to extract the candidate regions. They used support vector machine (SVM) as a classifier with deep convolutional network. They classified the regions on the image as "car" and "no-car". For feature extraction, the VGG16 model with an input size of 224x224 pixels (px) was used. Xu et al. (2017) trained the Faster R-CNN model for traffic monitoring with the help of low altitude unmanned aerial vehicles. Faster R-CNN achieved 98.43% correctness and 96.40% completeness. Hinz and Stilla (2006) used infrared images to detect stationary and moving vehicles. The car detection approach consists of three main parts. Predicts are made on the image using the differences in temperature levels. 96 cars were extracted from the image reserved for the test, 90 of which were real positive and the remaining 6 were false alarms.

3. Material and Method

3.1. Dataset

In this study, the public dataset called UAVid was used (Lyu et al., 2020). The relevant dataset was created with the help of cameras integrated into DJI phantom3 pro and DJI phantom4 drones. The drones were flown at a maximum flight speed of 10 m/s to record images in RGB format. Reason for keeping the flight speed so low is to prevent the possible blurring effect in the recorded images.

The dataset consists of 42 different folders, each containing 10 image frames. Randomly selected samples from these 420 high-resolution images are given in Figure 1.

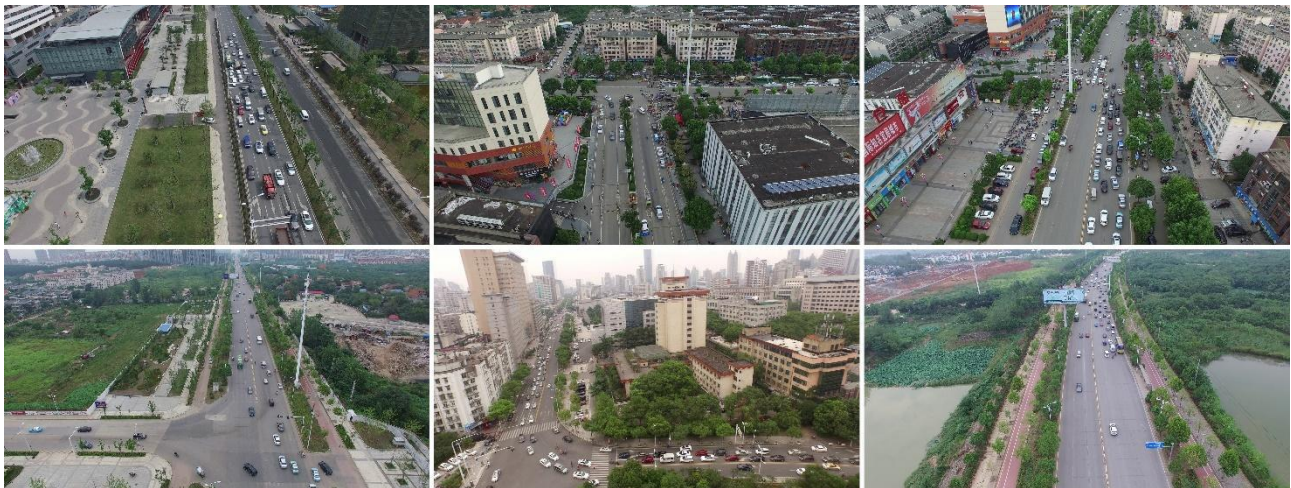


Figure 1. Randomly selected samples from dataset

Different classes were determined by the researchers to be used in segmentation studies and mask images were created. In these mask images, each class is defined by different pixel values. Samples of masks in the dataset are given in Figure 2.

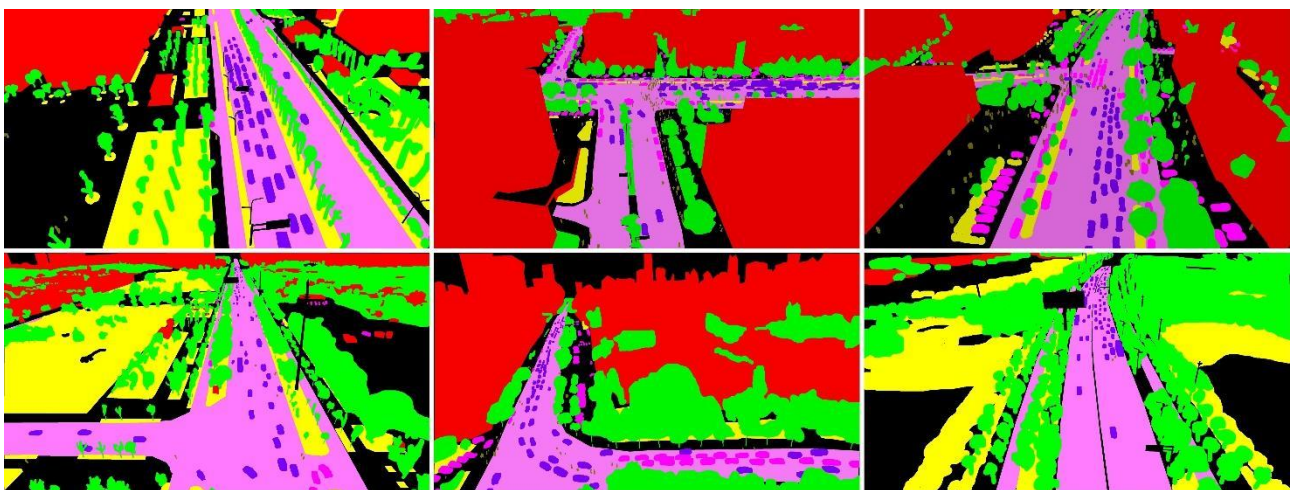


Figure 2. Samples of masks in the dataset

In the dataset, which includes 420 images in total, ground truth mask images were created for only 270 images. The remaining 150 images are recommended by the researchers to be used in the testing phase. While 170 of the 270 images created with mask images have a resolution of 3840x2160px, 100 of them have a resolution of 4096x2160px. Labelling on images with such high resolution is very costly in terms of time. For this reason, only 8 classes were determined as namely building, road, tree, low vegetation, static car, moving car, human, and clutter and mask images in RGB format were labelled. Because mask images are in RGB format, each pixel is represented by 24 bits, so different pixel values can be easily assigned to each class without conflict. Besides the advantages of the mask images in RGB format, there are also disadvantages. An example of these disadvantages is that the size of a mask image occupies in the memory is large and therefore increases the processing time in the processes in

which it will be used. Pixel values, labels and percentage of frames containing pixels with the label information are given in Table 1.

Table 1. Dataset pixel details

Label name	Pixel value (RGB)	In frames (%)
building	(128,0,0)	30.44
road	(128,64,128)	14.32
tree	(0,128,0)	25.98
low vegetation	(128,128,0)	9.46
static car	(192,0,192)	1.41
moving car	(64,0,128)	1.12
human	(64,64,0)	0.16
clutter	(0,0,0)	17.12

3.2. Scenario-1: Car Detection Based on Semantic Segmentation

Using the UAVid dataset, Scenario-1 was designed to give unmanned aerial vehicles the ability to recognize the car object. The main purpose in this scenario is to provide more sensitive approaches with artificial intelligence-based segmentation method in functions such as target detection and tracking performed by autonomous systems. In this context, before the model was created and its training started, various pre-processes were applied in the dataset. The common objectives of the pre-processes applied are to use our resources more efficiently.

3.2.1 Pre-processing for Scenario-1

The UAVid dataset created for the multi-class segmentation problem should be made suitable for binary segmentation. Mask images in RGB format were converted to 8-bit single-channel '.png' format. The result of the corresponding operation is given in Figure 3.

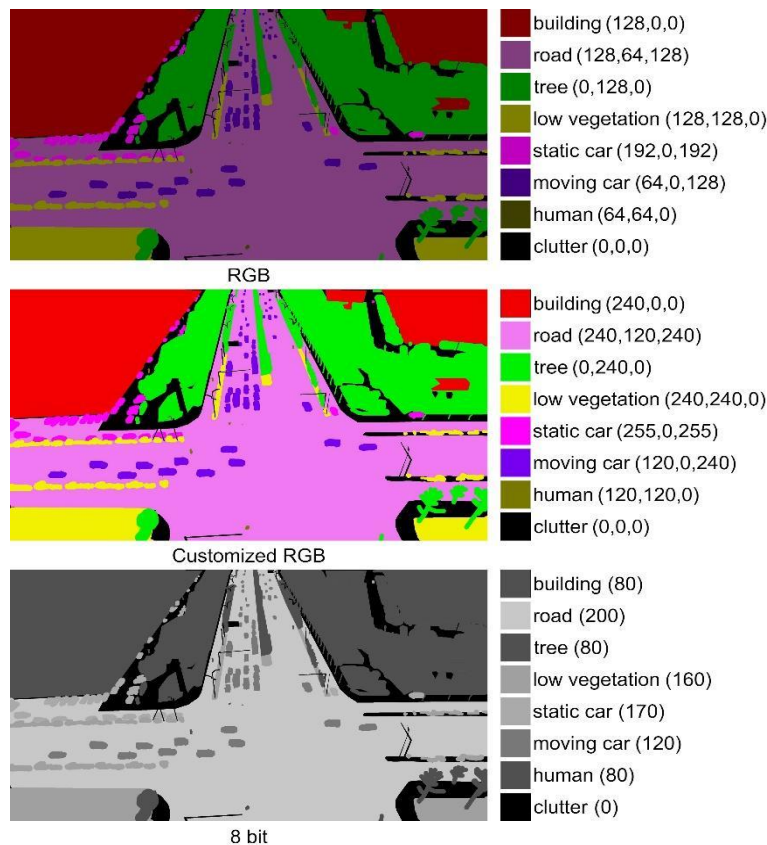


Figure 3. Pre-processing for Scenario-1

After all mask images were converted to 8-bit format, the value of "255" was assigned to only the pixels where the vehicle object was located, and the value of the other pixels was changed to "0" using the pixel-based value changing method. In this way, the necessary structure for binary segmentation was created. Result of the pixel-based value changing method is given in Figure 4.

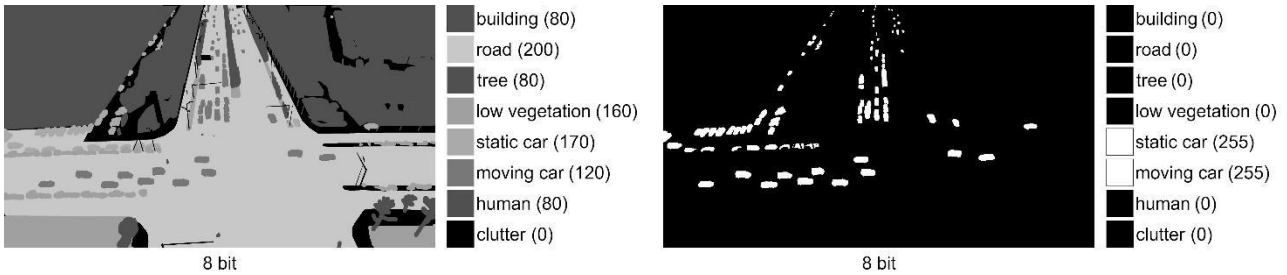


Figure 4. Pixel-based value changing method for Scenario-1

3.3. Scenario-2: Moving or Stationary Car Detection Based on Semantic Segmentation

Using the UAVID dataset, Scenario-2 was designed to give unmanned aerial vehicles the ability to recognize moving or stationary car objects. In this scenario, the main purpose is to enable the separation of moving or stationary vehicles in functions such as target detection and tracking performed by autonomous systems to be realized by artificial intelligence-based segmentation method, and to enable different functions or parameters to be used for relevant situations. Similar pre-processing steps were applied as in Scenario-1.

3.3.1 Pre-processing for Scenario-2

The UAVID dataset created for the multi-class segmentation problem; should be made suitable for multi-class segmentation, which covers only 3 classes as background, moving vehicle and stationary vehicle. Mask images in RGB format were converted to 8-bit single-channel '.png' format. The result of the corresponding operation is given in Figure 5.

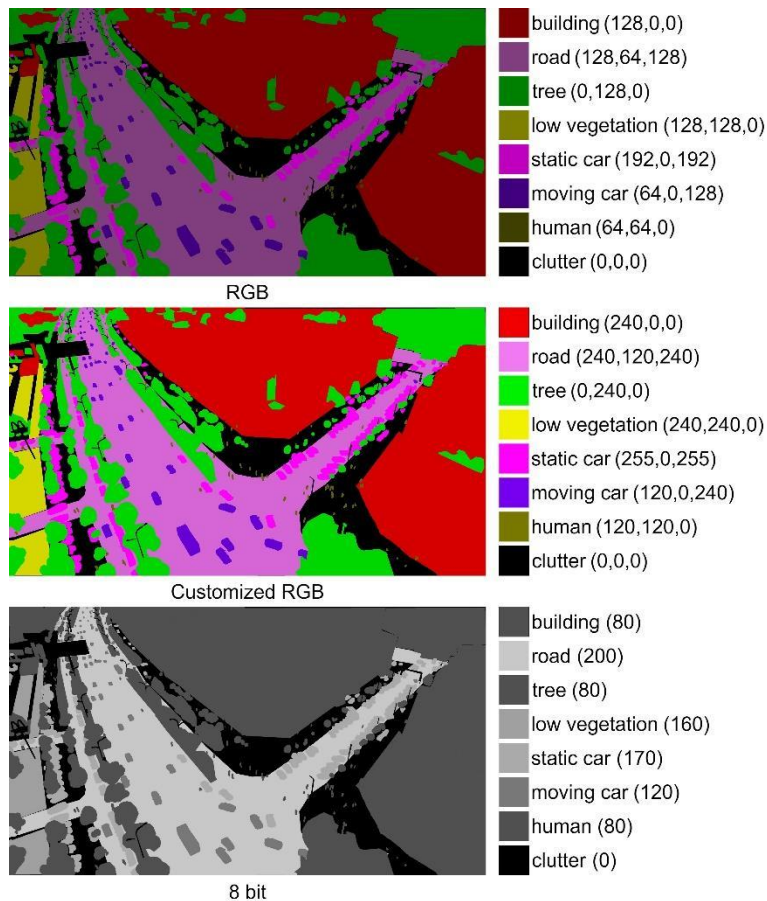


Figure 5. Pre-processing for Scenario-2

After all mask images were converted to 8-bit format, pixels with moving vehicle objects were assigned a value of “1”, pixels containing stationary vehicle objects were assigned a value of “2” and all other pixels were assigned a value of “0” by pixel-based value changing method. In this way, a multi-class segmentation structure with the least number of class labels was created. Result of the pixel-based value changing method for Scenario-2 is given in Figure 6.

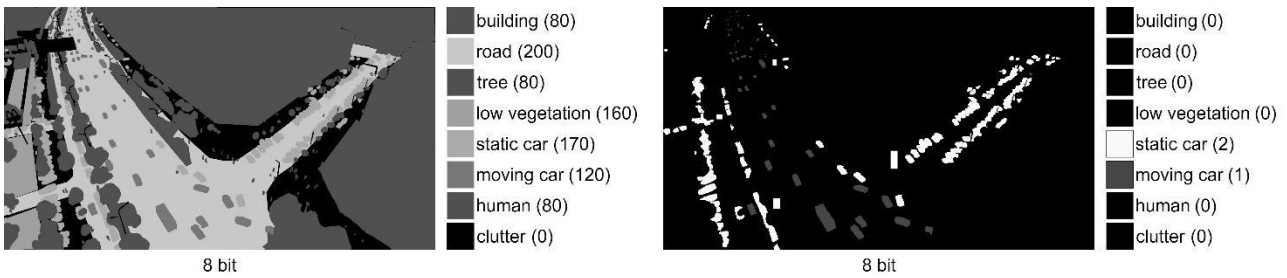


Figure 6. Pixel-based value changing method for Scenario-2

3.4. Image Cropping

As it is known, the resolution values of the dataset elements are not constant for all elements, and they are one of the values 3840x2160px or 4096x2160px. In addition, considering the hardware features we have, it is not possible to use it directly in model training without any action. In order to avoid this problem, resizing can be considered as a solution but as a result of this process, information loss in high resolution images will be quite high. Another approach is to split the image into sub-images. The resolution of the sub-images to be created is determined according to the input size value of the segmentation model that is planned to be used.

First to create a sub-image, the reference image to be cropped is determined. 3840x2160px image or 4096x2160px is cropped in a square format, starting from the first pixel, with edges on the X-axis of 256 pixels and the Y-axis of 256 pixels. This process is repeated until it covers the size values of the image. In Figure 7., the cropping process and numbering of rows and columns are given.

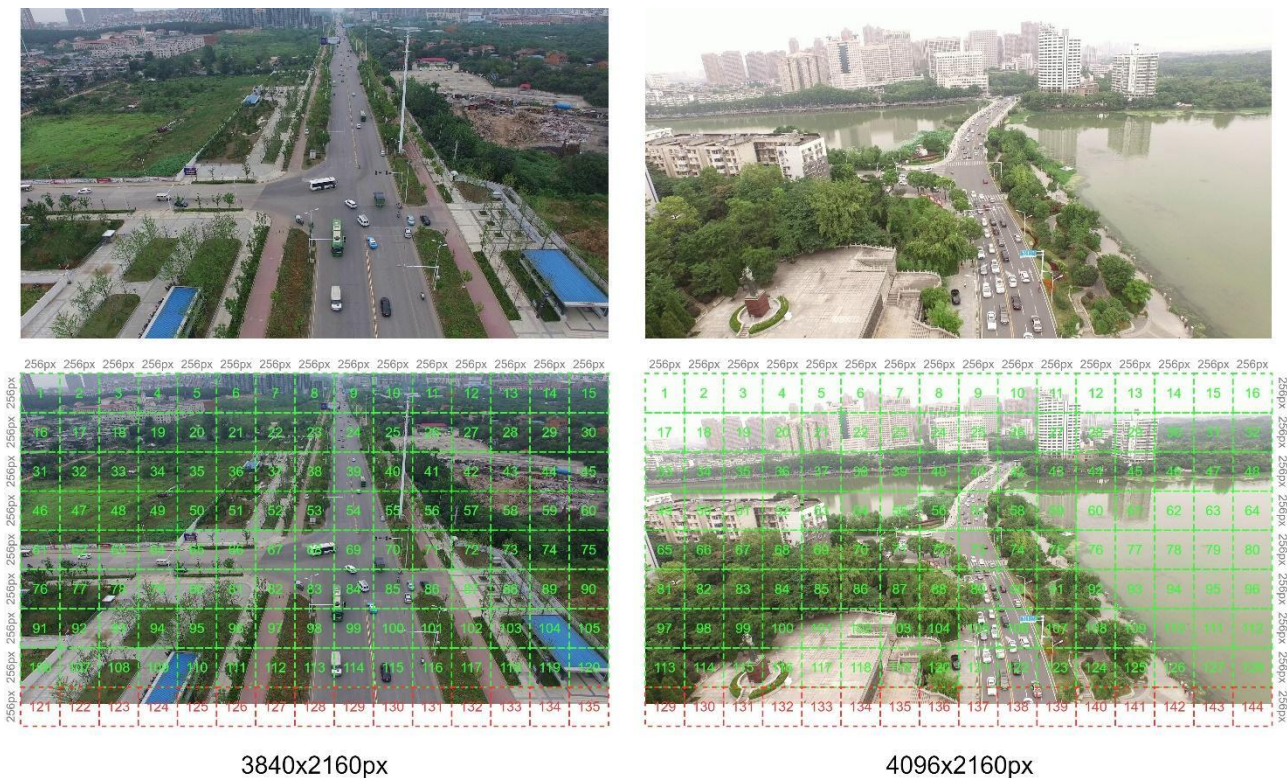


Figure 7. Image cropping method

When the sub-image division process is completed, two different sub-image types occur, which can complete the 256x256px size and cannot. In Figure 7., sub-images that can complete 256x256px are indicated in green, while images that cannot complete are indicated in red. The divided sub-images indicated in red may not be included in the model training by ignoring them but in order not to lose the information in these areas and to benefit from this

information in model training, it was ensured that the dimensions were changed to 256x256px by padding methods. The padding method applied for 3840x2160px images and its result are given in Figure 8.

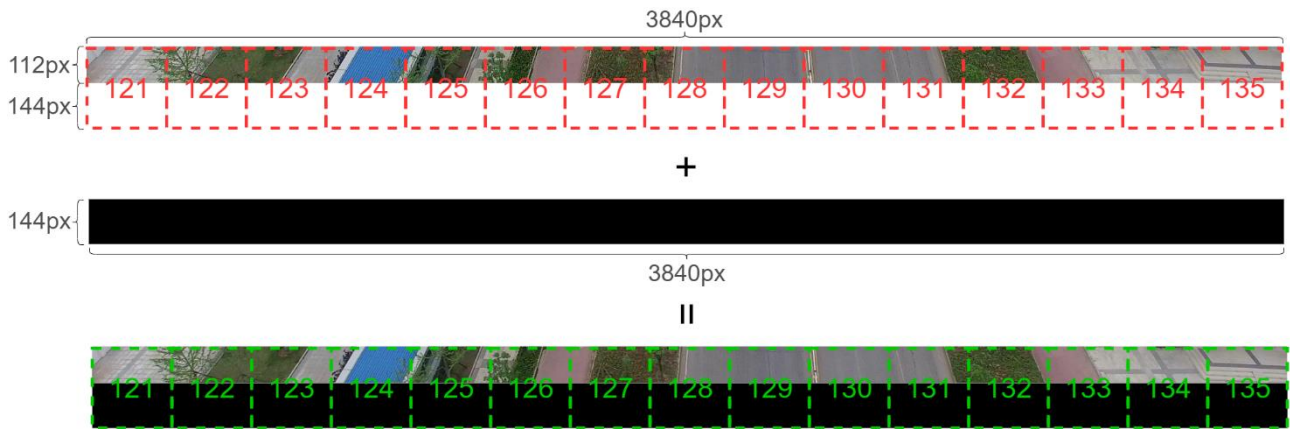


Figure 8. Padding methods for 3840x2160px images

The same procedures were applied for images with 4096x2160px size. The only difference is that the size of the added piece is 4096x144px. The result of the padding method applied for 4096x2160px images is given in Figure 9.



Figure 9. Padding methods for 4096x2160px images

When all steps were completed, an image of 3840x2160px was divided into 135 sub-images of 256x256px, and an image of 4096x2160px was divided into 144 sub-images of 256x256px. Since the same steps are applied to mask images, the specified numerical amounts are also valid for mask images. Examples of the padding method applied for mask images are given in Figure 10.

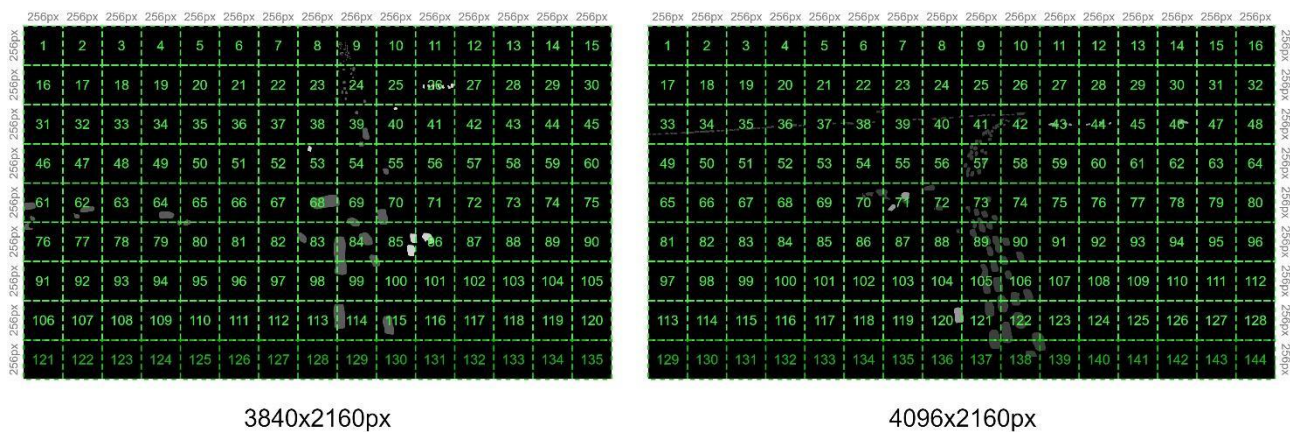


Figure 10. Image cropping and padding methods for masks

There are frames in which there is no meaningful information among the 256x256px size mask images. Samples defined as no meaningful information correspond to frames only with a pixel value of '0' and where the car object is not included. These frames can be detected by image-based pixel distribution calculation and may not be included in model training. If the specified process is realized, training time will be reduce, but it is not preferred because it will reduce the number of samples used in model training. After the image cropping process is completed, the samples counts are given in Table 2.

Table 2. Dataset samples counts

Resolution	Images (256x256px)	Masks (256x256px)
3840x2160px	22950	22950
4096x2160px	14400	14400

3.5. Data Splitting

Considering the unity of the images and mask images in the dataset, it was randomly divided into 70% train, 20% validation and 10% test. Data splitting is shown in Figure 11.



Figure 11. Data splitting

3.6. U-Net Model

U-Net is a kind of artificial neural network that contains a series of convolutional layers and non-convolutional layers. U-Net, which can be used in any semantic segmentation application today, is basically designed for biomedical images. U-Net gets its name from its architecture similar to the letter U, as can be seen in Figure 12.

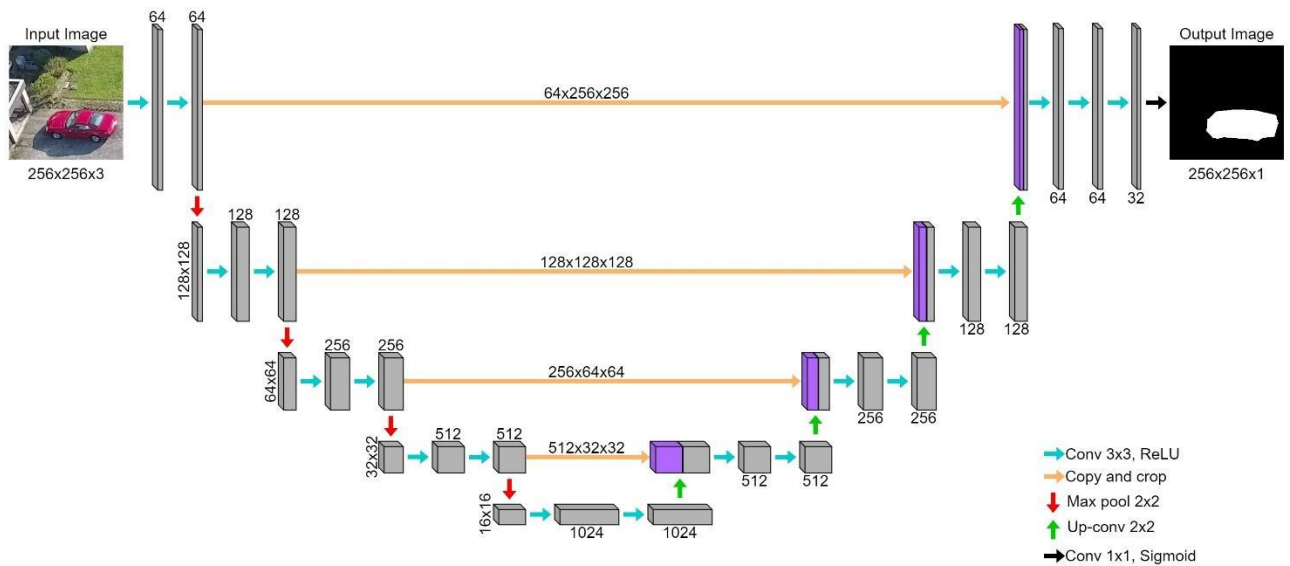


Figure 12. U-Net architecture

U-Net network architecture consists of a contracting path and an expansive path. The contracting path is called encoder network. The encoder network acts as a feature extractor and learns an abstract representation of the input image through a sequence of encoder blocks. The expansive path is called decoder network. Decoder network is used to take the abstract representation and create a semantic segmentation mask.

3.6.1 Encoder Network

Each encoder block consists of two 3×3 convolutions where each convolution is followed by a Rectified Linear Unit (ReLU) activation function. ReLU introduces non-linearity to the network, which helps to better generalize the training data. Then comes the 2×2 maximum pooling, in which the height and width of the feature maps are reduced by half. This reduces the calculation cost by reducing the number of trainable parameters.

3.6.2 Decoder Network

The decoder block starts with a 2×2 transposed convolution. It is then combined with the corresponding feature map from the encoder block. These links provide features from previous layers that are sometimes lost due to the depth of the network. Two 3×3 convolutions are then used, where each convolution is followed by a ReLU activation function. At the output of the final decoder, sigmoid is used for Scenario-1, while softmax activation function is used for Scenario-2.

3.7. Implementation Details

Our networks are implemented in Keras with a single Nvidia GPU Quadro P1000. Network designed for Scenario-1 is trained by binary cross entropy loss and is optimized using the Adam optimizer. Network designed for Scenario-2 is trained by categorical focal loss and is optimized using the Adam optimizer. For the both networks number of epochs is 100, batch size is 16 and learning rate is 0.001.

3.8. Evaluation Metrics

Predictions in artificial intelligence studies; It is evaluated in 4 categories: true positives (TP), false positives (FP), true negatives (TN), and false negatives (FN). These categories are also used in segmentation studies. In such studies, the most important success criterion is the similarity ratio, which is revealed by comparing the ground truth mask and the mask image estimated by the model. The methods used to calculate model prediction success in segmentation studies are based on pixel-based comparison. These methods include metrics such as pixel accuracy and jaccard index (codes available at github.com/OguzhanKATAR23).

3.8.1 Pixel Accuracy

Pixel Accuracy (PA) is the ratio of the overlapping and correctly predicted pixel values to the total number of pixels as a result of comparing the ground truth mask with the predicted mask. PA is calculated by the mathematical equation given in (1).

$$PA = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (1)$$

In Figure 13., the PA value components for a randomly selected test image and the mask image predicted by the model are given.

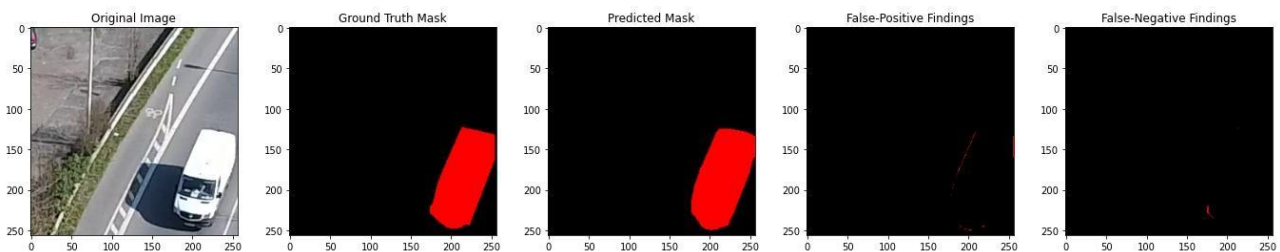


Figure 13. Pixel accuracy value components

PA seems useful due to its easy computation and complexity of performance metrics, but it can produce deceptive results. High resolution images may cause deceptive results as stated.

3.8.2 Jaccard Index

The Jaccard index, also called Intersection over Union (IoU), is an approach used to measure the percentage of overlap between the ground truth mask and the predicted mask. It is calculated by dividing the number of intersecting pixels in the compared masks by the number of union pixels. Its mathematical equation is given in (2).

$$IoU(A, B) = A \cap B / A \cup B \quad (2)$$

In Figure 14., the IoU value components for a randomly selected test image and the mask image predicted by the model are given.

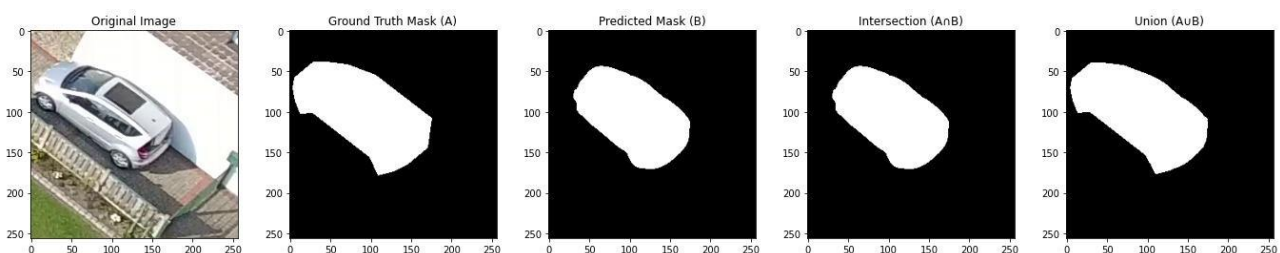


Figure 14. Intersection over Union value components

4. Experimental Results and Discussion

In this study, we developed a fully automatic method to provide vision ability to unmanned aerial vehicles. The model within the scope of Scenario-1, which was designed to mark only the pixels where the vehicle objects are located from the images obtained thanks to the cameras integrated into the unmanned aerial vehicles, was trained for 100 epochs with the help of the customized public dataset. As a result of this training, the mean IoU reached 84.3% and the related loss graph is given in Figure 15(a).

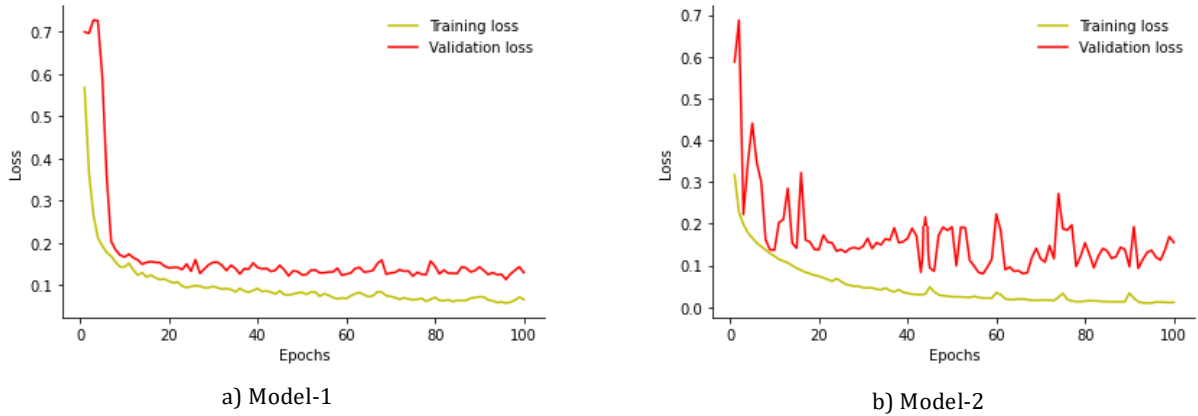


Figure 15. Loss graphs of Model-1 and Model-2

Before starting the model training within the scope of Scenario-1, the images that were allocated with 10% share during the test phase were randomly selected and used. The mask images predicted by the model using these images are given in Figure 16.

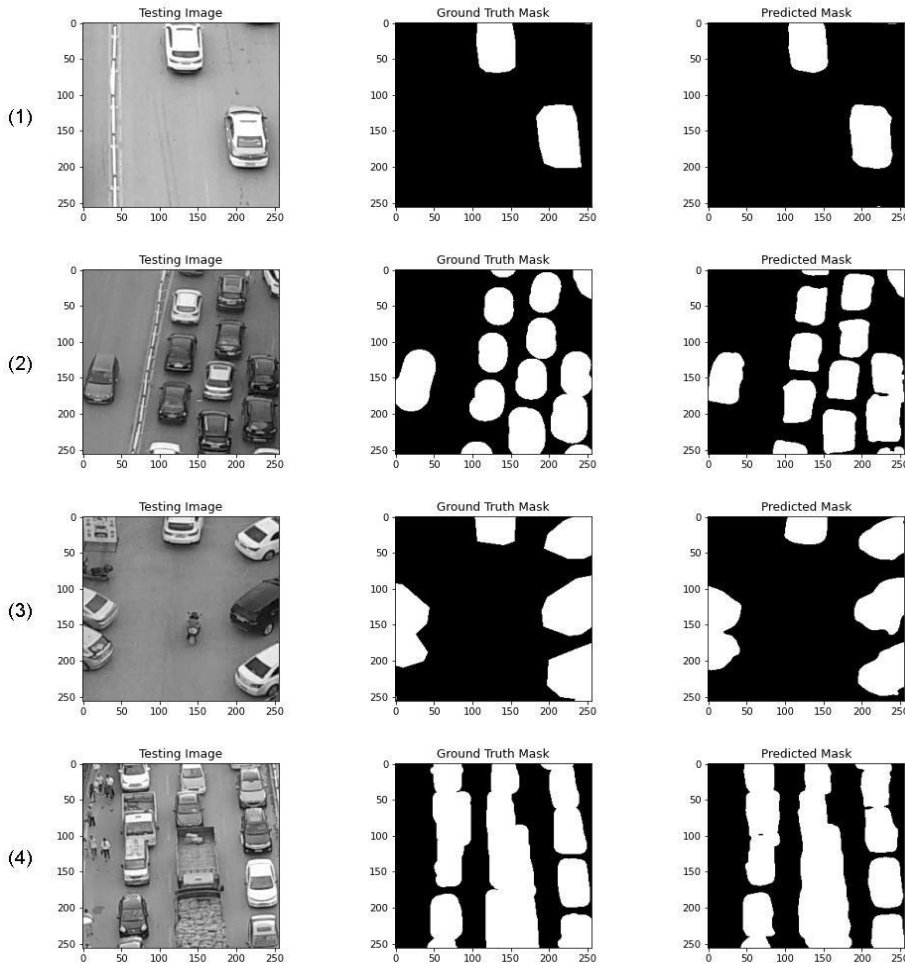


Figure 16. Test phase of Model-1

Table 3. contains the FP, FN, TP and TN values used in the calculation of the PA performance metric for each image given with the image sequence number in Figure 16.

Table 3. PA calculation for test phase of Model-1

Image Sequence Number	False-Positive (px)	False-Negative (px)	True-Positive (px)	True-Negative (px)	Pixel Accuracy (%)
1	90	85	7514	57847	99.73
2	920	1543	22745	40328	96.24
3	217	1117	15062	49140	97.96
4	341	955	30822	33418	98.02

Table 4. contains the intersection and union pixels values used in IoU performance metric for each image given with the image sequence number in Figure 16.

Table 4. IoU calculation for test phase of Model-1

Image Sequence Number	Intersection (px)	Union (px)	IoU (%)
1	7514	7689	97.72
2	22745	25208	90.22
3	15062	16396	91.86
4	30822	32118	95.96

In addition to the ability to detect the vehicle object and mark the location of the relevant vehicle objects on the image, Scenario-2 has been designed to give the unmanned aerial vehicles the ability to distinguish whether the detected vehicle object is moving or stationary. The model is trained for 100 epochs with the help of the customized public dataset. As a result of this training, the mean IoU reached 79.7% and the related loss graph is given in Figure 15(b).

Before starting the model training within the scope of Scenario-2, the images that were allocated with 10% share during the test phase were randomly selected and used. In this scenario, which is created with the multi-class segmentation method, the difficulty is higher than in Scenario-1. For this reason, misclassification may occur in the predicted mask images. The misclassified masks is given in Figure 17.

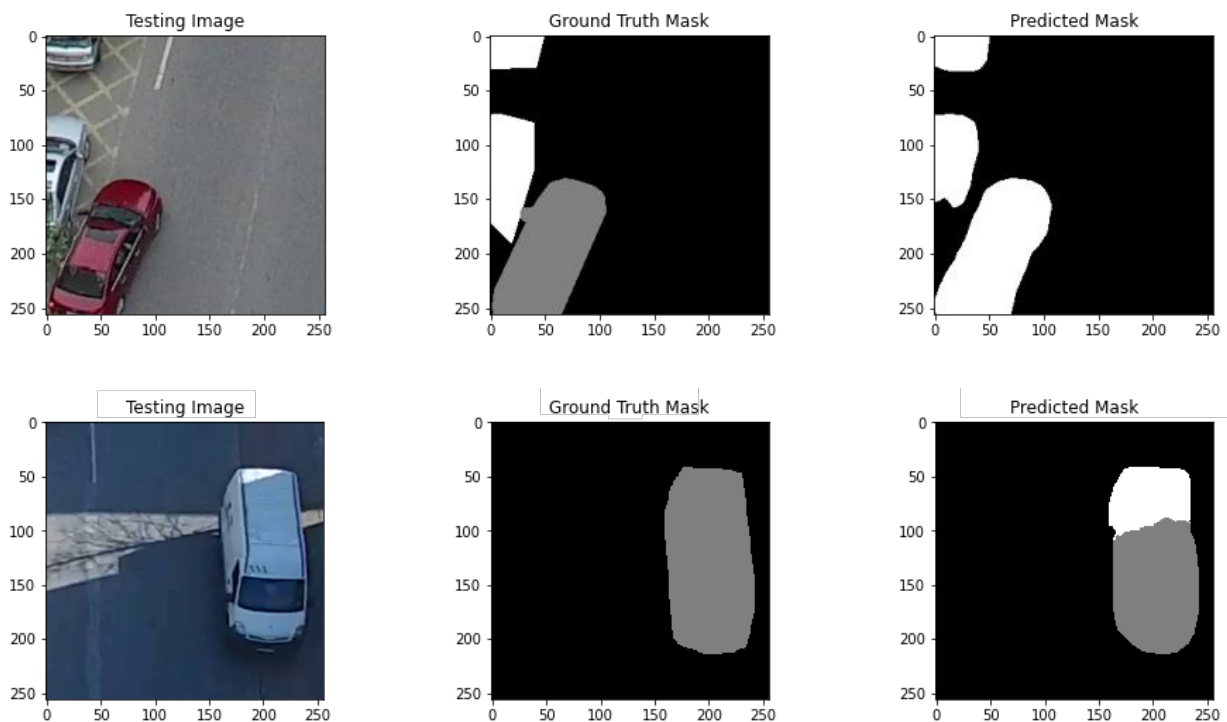


Figure 17. Misclassified mask samples

The images reserved for the test phase are given as input to the model. The masks predicted at the model output and ground truth masks are given in Figure 18.

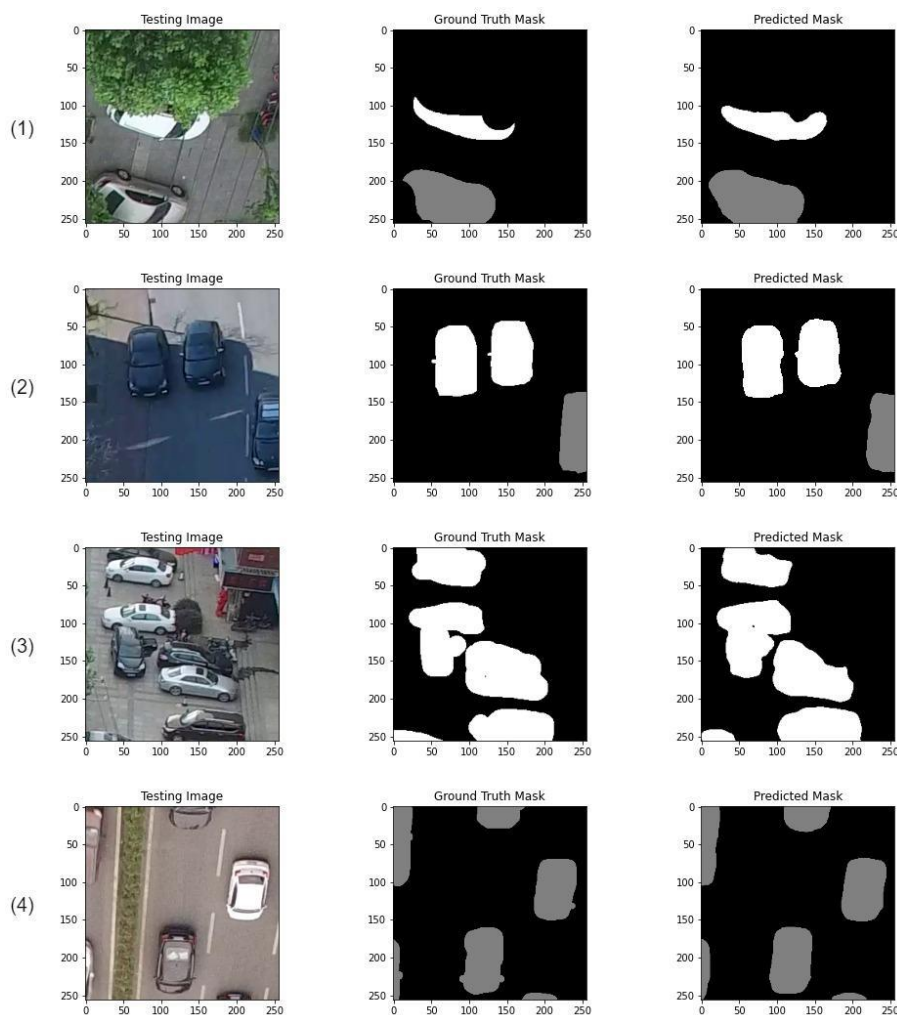


Figure 18. Test phase of Model-2

Table 5. contains the FP, FN, TP and TN values used in the calculation of the PA performance metric for each image given with the image sequence number in Figure 18.

Table 5. PA calculation for test phase of Model-2

Image Sequence Number	False-Positive (px)	False-Negative (px)	True-Positive (px)	True-Negative (px)	Pixel Accuracy (%)
1	1290	68	9216	54962	97.92
2	47	276	12377	52836	99.50
3	461	1321	20560	43194	97.28
4	319	185	13067	51965	99.23

Table 6. contains the intersection and union pixels values used in IoU performance metric for each image given with the image sequence number in Figure 18.

Table 6. IoU calculation for test phase of Model-2

Image Sequence Number	Intersection (px)	Union (px)	IoU (%)
1	9216	10574	87.15
2	12377	12700	97.45
3	20560	22342	92.02
4	13067	13571	96.28

When mask image prediction for high resolution images is requested by our trained models; firstly, the high-resolution image should be divided into sub-images of 256x256px sequentially. After the first step is completed, the images should be given as input to the model with the order that occurs when the images are divided into sub-images. This process should continue until the 256x256px sub-image in the last row. The predicted mask images for each sub-image should be combined using the same sequence number and the pixels added by the padding method should be dropped if there are any. Mask prediction method for high resolution images is given in Figure 19.

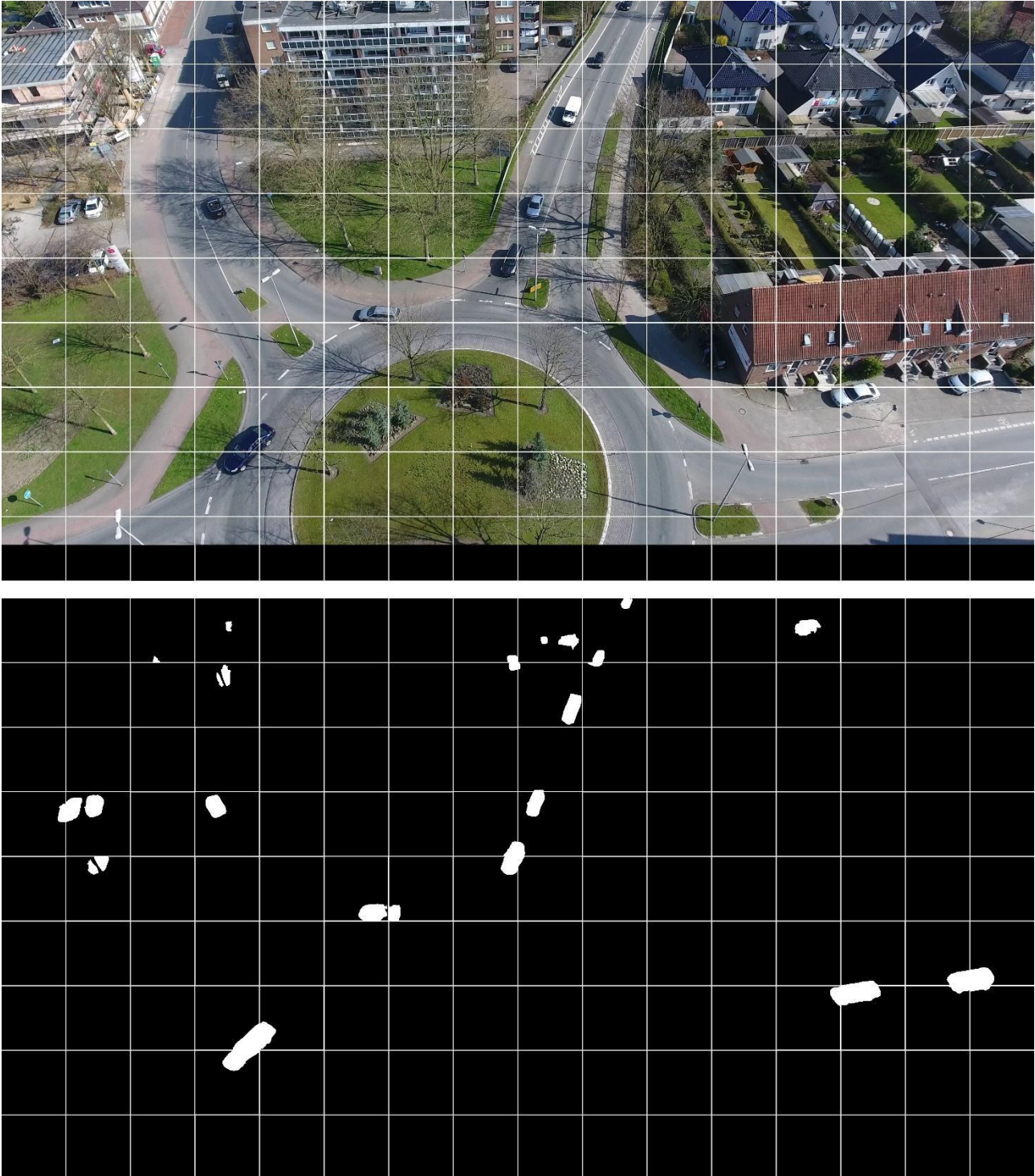


Figure 19. Mask prediction method for high resolution images

5. Conclusion

With the developments in artificial intelligence, the increase in the usage areas of autonomous systems has increased the tendency to add capabilities to unmanned aerial vehicles. In this study, an artificial intelligence-

based system was proposed to improve the vision features of unmanned aerial vehicles. A dataset available to researchers was customized for the scenarios included in this study. In this study, it is aimed to detect vehicle objects autonomously by the computer and to mark the relevant areas on a pixel basis with high IoU values. Indication of detected vehicle objects by pixel-based marking increases the sensitivity of detection. In addition to sensitivity, it is necessary to increase the number of dataset samples and the scope of samples in order to increase the prediction success of our models. For unmanned aerial vehicles that are planned to perform vital tasks such as military operations, the margin of error should be very low. Therefore, it will not be enough to increase the number and scope of dataset samples, but also the deep learning models used should be improved. The proposed system can be easily integrated into the technology used in the field of unmanned aerial vehicles today. Designing unmanned aerial vehicles with such autonomous capabilities in order to prevent possible losses by minimizing the human factor will create the future of the arms industry. Revealing similar studies can help researchers working on autonomous systems and computer vision.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Nonami, K., Kendoul, F., Suzuki, S., Wang, W., Nakazawa, D., 2010. *Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles*. Springer Science & Business Media.
- Boukoberine, M. N., Zhou, Z., Benbouzid, M., 2019. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*, 255, 113823.
- Howard, J., Murashov, V., Branche, C. M., 2018. Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety. *American journal of industrial medicine*, 61(1), 3-10.
- Shareef, M. A., Kumar, V., Dwivedi, Y. K., Kumar, U., Akram, M. S., Raman, R., 2021. A new health care system enabled by machine intelligence: Elderly people's trust or losing self control. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120334.
- Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Jawhar, I., Idries, A., Mohammed, F., 2020. Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119293.
- Kuru, K., 2021. Planning the future of smart cities with swarms of fully autonomous unmanned aerial vehicles using a novel framework. *IEEE Access*, 9, 6571-6595.
- Haulman, D. L., 2003. *US unmanned aerial vehicles in combat, 1991-2003*. AIR FORCE HISTORICAL RESEARCH AGENCY MAXWELL AFB AL.
- Xu, Y., Yu, G., Wu, X., Wang, Y., Ma, Y., 2016. An enhanced Viola-Jones vehicle detection method from unmanned aerial vehicles imagery. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(7), 1845-1856.
- Dargan, S., Kumar, M., Ayyagari, M. R., Kumar, G., 2020. A survey of deep learning and its applications: a new paradigm to machine learning. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(4), 1071-1092.
- Blumberg, S. B., Tanno, R., Kokkinos, I., Alexander, D. C., 2018. Deeper image quality transfer: Training low-memory neural networks for 3d images. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 118-125.
- Du, D., Qi, Y., Yu, H., Yang, Y., Duan, K., Li, G., Tian, Q., 2018. The unmanned aerial vehicle benchmark: Object detection and tracking. *European conference on computer vision*, 370-386.
- Mueller, M., Smith, N., Ghanem, B., 2016. A benchmark and simulator for uav tracking. *European conference on computer vision*, 445-461.
- Zhao, T., Nevatia, R., 2003. Car detection in low resolution aerial images. *Image and vision computing*, 21(8), 693-703.
- Ammour, N., Alhichri, H., Bazi, Y., Benjdira, B., Alajlan, N., Zuair, M., 2017. Deep learning approach for car detection in UAV imagery. *Remote Sensing*, 9(4), 312.
- Xu, Y., Yu, G., Wang, Y., Wu, X., Ma, Y., 2017. Car detection from low-altitude UAV imagery with the faster R-CNN. *Journal of Advanced Transportation*.
- Hinz, S., Stilla, U., 2006. Car detection in aerial thermal images by local and global evidence accumulation. *Pattern Recognition Letters*, 27(4), 308-315.
- Lyu, Y., Vosselman, G., Xia, G. S., Yilmaz, A., Yang, M. Y., 2020. UAVid: A semantic segmentation dataset for UAV imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 165, 108-119.



COĞRAFI BİLGİ SİSTEMİ TABANLI ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ KULLANILARAK TAŞKIN TEHLİKE HARİTALAMASI

Can Bülent KARAKUŞ^{1*}, Şeyma CEYLAN DEMİREL¹

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mimarlık, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Taşkın, Taşkın Tehlike Haritalaması, Coğrafi Bilgi Sistemi, Analitik Hiyerarşi Süreci.</i>	<p>Bu çalışmanın amacı; çalışma alanı olarak seçilmiş olan Sivas kent merkezi ve yakın çevresinin taşkın riskini ortaya koymaktır. Çalışmada taşkın risk haritalaması için 8 adet kriter (eğim, yükseklik, bakı, yağış, büyük toprak grubu, akarsulara uzaklık, litoloji ve arazi kullanımı) seçilmiştir. Bu kriterler çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan Analitik Hiyerarşi -Süreci (AHS) yöntemi temelinde Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanılarak analiz edilmiş ve taşkın açısından riskli alanlar belirlenmiştir. AHS yöntemi kapsamında taşkın tehlike haritalamasında dikkate alınan kriterler için CR (Tutarlılık) değeri 0.03 olarak hesaplanmış olup, bu değer elde edilen sonuçların tutarlı ve kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Yöntem çerçevesinde oluşturulmuş olan taşkın tehlike haritasının ortaya koyduğu risk kategorileri “çok yüksek (% 12.72)”, “yüksek (% 24.40)”, “orta (% 28.14)”, “düşük (% 25.40)” ve “çok düşük (% 11.32)” şeklinde 5 farklı sınıf ile temsil edilmiştir. Çalışma alanındaki yerleşim alanlarının bir kısmı (% 25.20) ile tarım alanlarının bir kısmı (% 47.28), taşkın riski açısından “çok yüksek” riskli alanlar kategorisinde yer almıştır. Elde edilen sonuçlar; taşkın risklerinin azaltılmasında CBS tabanlı AHS yönteminin karar vericilere oldukça faydalar sağlayabileceğini göstermiştir. Taşkın risklerinin azaltılmasına yönelik olarak taşkın risk verileri kent planlarına yansıtılmalı ve plan uygulamalarına taşkın riskinin derecesine göre öncelik verilmelidir.</p>

FLOOD HAZARD MAPPING USING THE GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM BASED ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS

Keywords	Abstract
<i>Flood, Flood Hazard Mapping, Geographic Information System, Analytical Hierarchy Process.</i>	<p>The aim of this study is to reveal the flood risk of Sivas city center and its immediate surroundings, which was chosen as the study area. In the study, 8 criteria (slope, elevation, aspect, precipitation, large soil group, distance to rivers, lithology and land use) were selected for flood risk mapping. These criteria were analyzed using the Geographical Information System (GIS) on the basis of the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which is one of the multi-criteria decision-making methods, and areas at risk for flooding were determined. The CR (Consistency) value was calculated as 0.03 for the criteria considered in flood hazard mapping within the scope of the AHP method, and this value showed that the results obtained were consistent and acceptable. The risk categories revealed by the flood hazard map created within the framework of the method are “very high (12.72%)”, “high (24.40%)”, “medium (28.14%)”, “low (25.40%)” and “very low (11.72%).” was represented by 5 different classes. Some of the residential areas (25.20%) and some of the agricultural areas (47.28%) in the study area were included in the category of “very high” risky areas in terms of flooding. The results showed that GIS-based AHP method can provide great benefits to decision makers in reducing flood risks. In order to reduce flood risks, flood risk data should be reflected in city plans and plan implementations should be given priority according to the degree of flood risk.</p>

* İlgili yazar / Corresponding author: bkarakus@cumhuriyet.edu.tr, +90-346-219-1560

Alıntı / Cite

Karakuş, C.B., Ceylan Demirel, Ş., (2022). Coğrafi Bilgi Sistemi Tabanlı Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanılarak Taşkın Tehlike Haritalaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1155-1173.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

C.B. Karakuş, 0000-0002-7373-9960
Ş. Ceylan Demirel, 0000-0002-5151-4429

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	28.12.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	10.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	30.06.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Taşkınlar, önemli yağış olayları sırasında su seviyesinin nehir kıyıları, gölleri, barajları veya bentleri aştığı zaman meydana gelen bir hidrometeorolojik bir doğal afettir (Luu vd., 2018). Taşkınlar, insan yaşamını etkileyen ve dünya çapında ciddi ekonomik hasarlara neden olan, en çok tekrarlanan ve en yıkıcı doğal afetler arasındadır (Khan vd., 2011). Taşkın, toprağı sular altında bırakan ve tarım arazilerine, kentsel alanlara zarar verebilecek ve hatta can kaybına yol açabilecek bir su taşmasıdır (Huang vd., 2008; Veerbeek ve Zevenbergen, 2009). Taşkınlar, çok yoğun yağışların neden olduğu akış sularının membadan mansaba doğru hızla birikmesi ve salıverilmesi nedeniyle meydana gelmektedir. Hidrolojik ve doğal afetler biliminde önemli bir yer tutan taşkınlar, etkilenen insan sayısı ve ölüm oranları açısından doğal afetler arasında en üst sıralarda yer almaktadır (Ouma ve Tateishi, 2014).

Drenaj havzasının şekli, drenaj eğimi ve arazinin topografyası gibi fiziksel özellikler ile yağış, depolama ve kayıplar ve yüzey tutma, buharlaşma ve sızma gibi hidrolojik özellikler ve insan faaliyetlerinden kaynaklanan olaylar, taşkınların yoğunluğu ve süresini en çok etkileyen faktörlerdir. (Abdi, 2006). Bu faktörlerin anlaşılması ve farklı bölgelerde sınıflandırılması, taşkın yönetiminin ve risklerin azaltılması noktasında önemlidir. (Razavi, 2008).

İnsan toplumunun günümüz yüzyılında karşılaştıkları en önemli ve zorlu olaylardan biri iklim değişikliğidir. Küresel ısınma olarak bilinen iklim değişikliği, yeryüzü sıcaklığının artışına ve yağış özelliklerinin değişmesine sebep olmaktadır (Oğuz ve Akın, 2019). İklim değişikliğinin başlamasıyla taşkın yoğunluğu ve sıklığı dünyanın birçok bölgesini tehdit edecek, gelecekte taşkın riskleri potansiyel bir tehlike oluşturacaktır (Jonkman ve Dawson, 2012). Küresel iklim değişikliğinin etkileri; iklim kuşaklarının kayması, hava sıcaklıklarında artışların olması, buzulların erimesi, buzulların erimesine bağlı deniz seviyelerinde yükselme olarak bilirse de bu etkenlerin beraberinde getirdiği şiddetli fırtınalar ve yağışlar, taşkın olaylarının şiddetinde ve sıklığında artışa neden olmaktadır (Oğuz vd., 2022). Öngörülen iklim değişikliği senaryoları altında, aşırı hidrolojik olaylar ve taşkın risklerinin özellikle önemli olması ve zamanla artması muhtemeldir. HadCM3 iklim modeline göre; küresel taşkın riski, küresel iklim değişikliğinin olmadığı bir duruma kıyasla 2050'de yaklaşık % 187 artacaktır (Arnell and Gosling, 2016). Taşkın tehlikeleri, diğer doğal afetlere kıyasla dünya nüfusunun en büyük oranını (% 45) etkilemiş olup, 2000 ile 2017 yılları arasında 5.424 kayıtlı ölüme neden olmuştur (CRED, 2018). Coğrafi olarak, gelecekteki taşkın riskinde en büyük artışın Asya, Amerika ve Avrupa'da olacağı tahmin edilmektedir. En hızlı kentleşmenin yaşandığı Asya şehirlerinde yaşayan nüfus, 2070'li yıllara kadar özellikle kıyı taşkınlarına maruz kalacağı ve taşkın tehditlerine karşı son derece savunmasız olacağı öngörülmektedir (Hanson vd., 2011).

Taşkınlar, modern teknoloji ve bilgi sistemleri kullanılarak doğru bir şekilde izlenebilmektedir. Taşkın haritalama; risk yönetimini, gerçek zamanlı tahminleri ve arazi kullanımı ve arazi örtüsü yönetimini kolaylaştırarak bu tür olaylar için karar vermeyi destekleyebilmektedir. Taşkınların çok boyutlu dinamik olay olması nedeniyle CBS/Uzaktan Algılama (UA) verileri, su basmış alanların kapsamını keşfetmek için büyük kolaylık sağlamaktadır (Swain vd., 2020).

Kıyaslanamaz kriterler içeren karmaşık karar problemlerini analiz etmek için çok kriterli karar analizi (ÇKKA) yöntemleri gereklidir. ÇKKA'nın temel amacı, en iyi seçimi bulmak için sınırlı sayıda kriter altında sınırlı sayıda karar alternatifinin öznel değerlendirmesini destekleyen matematiksel araçların tasarımıdır (Sener vd., 2011). Taşkın oluşumunu etkileyen faktörlerin her biri, bu faktörlerin her birinin etkisi nedeniyle önceliklendirilebileceğinden, havzada taşkın oluşma riskinde farklı bir role sahiptir (Ghezelsoufloo ve Hajibigloo, 2020). Mekânsal modelleme ve doğal taşkın analizinde birleştirilmiş ÇKKA-CBS yaklaşımları yaygın olarak kullanılmıştır (Malczewski, 2006; Scheuer vd., 2011; Paquette ve Lowry, 2012; Solin, 2012; Koem ve Tantane, 2020; Cai vd., 2021; Ramkar ve Yadav, 2021;). Bu yaklaşımlar temel olarak ölçüt standardizasyonu, sınıflandırma prosedürü ve mekânsal analize dayalı olarak faktörlerin ağırlıklarının belirlenmesini kapsayan mekânsal çok kriterli karar analizi şemasını dikkate almaktadır (Feloni vd., 2020).

Mevcut duruma ve gelecek yıllara göre tahmin edilmiş olan taşkın riski senaryolarında, taşkınların potansiyel tehlikeleri ve riskleri hakkında doğru mekânsal ve zamansal bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır (Ouma ve Tateishi,

2014). Taşkın haritalama, taşkın risk yönetiminin çok önemli bir unsurudur. Genellikle taşkın tehlike haritaları, tehlikelerin coğrafi kapsamına ve aşırı bir olayın olasılığına dayalı olarak sel riski düzeylerini nitelendirmek için kullanılır. Taşkın tehlike bölgesi haritaları, taşkınların doğasını ve insan yaşamı üzerindeki etkilerini belirlemek için değerli bir araçtır. Taşkın tehlike haritaları imar planlarının oluşturulmasında, şehrin gelecekteki gelişiminin planlanmasında ve ayrıca altyapı, drenaj ve taşkın drenajının geliştirilmesi gereken alanların belirlenmesinde etkili bir araç olabilir (Ghezelsoflo ve Hajibigloo, 2020). Bu yöntem aynı zamanda hem afet riski hem de kırılabilirlik endeksleri için gösterge ağırlıklarının atanmasında ve ayrıca taşkın risk değerlendirme modellerindeki faktörlerin derecelendirilmesinde etkilidir (Orencio ve Fujii, 2013). CBS tabanlı AHS, dünya çapında taşkın tehlikesi olan alanları belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yağış düzeni, eğim, drenaj, yükseklik ve arazi kullanım türleri gibi bazı morfolojik ve hidrometeorolojik faktörler, belirli yerel topluluklar ve kültürel miras alanlarında gelecekteki taşkın riskinin tahmininde yaygın olarak göz önünde bulundurulmaktadır (Armenakis ve Nirupama, 2014).

Ülkemizde son 60 yılda (1955-2014) 2.563 taşkın meydana gelmiş olup 1.500'e yakın can kaybı yaşanmıştır. Mevcut veriler itibari ile taşkınlardan kaynaklanan ekonomik kayıp her yıl yaklaşık 100 milyon \$'dır (Tokgözlü ve Özkan, 2018). 1950-2019 yılları arasında meydana gelen sel/su baskını olaylarının dağılımında Erzurum 440 olayla ilk sırada yer almaktadır. Bunu 319 olayla Sivas, 265 olayla Van ve 247 olayla Bitlis takip etmektedir. Buna karşın Yalova, Kilis ve Uşak gibi illerde ise oldukça az sayıda sel/su baskını olayı meydana gelmiştir. Ülkemizde batıdan doğuya ve güneyden kuzeye gidildikçe sel/su baskını olaylarının artış gösterdiği söylenebilir. 1950-2019 Türkiye'de meydana gelen sel/su baskını olaylarının toplam sayısı 6833'tür (URL-1).

Literatürde CBS-AHP yöntemine dayalı olarak taşkın riski potansiyelinin belirlenmesine yönelik olarak çok sayıda çalışma (Tablo 1) bulunmaktadır. Bu çalışmalar, benzer yöntemlerin farklı bölgelerdeki uygulamalarını içermektedir. Bu çalışma, taşkın potansiyelinin belirlenmesinde dikkate alınan kriterlerin bölgesel ölçekte (çalışma alanı) değerlendirilmesine yönelik bir yöntem sunması ve bu konuda literatürdeki diğer çalışmalara destek olması açısından önemlidir. Bu çalışmada; eğim, yükseklik, bakı, yağış, büyük toprak grubu, akarsulara uzaklık, litoloji ve arazi kullanımı kriterleri dikkate alınarak CBS tabanlı AHS yöntemi yardımıyla Sivas kent merkezi ve yakın çevresinin yer aldığı Kızılırmak Havzası'ndaki lokasyonlar için taşkın tehlike haritası oluşturularak çalışma alanının taşkın riski potansiyeli belirlenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Review)

Taşkın tehlike haritalaması, taşkın risk yönetiminin çok önemli bir unsurudur. Genellikle taşkın tehlike haritaları, tehlikelerin coğrafi kapsamına ve aşırı bir olayın olasılığına dayalı olarak taşkın riski düzeylerini nitelendirmek için kullanılır. Bu yöntem aynı zamanda hem afet riski hem de kırılabilirlik endeksleri için gösterge ağırlıklarının atanmasında ve ayrıca taşkın risk değerlendirme modellerindeki faktörlerin derecelendirilmesinde etkilidir (Orencio ve Fujii, 2013). Dünya çapında taşkın tehlikesi olan alanları belirlemek için CBS tabanlı AHS yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır (Tablo 1). Yağış modelleri, eğim, drenaj, yükseklik ve arazi kullanım türleri gibi bazı morfolojik ve hidrometeorolojik faktörler, belirli yerel topluluklar ve kültürel miras alanlarında gelecekteki taşkın riskinin tahmininde yaygın olarak göz önünde bulundurulmaktadır (Armenakis ve Nirupama, 2014; Lanza, 2003).

Tablo 1. Taşkın tehlikesi değerlendirmeleri: göstergelere ve yöntemlere genel bakış (Flood hazard assessments: an overview of indicators and methods, Kittipongvises vd., 2020)

Taşkın Tehlike Değerlendirmeleri	Taşkın Göstergeleri	Yöntemler
Don Nehri Havzası, Büyük Toronto Bölgesi, Kanada (Armenakis ve Nirupama, 2014)	Akarsulara uzaklık, en yakın drenajın üzerindeki yükseklik, eğim ve eğri numarası	Çok kriterli analiz, CBS-AHS yöntemi
Malda Bölgesi, Batı Bengal, Hindistan (Ghosh ve Kar, 2018)	Jeomorfolojik ve hidrolojik değişkenler (yükseklik, eğim, yeryüzü şekli kategorileri, nehirden uzaklık, yağış düzeni, nehir birleşiminden uzaklık)	CBS-AHS yöntemi
Gülistan Eyaleti, İran (Safaripour vd., 2012)	Drenaj, tepe gölgesi, taşkın yoğunluğu, arazi tipi, eğim, erozyona duyarlılık	CBS ağırlıklandırma/bindirme teknikleri
Xerias Akışı, Yunanistan (Bathrellos vd., 2017)	Eğim, yükseklik, akarsulardan uzaklık, arazi kullanımı ve hidrolotolojik oluşumlar	CBS-AHS yöntemi/Çoklu tehlike haritalama

Atina Havzası, Yunanistan (Bathrellos vd., 2016)	Eğim, yükseklik, akarsulardan uzaklık, arazi örtüsü ve hidrolotolojik oluşumlar	CBS-AHS yöntemi
Mert Nehri Havzası, Samsun, Türkiye (Demir ve Kisi, 2016)	Su yüzeyi profilleri, akarsu ağı, akış yolları	Hidrolojik Mühendislik Merkezi Nehir Analiz Sistemi (HEC-RAS)
Arno Nehri, İtalya (Manfreda vd., 2011)	Alan, eğim, drenaj yoğunluğu, akış yoğunluğu	Sayısal Yükseklik Modeli
Sucevita Havzası, Romanya (Hapciuc vd., 2016)	Eğim, profil eğriliği, toprak dokusu, arazi kullanımı, litoloji	CBS-AHS yöntemi
Kültürel Miraslar, Tayvan (Wang, 2013)	Yağış, eğim, yükseklik, deniz seviyeleri, gelgitler	CBS/taşkın eğilimli uyarı
UNESCO (Cigna vd., 2018)	Taşkınların akarsu ve kıyı jeolojik göstergeleri, yeraltı suyu taşkınlarına duyarlılık, madencilik tehlikesi	Kantitatif analiz

Das (2018) tarafından yapılan çalışmada; Vaitarna havzasında (Maharashtra/Hindistan) taşkına karşı daha yüksek hassasiyete sahip riskli bölgeleri belirlemek için yükseklik, eğim, akarsudan uzaklık, yağış, akış birikimi, arazi kullanımı, jeoloji, topografik nemlilik indeksi ve eğrilik gibi kriterler dikkate alınmıştır. AHS yöntemi ile bu kriterlerin bağlı ağırlıkları belirlenerek CBS yazılımı yardımıyla nihai taşkın haritası hazırlanmış ve taşkın potansiyeli çok yüksek olan bölgeler tespit edilmiştir. Elde edilmiş olan taşkın tehlike haritasına göre; Vaitarna havzasındaki toplam alanın yaklaşık % 20'sinin çok yüksek bir taşkın olasılığına sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada önerilen CBS tabanlı AHS yönteminin, taşkın tehlike haritalama için doğru bir sonuç verme yeteneğine sahip olduğu ve taşkın tehlikesinin yönetimi ve önlenmesi için dünyanın diğer bölgelerine kolayca uygulanabileceği vurgulanmıştır. Hammami vd. (2019), taşkın açısından tehlikeli bölgelerin mekânsal dağılımını belirlemek için 8 kriter dikkate almıştır. Araştırmacı, CBS tabanlı AHS yöntemini kullanarak taşkın duyarlılık haritası oluşturmak üzere Taşkın Tehlike İndeksi (FHI)'ni hesaplamıştır. Araştırmacı; FHI'ya dayalı taşkın açısından riskli alanları çok düşük (% 2.85), düşük (% 7.5), orta (% 17.95), yüksek (% 20.63) ve çok yüksek (% 51.06) olarak kategorize etmiştir. Araştırmacının sonuçlarına göre, taşkın etkilerini sınırlamak ve kentsel bölgeyi su basmasına karşı korumak için bu araştırmanın bir temel oluşturabileceği vurgulanmıştır. Chakraborty ve Mukhopadhyay (2019) tarafından yapılan çalışma, Coochbehar bölgesi (Bangladeş)'nintaşkın tehlike haritası hazırlamak için CBS tabanlı AHS yöntemini kullanmıştır. Araştırmada çalışma alanının doğu, güneydoğu, güney, orta ve kuzey-orta kesimlerinin taşkın açısından riskli bölgeler olduğu vurgulanmıştır.

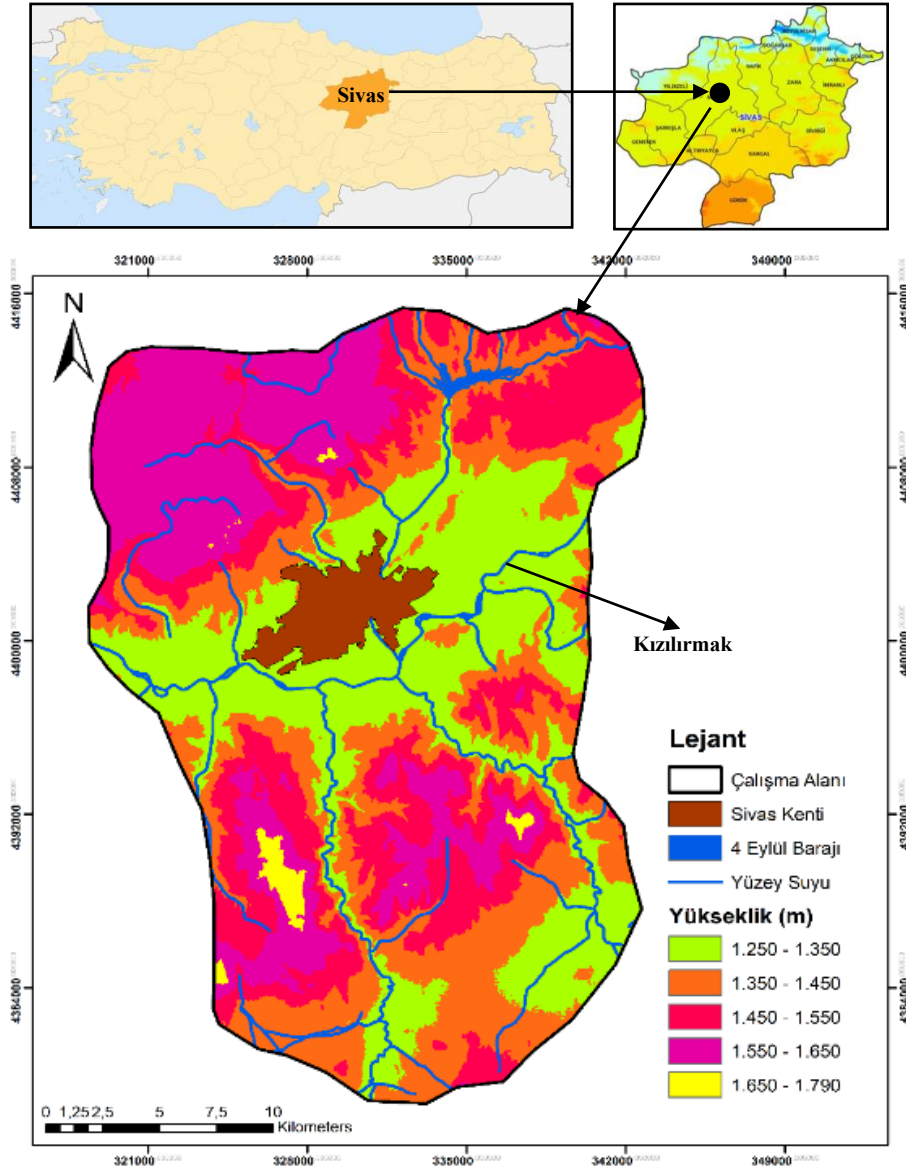
Topdağ (2003) tarafından yapılmış olan tez çalışmasında; Sivas ili çevresinin sel ve taşkın riski açısından incelenmesi ve konuya ilişkin alınması gereken önlemlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada çalışma alanında meydana gelen taşkınların; yağışların düzensiz ve ani olmasına, yağış alanı büyüklüğüne, yörenin topografik ve akaçlama (drenaj) yapısına, toprak bileşimine ve üzerindeki bitki örtüsüne, akan suyun yatak kapasitesine bağlı olarak meydana geldiği vurgulanmıştır. İstatistiksel hesaplamalara dayalı yapılan bu çalışmada, Sivas ilinde taşkın olasılığının Mayıs, Haziran, Eylül, Ekim ve Kasım aylarında daha yüksek olabileceği belirtilmiştir. Şengün vd. (2019) tarafından yapılan başka bir çalışmada; CBS tabanlı ÇKKV Yöntemleri ve UA tekniği kullanılarak Tavşanlı deresi (Hafik/Sivas) havzasında taşkın sırasında zarar görecekt muhtemel riskli bölgeler belirlenmiştir.

Çalışma alanı akarsu taşkın alanı üzerinde bulunmakta olup, yapılan literatür araştırmalarında; CBS tabanlı AHS yöntemine dayalı olarak çalışma alanı ile ilgili taşkın tehlike haritalamasına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, çalışmanın sonuçları taşkın konusunda yetkili kurum ve kuruluşlara önemli katkılar sunma noktasında oldukça önemlidir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

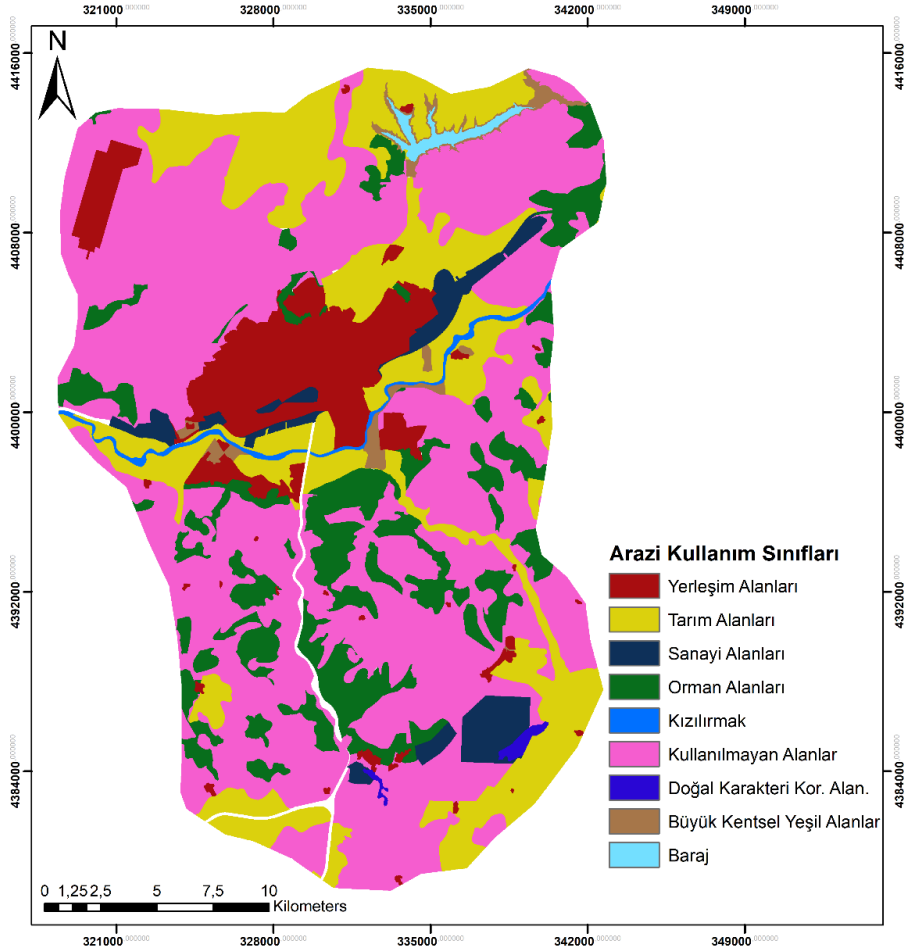
Büyük bir kısmı İç Anadolu Bölgesi'nin doğusunda, daha küçük bölümleri ise Karadeniz ve Doğu Anadolu Bölgelerinde yer alan Sivas ili, 28488 km²'lik yüzölçümü ile Türkiye'nin toprak bakımından 2. büyük ilidir. Topraklarının büyük bölümü Yukarı Kızılırmak, bir bölümü de Yeşilirmak ve Fırat havzalarında yer almaktadır. Sivas ili, 35°-50' ve 38°-14' doğu boylamları ile 38°-32' ve 40°-16' kuzey enlemleri arasındadır. Çalışma alanı 677.22 km²'lik alanı ile Sivas kenti planlama sınırı içerisinde kalmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer buldur ve yükselti haritası (Locate and elevation map of the study area)

Çalışma alanının deniz seviyesinden yüksekliği genellikle 1250-1790 m arasında değişmektedir. Çalışma alanı genel olarak kent merkezinin kuzeydoğusuna ve güney-güneydoğusuna doğru yükselen bir yapı göstermektedir. Çalışma alanında düz ve düze yakın (0 -5) alanlar en yüksek dağılıma (% 49.6) sahiptir. 335.84 km²'lik bir alan kaplayan bu alanlar kent merkezi çevresi ile kentin güneyinde yoğunlaşmaktadır (HGM, 2005). Araştırma alanının % 21.42'ünü kaplayan alüvyal toprakların büyük kısmı Kızılırmak çevresi ile Kızılırmak nehrinin kolları çevresinde yer almaktadır. Kahverengi topraklar, araştırma alanında en yaygın olarak görülen toprak grubudur. Araştırma alanının 315.8 km²'sini oluşturan kahverengi topraklar doğal bitki örtüsü, kısa ot ve çalılardan ibarettir. Araştırma alanı sınırları içerisindeki en önemli su kaynakları; Kızılırmak ve kolları olan Yıldız Irmağı, Kalın Irmağı, Tecer Irmağı, Fadlım Irmağı ve Mısmırlırmak'tır (HGM, 2005). Çalışma alanının jeolojik yapısı ağırlıklı olarak çakıltı-kumtaşı-çamurtaşı şeklindedir. Alanda aktif fay hattı bulunmamaktadır (MTA, 2005). Şekil 2, çalışma alanının mevcut arazi kullanımı durumunu göstermektedir. Çalışma alanında alan kullanım büyüklüğü açısından en fazla dağılıma sahip arazi kullanım türü "kullanılmayan alanlar" sınıfı olup, bu alanlar çalışma alanının % 60.8'ini oluşturmaktadır. Çalışma alanında "kullanılmayan alanlar" sınıfından sonra en fazla dağılıma sahip arazi kullanım türleri sırasıyla "tarımsal alanlar (% 20,68)", "orman alanları (% 12.55)", "yerleşim alanları (% 9.30)"dır. Çalışma alanında en düşük dağılıma sahip arazi kullanım sınıfları da "doğal karakteri korunacak alanlar (% 0.26)", "baraj (% 0.54)", "Kızılırmak nehri (% 0.72)", "kentsel yeşil alanlar (% 1.26)", "sanayi alanları (% 3.18)" olarak sıralanmıştır (MPGM, 2015). Sivas, İç Anadolu Bölgesi'nin en soğuk ilidir. Kışlar soğuk, yazlar ise sıcak ve kurak geçer. Yaz dönemi kısadır. Yaz ve kış mevsimleri ile gündüz ve gece arasındaki sıcaklık farkları yüksektir. Yazın 40 °C'ye ulaşan sıcaklık, kış mevsiminde -33°C'ye kadar düşmektedir (Karakuş ve Demiroğlu, 2022). Sivas il sınırları içerisinde bulunan akarsular; Kızılırmak, Yıldız Irmağı, Kalın Irmağı, Mısmırlırmak, Fadlım Irmağı, Tecer Irmağı, Acı Irmak, Acısu Irmağı, Kelkit Çayı, Tozanlı Irmağı, Yılanlı Çayı, Balıklı Tohma Çayı, Tohma Çayı ve Hurma Çayı"dır.

Sivas il sınırları içerisindeki bazı akarsuların yıllık ortalama debileri; Kızılırmak 39,42 m³ /sn, Yıldız Irmağı 11,30 m³ /sn, Kalın Irmağı 1,77 m³ /sn, Tecer Irmağı 2,90 m³ /sn, Kelkit Çayı 50,33 m³ /sn, Tohma Çayı 3,78 m³ /sn, Mısmırlamak 1,21 m³ /sn ve Fadlım Irmağı 3,0 m³ /sn'dir (Atmaca, 2004).



Şekil 2. Çalışma alanına ait mevcut arazi örtüsü ve kullanımı haritası (Current land cover/use map of the study area, MPGM, 2015)

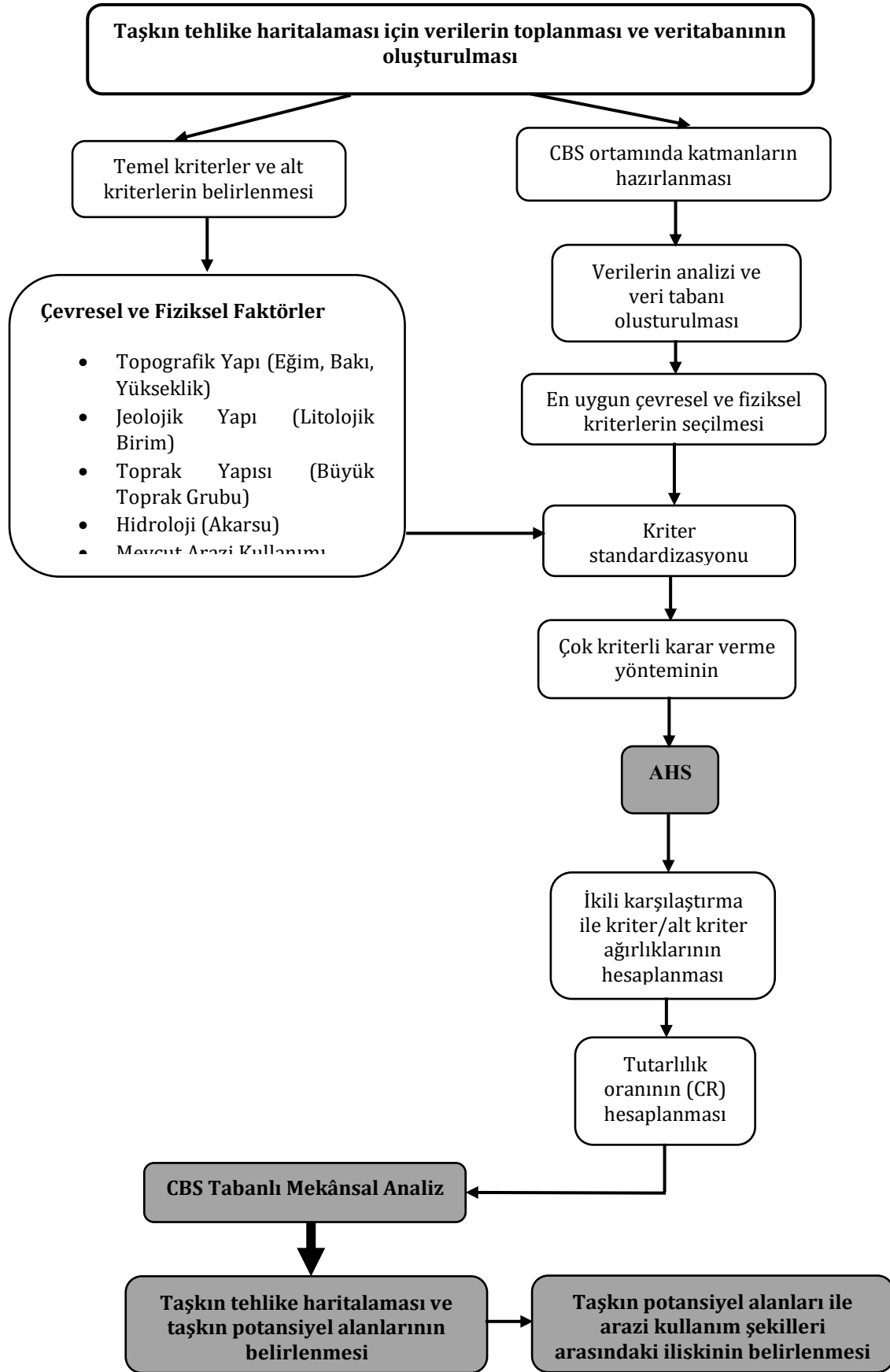
3.2. Veri Temini ve Yazılımlar (Data Supply and Software)

Bu çalışmada, çalışma alanına ait sayısal veriler 1/25.000 ölçekli olarak ilgili kurumlardan temin edilmiştir. Eğim, baki, yükseklik ve yüzey suyu kriterini içeren vektör veriler Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM, 2005) (Ankara/Turkey); yağış verileri Sivas Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden (SMİM, 2020); büyük toprak grupları kriterini içeren toprak verileri (KHGM, 2001) Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan (Ankara/Turkey); litolojik yapı kriterini içeren jeoloji verileri (MTA, 2005) Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nden (Ankara/Turkey) ve mevcut arazi kullanımı kriterini içeren veriler (MPGM, 2015) ise Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'ndan (Ankara/Turkey) temin edilmiştir. Harita formatındaki sayısal veriler CBS veri tabanı formatında (.shp), yağış verileri ise Excel formatında temin edilmiştir. Yağış verilerinden oluşturulmuş olan yağış haritası ve temin edilmiş tüm sayısal haritalar ortak bir harita projeksiyonu (UTM 37N) ve datum (ED50) formatına dönüştürülmüştür. Çalışmada kullanılan tüm kriterlere ait göreceli ağırlık değerlerinin belirlenmesi için extAHP 2.0 yazılımı; tüm kriterlere ait sınıflandırılmış haritaların ve AHS yöntemine dayalı taşkın tehlike haritasının oluşturulması ve taşkın alanları ile arazi kullanım şekilleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi için de ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılmıştır.

3.3. Yöntem (Method)

Çalışmada uygulanacak olan yöntemin akış diyagramı Şekil 3'de görülmektedir. Bu çalışmada uygulanan yöntemin ilk aşaması; CBS tabanlı AHS yöntemine dayalı olarak taşkın potansiyeline sahip alanların belirlenmesidir. Çalışma yönteminin ikinci aşaması ise; çalışma alanındaki taşkın açısından riskli alanlar ile arazi kullanım şekilleri

arasındaki ilişkinin ortaya konulmasıdır. Şekil 3'de görülen yöntemin aşamaları aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 3. Yöntemin akış diyagramı (Flow chart of the method)

Taşkın tehlike haritasının oluşturulması ve taşkın açısından riskli alanların belirlenmesi için öncelikli olarak AHP yöntemi yardımıyla ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. İkili karşılaştırma matrisi; taşkın konusunda yapılmış olan literatür çalışmaları (Kazakis vd., 2015; Dash ve Sar, 2020; Ouma ve Tateishi, 2014; Rahmati vd., 2016; Hategekimana vd., 2018), uzmanların ve akademisyenlerin görüşleri dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılmış olan AHP yöntemine göre taşkın tehlike haritalamasında dikkate alınan 8 adet kriter, Tablo 3'deki değerler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Saaty (1980) tarafından önerilen AHP değerlendirme ölçeğine (Tablo 2) göre; tüm uzmanların 8 adet kriteri birbirleriyle karşılaştırarak değerlendirme yapmaları istenmiştir. Tüm kriterler arasında uzmanların yapmış olduğu ve literatür araştırmalarından elde edilmiş olan ikili karşılaştırmaların geometrik ortalama değerleri kullanılarak bir ölçütün (kriterin) diğerine karşılık gelen karşılaştırma matrisine girilmiştir (Tablo 5). 8 adet kriter, taşkın tehlike haritalaması ve taşkın açısından riskli alanların belirlenmesi açısından uygunluk değer aralıklarına (Tablo 4) göre sınıflandırılmış ve bu 8 adet kriterin sınıflandırılmış raster haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4). Çalışma kapsamındaki taşkın tehlike haritalaması için kullanılmış olan kriterlere ve alt kriter puanlamalarına ilişkin bilgiler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmış olup, tüm kriterler taşkın riski açısından 5 sınıflı olarak değerlendirilmiştir.

3.3.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

AHS, her kriterin göreceli ağırlığını belirlemek için kullanılan ikili karşılaştırmalara dayalıdır. Çok kriterli problemlerde karar verme işlemi, karar vericilere dayalı öznel bir işlemdir (Kontos vd., 2005). Bu teknik, öznel olarak daha kolay değerlendirilen ve daha kolay kavranabilen alt sorunların bir hiyerarşisi içerisinde problemlerin ayrıştırılmasını sağlayan bir araçtır. Öznel değerlendirmeler, sayısal bir ölçek şeklinde sıralanan sayısal değerlere dönüştürülmektedir (Bhushan ve Rai, 2004). AHS'nin temelinde ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması yer almaktadır.

İkili karşılaştırma matrisi bir karar aşamasına gereksinim duymaktadır. İkili karşılaştırmaların oluşturulmasında kararları açıklamak için 1 ile 9 arasında değişen bir ölçek kullanılmaktadır; 1 değeri eşit önemi ifade ederken 9 değeri en önemliyi ifade etmektedir (Saaty, 1980). Karşılaştırma matrisinde her bir faktörün önem değerini belirleyebilmek için Tablo 2'de verilen Saaty (1980) tarafından geliştirilmiş olan önem dereceleri ölçeğinden yararlanılmaktadır.

Tablo 2. Analitik hiyerarşi süreci değerlendirme ölçeği (Analytical hierarchy process rating scale, Saaty, 1980)

Önem Değerleri	Değer Tanımları
1	Her iki faktörün eşit öneme sahip olması durumu
3	1. faktörün 2. faktörden daha önemli olması durumu
5	1. faktörün 2. faktörden çok önemli olması durumu
7	1. faktörün 2. faktöre nazaran çok güçlü bir öneme sahip olması durumu
9	1. faktörün 2. faktöre nazaran mutlak üstün bir öneme sahip olması durumu
2,4,6,8	Ara değerler

Her kriterin ağırlığı belirlenmekte, kriter ağırlıklarının ağırlıklı vektör toplamına bölünmesiyle bir tutarlılık vektörü belirlenmekte, bununla beraber tutarlılık oranının tahmin edilmesiyle karşılaştırmaların tutarlılığı kontrol edilebilmektedir. Daha sonra aşağıdaki denkleme göre tutarlılık indeksi (CI) belirlenmektedir (Yal ve Akgün, 2013).

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (1)$$

Burada; λ = tutarlılık vektörünün ortalama değeri ve n = kriter sayısıdır.

Eğer ikili karşılaştırma matrisi bir tutarlı matris ise $\lambda = n$ olarak verilmektedir ve $\lambda = n$ kararsızlık derecesinin bir ölçümü olarak tanımlanabilmektedir. Rastgele Değer İndeksinin (RI) Tutarlılık İndeksine (CI) bölünmesiyle tutarlılık derecesini ölçmek için Tutarlılık Oranı (CR) belirlenebilmektedir. Kullanılan kriter sayısına göre RI değerleri Tablo 3'de gösterilmiştir. RI, karşılaştırılan elemanların sayısına bağlıdır. $CR < 0.1$ koşulu tutarlılığın kabul edilebilir bir derecesini gösterir, $CR \geq 0.1$ koşulu ise kararsızlığı göstermektedir (Yal ve Akgün, 2013). Saaty (1980) tarafından önerilen bu yöntemle hesaplanan tüm karşılaştırmaların CR değerleri 0.1'den düşükse bu uygunluğu göstermektedir (Eastman, 2003). CR değerleri 0.1'den büyük olduğu zaman yeniden bir değerlendirme yapılmalıdır (Shahabi vd., 2014).

Tablo 3. Rastgele İndeks (RI) tablosu ([Random Index (RI) table, Saaty, 1980])

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.58

3.3.2. Kriter Standardizasyonu, Puanlama ve Haritalama (Criteria Standardization, Scoring and Mapping)

Her bir kriterin göreceli ağırlığının ayarlanma süreci kriter standardizasyonu olarak bilinmektedir. Bu işlemde kriter standardizasyonu için normal olarak 0-1, 0-10 veya 0-100 arasındaki değerler kullanılmaktadır. İkili karşılaştırma tekniği sıra değerlerinin standardize edilmesi ve puanlaması için kullanılmaktadır. Standartlaştırma işlemiyle; orijinal değerler ortak uygunluk değerlerine dönüştürülmektedir. Standartlaştırma işlemiyle bir kıstas ölçeğinin diğeriyle karşılaştırılabilir olması sağlanmaktadır (Hansen, 2005). Doğrusal dönüşüm, bir puanlama ve sıralama sistemi gibi geleneksel standardizasyon yöntemleri; sınırlayıcı ve belirleyici düzeyleri ölçmek için kullanılmaktadır (Liu vd., 2014).

Bu çalışmada; eğim, yükseklik, bakı, yağış, büyük toprak grubu, akarsulara uzaklık, litoloji ve arazi kullanımı kriterleri taşkın tehlike haritalaması için çevresel ve fiziksel kriterler olarak dikkate alınmıştır (Şekil 3). Tablo 4'de verilmiş olan literatür bilgilerine dayalı olarak; bu kriterler, taşkın tehlike haritalamasındaki etki düzeyine göre alt kriterlere ayrılmış ve her bir alt kritere 1 ile 5 arasında puanlar verilmiştir (Tablo 4). Taşkın tehlike haritalamasında kullanılmış olan 5, 4, 3, 2 ve 1 puanları taşkın riski açısından sırasıyla "çok yüksek", "yüksek", "orta", "düşük" ve "çok düşük" kategorilerine karşılık gelmektedir (Swain vd., 2020; Radwan vd., 2019). Çalışmada yapılmış olan puanlama ve AHS ile yapılmış olan kriter ağırlıklandırma işlemi, bu çalışmada kaynak olarak kullandığımız literatürlere, konuyla ilgili akademisyen ve uzman görüşüne göre uygulanmıştır. Kriter ağırlıkları, alt birimler ve o birimlere ait değerler belirlendikten sonra ArcGIS 10.8 programının Spatial Analyst (Mekansal Analiz) modülü yardımıyla kriterlere ait tematik haritalar, kriterlerin taşkın tehlike haritalamasındaki etki düzeyi puanlarına göre yeniden sınıflandırılmıştır (Şekil 4). Sınıflandırılmış haritalar ve kriterlerin taşkın tehlike haritalamasındaki etki düzeyleri açısından belirlenmiş olan uzman görüşlerine dayalı geometrik ortalama değerleri, CBS tabanlı AHS yazılımı yardımıyla değerlendirilerek çalışma alanına ait taşkın tehlike haritası elde edilmiştir (Şekil 5).

Tablo 4. Seçilen ana kriterler, alt kriterler ve alt kriterlerin puanları
(Selected main criteria, sub-criteria and scores of sub-criteria)

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Puan	Taşkın Riski	Kaynak
Eğim (°)	0-2	5	Çok Yüksek	Kazakis vd., 2015
	2-5	4	Yüksek	Dash ve Sar, 2020
	5-15	3	Orta	Mahmoud ve Gan, 2018
	15-35	2	Düşük	
	35-65,8	1	Çok Düşük	
Yükseklik (m)	1250-1350	5	Çok Yüksek	Sözer vd., 2018
	1350-1450	4	Yüksek	Dölek ve Avcı, 2017
	1450-1550	3	Orta	Bathrellos vd., 2017
	1550-1650	2	Düşük	
	1650-1790	1	Çok Düşük	
Bakı	Düz	5	Çok Yüksek	Oğuz vd., 2016
	Kuzey, Kuzeybatı, Kuzeydoğu	4	Yüksek	Özcan, 2017
	Güney, Güneydoğu, Güneybatı	2	Düşük	
	Batı, Doğu	1	Çok Düşük	
Yağış (mm)	432 - 441	5	Çok Yüksek	Ouma ve Tateishi, 2014
	420 - 432	4	Yüksek	Hammami vd., 2019
	405 - 420	3	Orta	
	390 - 405	2	Düşük	
	372 - 390	1	Çok Düşük	
Büyük Toprak Grubu	[Kırmızımsı Kahverengi Topraklar, Alüvyal Topraklar]	5	Çok Yüksek	Dölek ve Avcı, 2017
	Hidromorfik Topraklar	4	Yüksek	Sengun vd., 2019
	Kahverengi Topraklar	3	Orta	
	Kolüvyal Topraklar	1	Düşük	
Akarsulara Uzaklık (m)	0-250	5	Çok Yüksek	Tella ve Balogun, 2020
	250-500	4	Yüksek	Bathrellos vd., 2017
	500-750	3	Orta	Tüzgen ve Karaca, 2021
	750-1000	2	Düşük	
	> 1000	1	Çok Düşük	
Litoloji	Alüvyon	5	Çok Yüksek	Sengun vd., 2019
	[Kireçtaşı, Alüvyon Yelpazesi, Traverten, Yamaç Molozu-Birikinti Konisi, Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı]	4	Yüksek	Işık vd., 2020
	Jips	3	Orta	

	[Piroklastik Kaya, Andezit- Bazalt, Volkanit-Çökelkaya Kumtaşı-Çamurtaşı, Çakıltaşı- Kumtaşı-Çamurtaşı]	2	Düşük	
	Ofiyolitik Kaya	1	Çok Düşük	
Arazi	Su Yapıları	5	Çok Yüksek	Hammami vd., 2019
Kullanımı	[Yapay Arazi Kullanımı (Sanayi, Büyük Kentsel Yeşil Alanlar, Yerleşim Alanları)]	4	Yüksek	Mahmoud ve Gan, 2018 Işık vd., 2020
	Tarım Alanları	3	Orta	
	Kullanılmayan Alanlar	2	Düşük	
	[Orman ve Doğal Karakteri Korunacak Alanlar]	1	Çok Düşük	

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

4.1. Kriter-Alt Kriter Puanlama ve Haritalandırma (Criterion-Sub-Criteria Scoring and Mapping)

Eğim (Slope)

Eğim, taşkına yatkın olan yüzey bölgelerinin önemli bir göstergesidir. Eğim, su akışının hızını ve süresini belirlemede önemli bir faktördür. Daha düz yüzeyde su daha yavaş hareket etmekte, daha uzun süreyle toplanmakta ve birikmektedir. Bu nedenle bu alanlar daha dik yüzeylere göre taşkın oluşumu açısından daha risklidir (Gigović vd., 2017). Taşkın değerlendirmesinde eğim parametresi yüzey akışını ve sızma miktarını etkiler. Düşük eğime sahip alanlar suyun durgunlaşmasına ve taşkınlara sebep olabilir (Kazakis vd., 2015; Dash ve Sar, 2020).

Çalışma alanının eğimi 0° ile 65,5° arasında değişmektedir. Şekil 4a; taşkın riski açısından çok yüksek (0°-2°), yüksek (2°-5°), orta (5°-15°), düşük (15°-35°) ve çok düşük (35°-65,8°) olmak üzere beş ana sınıfa ayrılan çalışma alanı eğim sınıflarını göstermektedir. Her sınıf, çalışma alanının sırasıyla % 29.8, % 19.8, % 33.8, % 12,8 ve % 3,9'unu kapsamaktadır. Eğimi % 0-2 (5 puan ile) arasında olan alanlar taşkın açısından potansiyel alanlar olup, bu alanların daha çok Sivas kent merkezi ve yakın çevresi ile çalışma alanının güneydoğusunda yer aldığı ve en fazla alansal değere (% 29.8) sahip olduğu görülmektedir. "Çok düşük" (35°-65,8°) taşkın riski kategorisine sahip eğimli alanların (1 puan ile), çalışma alanında en az alansal değere (% 3.9) sahip olduğu görülmektedir. Bu alanlar, çalışma alanının daha çok güneyinde ve doğusunda dağılım göstermiştir. Genel olarak; çalışma alanının kuzeyi-güneyi ile Sivas kent merkezinin de bulunduğu çalışma alanının orta kesimleri arasında en fazla eğim farkı bulunmaktadır (Tablo 4, Şekil 4a). Bu durum, yüzey akışı ve sızma ile ilgili olarak arazi yapısının başka bir gösterimini sağlamaktadır. Bu nedenle; herhangi bir hafif eğim, aşırı su baskını olaylarından daha fazla alanın etkilenmesine neden olabilmektedir (Radwan vd., 2019).

Yükseklik (Elevation)

Yükseklik parametresi; taşkın yayılımı, akış yönü kontrolü ve taşkın derinliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Düşük rakım ve eğim değerlerinde taşkın duyarlılığının yüksek olması beklenmektedir (Sözer vd., 2018; Souissi vd., 2020). Bu kriter, taşma yönünün hareketini ve suyun derinliğini kontrol etmede anahtar role sahiptir (Stieglitz vd., 1997). Yüksek rakımda yer alan bölgelerin genellikle su basması olasılığı daha düşükken, düşük yükseklikteki bölgeler daha yüksek hassasiyete sahiptir. Su, daha yüksek bir yerden alt bölgeye doğru akma eğilimindedir ve bu nedenle, düz yüzeyli alt bölgelerde taşkın meydana gelme olasılığı daha yüksektir (Das ve Pardeshi, 2018).

Taşkın riski açısından "çok yüksek" kategoride yer alan 1250-1350 m yükseklik aralığına sahip alanlar (5 puan ile) çalışma alanının % 32.9'unu kapsamaktadır ve bu yükseklik aralığındaki alanlar daha çok Sivas kent merkezi ve yakın çevresinde, çalışma alanının güneyinde ve güneydoğusunda görülmektedir. Taşkın riski açısından "çok düşük" kategoride yer alan 1650-1790 m aralığındaki yükseklik değerleri (1 puan ile), genellikle çalışma alanının güneybatısında görülmekte ve bu yükseklik aralığındaki alanlar çalışma alanının % 0.8'ini kapsamaktadır (Tablo 4, Şekil 4b).

Baki (Aspect)

Baki parametresi, Kuzey Yarım Küre'de kuzey yamaçlarında güneşlenme süresi daha kısa olduğundan buharlaşma miktarı ve karın yerde kalma süresi üzerinde etkili olabilmektedir. Bunun yanı sıra düşen yağışın yüzeyel akışa geçmesinde etkili olabilecek bir parametredir. Taşkın değerlendirmesinde baki parametresinin etkisi düz veya

düze yakın alanların taşkın açısından yüksek riskli sahalar olmasından kaynaklanır. Bu alanlar yağışın ve suyun birikebileceği alanlardır (Dölek, 2015).

Taşkın riski açısından “çok yüksek” kategoride yer alan düz (5 puan ile) bakı grubu çalışma alanında en az dağılıma (% 6.7) sahiptir ve bu bakılar daha çok kent merkezi yakın çevresinde yoğunlaşmaktadır. Çalışma alanında en fazla alansal dağılıma (% 35.6) sahip bakı grubu güney-güneydoğu-güneybatı bakıları olup bu bakı grubu (2 puan ile) taşkın riski açısından “düşük” kategoride yer almaktadır (Tablo 4, Şekil 4c).

Yağış (Rainfall)

Yağışlar, buzul bölgeleri dışında yüzey suyunun tek kaynağıdır. Yağışların nehir deşarjı ile önemli bir ilişkisi vardır ve taşkın oluşumunu doğrudan kontrol eder. Bir bölgede beklenmeyen yağışlar, yarı kurak bölgelerde ani taşkın durumunu tetikleyebilir (Das, 2018). Akarsuların fazla suyu taşıma kapasitesine sahip olmadığı durumlarda, taşkınlar yaygın olarak yoğun yağışlar sonucu meydana gelir. Hemen toprağa sızamayan su, eğimden aşağı doğru akar. Şiddetli yağışlar nedeniyle nehirlerde veya göllerde su seviyesi yükselir. Su seviyesi nehir kıyılarının veya barajların üzerine çıktığında, su taşmaya başlar ve bu nedenle nehir kaynaklı taşkınlara neden olur. Sular nehir, göl veya barajların bitişiğindeki alanlara taşarak sel veya taşkınlara neden olur (Ouma ve Tateishi, 2014).

Çalışma alanına ait yağış haritasının oluşturulması için ArcGIS 10.8 yazılımında yer alan Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi (IDW) kullanılmıştır. Sivas il sınırları içerisinde yer alan 9 meteoroloji istasyonuna (Sivas Merkez, Kangal, Suşehri, Zara, Divriği, Gemerek, Gürün, Şarkışla, Ulaş) ait 1970-2020 yılları arasındaki 50 yıllık ortalama toplam yağış verileri kullanılarak Sivas il sınırını kapsayan yağış haritası elde edilmiştir. Çalışma alanı sınırı içerisinde bir meteoroloji istasyonu (Sivas Merkez) bulunmakta olup, Sivas il sınırı için oluşturulmuş olan yağış haritası çalışma alanı sınırına göre kesilerek çalışma alanına ait yağış haritası (Şekil 4d) elde edilmiştir. Çalışma alanı için belirtilen yöntemle oluşturulmuş olan yağış haritasına göre yıllık ortalama yağış değerleri 390 mm ile 441 mm arasında değişmektedir. Taşkın riski açısından; “çok yüksek” kategoride yer alan yağış değerlerine (5 puan ile) sahip alanlar çalışma alanında en fazla dağılıma (% 41.5) sahip iken, “çok düşük” kategoride yer alan yağış değerlerine (1 puan ile) sahip alanlar çalışma alanında % 8.3'lük bir dağılım göstermiştir. Yağışın en düşük olduğu alanlar çalışma alanının güneyinde bulunmaktadır. Yağışın en yüksek olduğu alanlar ise Sivas kent merkezi ve yakın çevresinin de yer aldığı bölge olan çalışma alanının orta kısımları ve kuzey kısımlarıdır (Tablo 4, Şekil 4d). Çalışma alanında yoğun yağış alan bölgeler, taşkın tehlikesi açısından riskli bölgeler sınıfında yer alabilmektedir.

Büyük Toprak Grubu (Great Soil Group)

Toprak parametresi, yağışın akıştaki etkisini tolere edebilen önemli bir faktördür. Toprak türüne göre sızdırma ve havalandırma kapasitesi de değişmekte olup, taşkınların şiddet ve etkisini belirli oranda azaltıp arttırabilmektedir (Tokgözlü, 2018). Etkili bir şekilde, her bir toprak tipinin dokusu ve yapısı, geçirgenliklerini ve dolayısıyla su depolama kapasitelerini önemli ölçüde etkileyebilir (Hammami vd., 2019). Yüzey akışının killi topraklarda kumlu topraklara göre daha hızlı ve daha fazla olması muhtemeldir. Geçirimsiz toprakların çoğu, onları taşmaya eğilimli hale getiren kilden oluşurken, kumdan oluşan topraklar geçirgendir ve büyük miktarda yüzey suyunu emebildikleri için nispeten kolay süzülür. Genel olarak toprak tipi toprağa sızabilecek su miktarını kontrol edebilir (Lappas ve Kallioras, 2019).

Akarsular tarafından taşınarak belli alanlarda biriken ve taban suyu tarafından beslenen toprak türü olan alüvyal topraklar ile kırmızımsı kahverengi orman toprakları (5 puan ile) taşkın riski açısından “çok yüksek (% 52.5)” sınıfında yer almış olup, bu toprak türleri çalışma alanında en fazla dağılıma sahiptir. “Çok yüksek” kategorisinde yer alan bu toprak grupları Sivas kent merkezi-yakın çevresi ile çalışma alanının daha çok güneyinde ve kuzeybatısında dağılım göstermiştir. Taşkın riski açısından “çok düşük (% 0.6)” kategoride yer alan kolüvyal topraklar çalışma alanında en az dağılıma dağılıma sahip toprak birimidir (Tablo 4, Şekil 4e).

Akarsuya Uzaklık (Distance to Stream)

Akarsuya olan uzaklık, taşkın riski açısından önemli bir parametredir ve taşkın alanının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Taşkınlardan en çok etkilenen alanlar, taşkınların bir sonucu olarak, bu akarsuların yakınındaki alanlardır (Rahmati vd., 2016). Bu nedenle, doğru taşkın haritalaması için önemli bir jeomorfik faktör olan nehirden uzaklık dikkate alınmalıdır. Mesafe arttıkça eğim ve yükseklik artar. Ayrıca, bir akış genellikle o bölgenin en alçak noktasıdır. Bunun bir sonucu olarak, kanaldan uzak bölgelerde sel oluşumuna karşı daha düşük hassasiyete sahiptir (Das, 2018).

Akarsuya uzaklığı; 0-250 m arasındaki uzaklık değerlerine (5 puan ile) sahip bölgeler taşkın riski açısından “çok yüksek (% 17.0)” kategoride iken 1000 m’den büyük uzaklık değerlerine (1 puan ile) sahip bölgeler taşkın riski açısından “çok düşük (% 41.5)” kategorisindedir. Çalışma alanında akarsuya uzaklık kriteri açısından en düşük alansal dağılıma (% 12.2) sahip bölgeler 750-1000 m aralığındaki “düşük” kategorisi ile tanımlanmış bölgelerdir. Sivas kent merkezi ve yakın çevresi Kızılırmak nehrinin kuzeyinde yerleşmiş olup, kent merkezi ve yakın çevresi taşkın açısından riskli bölgede yer almaktadır (Tablo 4, Şekil 4f).

Litoloji (Lithology)

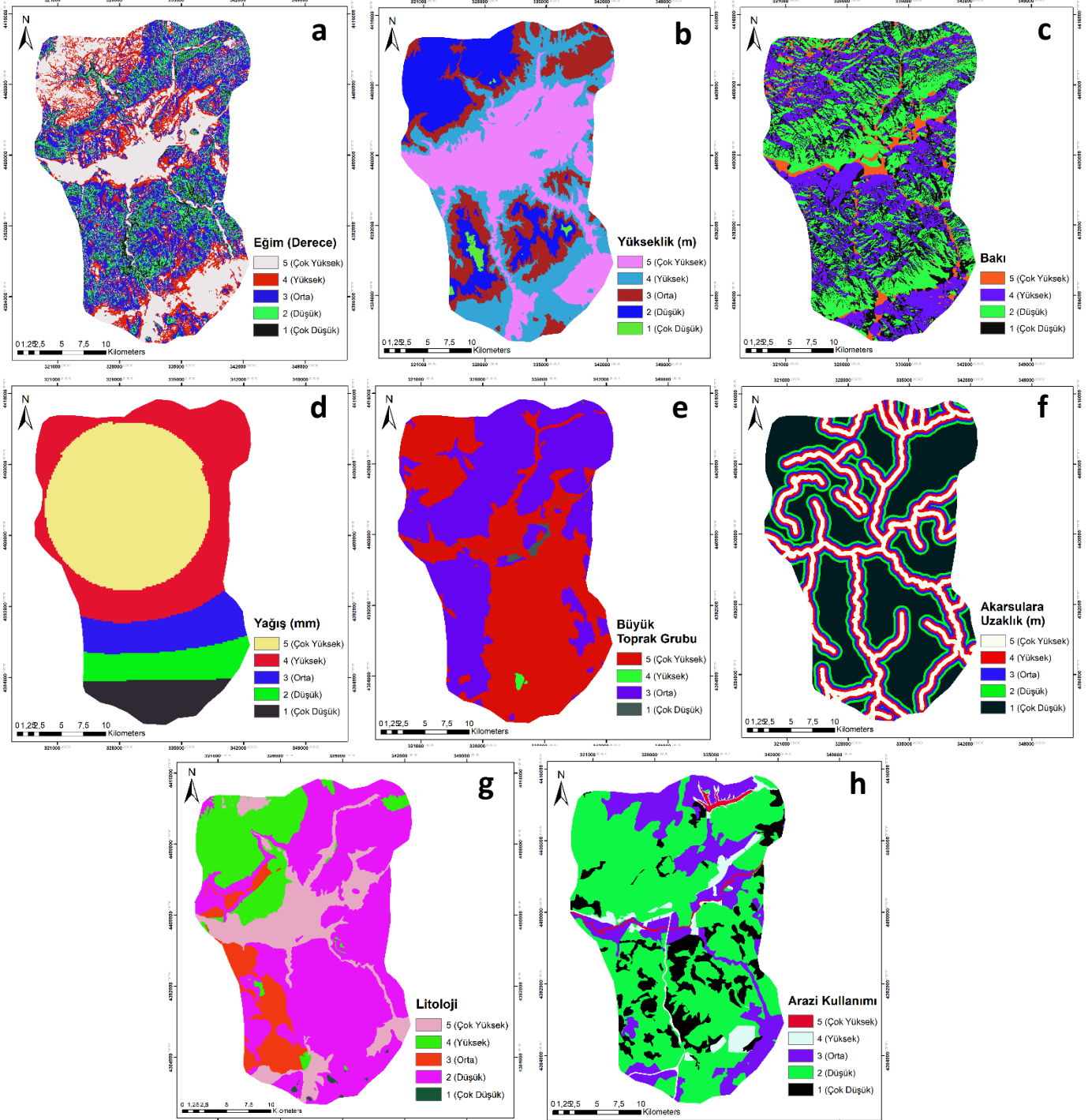
Litolojik birimler, taşkına eğilimli alanların belirlenmesinde önemli faktörlerden biridir. Bu faktör; kaya türlerine göre değişen, zeminlerin geçirgenliği ile ilgilidir. Geçirgen formasyonlar (iri-daneli kum, konglomera vb.), yağmur suyu sızmasını kolaylaştırır ve taşkın tehlikesini azaltır. Öte yandan geçirimsiz formasyonlar (marn, kil vb.) yüzey akış hızını artırarak taşkın riskini artırmaktadır (Souissi vd., 2020). Kaya geçirimsiz olduğunda, yağmur suyu sızması daha az önemlidir, bu da yüzeylerin genişlemesini kolaylaştırır ve sel olayı etkilerini artırır (Hammami vd., 2019).

Çalışma alanındaki taşkın tehlikesinin oluşmasında en büyük etken olan litolojik birim olan “alüvyon” birimi (5 puan ile) taşkın riski açısından “çok yüksek (% 18.3)” sınıfı ile kategorize edilirken, taşkın tehlikesinin oluşmasında en az etkiye sahip litolojik birim olan “ofiyolit kaya” birimi (1 puan ile) taşkın riski açısından “çok düşük (% 0.2)” sınıfı ile kategorize edilmiştir. Çalışma alanında taşkın tehlikesi açısından “düşük” kategorisinde yer alan litolojik birimler (piroklastik kaya, volkanit-çökelkaya-andezit-bazalt, kumtaşı-çamurtaşı, çakıltası-kumtaşı-çamurtaşı) çalışma alanında en fazla alansal dağılıma (% 56.1) sahiptir. Taşkın tehlikesi açısından “çok yüksek” kategoride bulunan litolojik birim, daha çok Sivas kent merkezi-yakın çevresinde ve çalışma alanının güneyinde yoğunlaşmıştır. “Çok düşük” taşkın riskine sahip litolojik birimler çalışma alanının daha çok güneybatısında yoğunlaşmıştır (Tablo 4, Şekil 4g).

Arazi Kullanımı (Land Use)

Arazi kullanımı kriteri, taşkınların oluşmasına katkıda bulunan ana faktörlerden biridir ve yüzey akışı ve toprağın su için depolama işlevi görme yeteneği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kentsel ve endüstriyel alanlar esas olarak geçirimsiz yüzeylerden (binalar, yollar ve otoparklar) oluşur. Bu arazi kullanım şekilleri; bir bariyer görevi görür, sızma kapasitesini azaltır, suyu tutar ve taşkın eğilimli hale gelir. Öte yandan tarlalar, meralar ve orman bitki örtüsü taşkına daha az eğilimlidir. Binalar, yollar gibi arazi kullanım şekilleri toprağın penetrasyon kapasitesini azaltır ve yüzey akışını artırır. Bitki örtüsünün varlığı akış miktarını azaltır. Bitkilerin infiltrasyon kapasitesi suyun tutulması anlamında önemlidir. (Bathrellos vd., 2012; Kourgialas ve Karatzas, 2016; Hategekimana vd., 2018).

Çalışma alanında en yüksek dağılıma sahip arazi kullanımı şekli “kullanılmayan alanlar (% 60.8)” sınıfındaki alanlar olup bu alanlar taşkın riski açısından “düşük” kategoride yer almaktadır. Taşkın riski açısından; “çok yüksek” kategoride yer alan “su yapıları” (5 puan ile) sınıfındaki alanlar çalışma alanında en az dağılıma (% 1.3) sahip iken, “çok düşük” kategoride yer alan “orman ve doğal karakteri korunacak alanlar” (1 puan ile) sınıfındaki alanlar çalışma alanında % 12.8’lik bir dağılım göstermiştir (Tablo 4, Şekil 4h).



Şekil 4. Kriterlere ait sınıflandırılmış haritalar (Classified maps of criteria)

4.2. Taşkın Tehlike Analizi ve Haritalaması (Flood Hazard Analysis and Mapping)

Taşkın tehlike analizinde kullanılan kriterler arasındaki ikili karşılaştırmaların (Cabrera ve Lee, 2020; Mohamed, 2019; Komolafe vd., 2020) geometrik ortalama değerleri CBS tabanlı AHP yazılımı yardımıyla değerlendirilmiş, kriter ağırlıkları ve tutarsızlık oranı (CR) hesaplanmıştır (Tablo 5). Kriterlerin taşkın tehlike haritalamasındaki etki düzeylerine göre oluşturulan sınıflandırılmış raster haritalar (Şekil 4) ile AHS yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları (Tablo 5) kullanılarak ArcGIS 10.8 yazılımı yardımıyla taşkın tehlike haritası elde edilmiştir (Şekil 5).

Tablo 5. İkili karşılaştırma matrisi ve kriterlere ait ağırlık değerleri
(Pairwise comparison matrix and weight values of criteria)

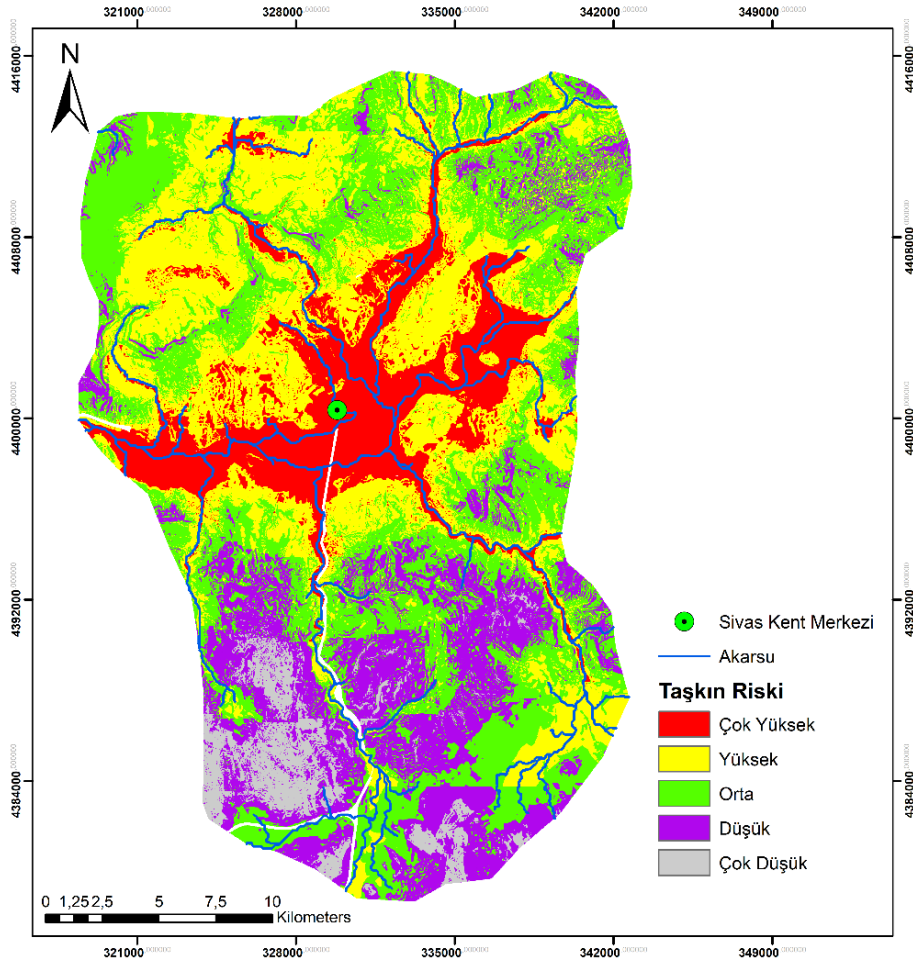
Kriterler	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Ağırlık Değeri
(1) Yağış	1	2	3	4	5	5	6	7	0.325
(2) Eğim	1/2	1	2	3	4	4	5	6	0.225
(3) Yükseklik	1/3	1/2	1	2	3	3	4	5	0.152
(4) Akarsulara Uzaklık	1/4	1/3	1/2	1	2	2	3	4	0.101
(5) Litoloji	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	1	3	0.058
(6) Arazi Kullanımı	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	1	3	0.058
(7) Büyük Toprak Grubu	1/6	1/5	1/4	1/3	1	1	1	3	0.052
(8) Bakı	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/3	1/3	1	0.027
Tutarlılık Oranı (CR): 0.03									

AHS analizine dayalı yapılan değerlendirme sonucunda; 8 adet kriter için hesaplanmış olan CR değeri 0.03'dür. CR değeri 0,1'den küçük olduğu için elde edilen sonuçların tutarlı ve kabul edilebilir olduğu görülmektedir. Yapılan analize göre; yağış ve eğim kriterleri taşkın tehlike haritalamasında en fazla ağırlık değerine sahip kriterler iken; büyük toprak grubu ve bakı kriterleri ise en düşük ağırlık değerine sahip kriterlerdir (Tablo 5). CBS-AHS tabanlı oluşturulmuş olan taşkın tehlike haritasının ortaya koyduğu risk kategorileri "çok yüksek (% 12.72)", "yüksek (% 24.40)", "orta (% 28.14)", "düşük (% 25.40)" ve "çok düşük (% 11.32)" şeklinde 5 farklı sınıf ile temsil edilmiştir (Tablo 6). Sivas kent merkezinin bir bölümü taşkın riski açısından "çok yüksek" sınıfında yer alırken bir bölümü de "yüksek" sınıfında yer almıştır. Sivas kent merkezi ve yakın çevresinde bulunan tarım arazilerinin de bir bölümü taşkın riski açısından "çok yüksek" ve "yüksek" sınıfında bulunmaktadır (Şekil 5). Bu durumun en büyük sebepleri arasında; bu bölgede eğimin ve yükseltinin çok düşük olması, litolojik birim açısından alüvyal malzemelerin yoğun olması, yıllık toplam yağış miktarının yüksek olması ve bu bölgenin çalışma alanındaki ana nehir konumundaki Kızılırmak nehrine yakın olması sayılabilmektedir. İlerleyen yıllarda olması muhtemel bir taşkın olayında bu bölgedeki yerleşim ve tarım alanlarının yüksek tehdit altında olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Tablo 6. Taşkın risk kategorileri ve alansal dağılımları (Flood risk categories and their spatial distributions)

Taşkın Riski	Alan (km ²)	Alan (%)
Çok Yüksek	86.20	12.72
Yüksek	151.70	22.40
Orta	190.58	28.14
Düşük	172.03	25.40
Çok Düşük	76.71	11.32

Taşkın potansiyelinin yüksek olduğu yerler, dağların eteklerinde bulunan nehirlerin ani bir eğim değişikliğine sahip olduğu çalışma alanının orta-kuzey kısmında yer almaktadır. Buna karşılık, daha yüksek derecede eğime sahip bölgeler taşkın oluşumunda daha az etkiye sahiptir. Bu nedenle; yükseklik ve eğim, çalışma alanının taşkın potansiyelini kontrol etmede çok önemli bir rol oynamıştır. Çalışma alanının güney kesiminde rakım çok yüksek olduğu için taşkın potansiyeli bu bölgede "düşük" ile "çok düşük" kategorisindedir ve bu bölgelerin eğimi 15-65.8° arasında bulunmaktadır.



Şekil 5. Çalışma alanına ait taşkın tehlike haritası (Flood hazard map of the study area)

4.3. Taşkın Alanları ile Arazi Kullanımı Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi (Evaluation of the Relationship Between Flooded Areas and Land Use)

Taşkın alanları arazi kullanım şekilleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Çalışma alanı için oluşturulmuş olan taşkın tehlike haritası (Şekil 5) ile çalışma alanına ait mevcut arazi kullanımı haritası (Şekil 2) birlikte değerlendirilerek çalışma alanındaki taşkın alanlarının arazi kullanımları üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Taşkın alanları ile arazi kullanımları arasındaki ilişkinin ortaya konulması için ArcGIS yazılımının Mekânsal Analiz modülündeki bölgesel istatistik aracı olan "Tabulate Area" aracı kullanılmıştır. Çalışma alanındaki taşkın riski açısından; yerleşim alanlarının büyük çoğunluğu (% 28.14) "yüksek" sınıfta, tarım alanlarının büyük çoğunluğu (% 47.28) "çok yüksek" sınıfta, kullanılmayan alanların büyük çoğunluğu (% 66.65) "çok düşük" sınıfta, sanayi alanlarının büyük çoğunluğu (% 6.03) "çok yüksek" sınıfta, orman alanlarının büyük çoğunluğu (% 25.13) "çok düşük" sınıfta ve büyük kentsel yeşil alanların büyük çoğunluğu (% 3.91) "çok yüksek" sınıfta yer almıştır. Taşkın olayının doğası gereği Kızılırmak nehrinin büyük bölümü (% 5.32) taşkın riski açısından "çok yüksek" sınıfta bulunmaktadır. Çalışma alanındaki arazi kullanım şekilleri ile taşkın riski "çok yüksek" olan alanlar arasında genel bir değerlendirme yapıldığında; yerleşim alanları (% 25.20) ile tarım alanları (% 47.28) tüm arazi kullanımı sınıfları içerisinde taşkından en fazla etkilenecek alanlar olarak görülmektedir (Tablo 7).

Tablo 7. Taşkın risk kategorileri ile arazi kullanımları arasındaki ilişki
(Relationship between flood risk categories and land uses)

Taşkın Riski	Arazi Kullanım Sınıfları																	
	Kızılırmak		Doğal Karakteri Korunacak Alanlar		Yerleşim Alanları		Tarım Alanları		Kullanılmayan Alanlar		Sanayi Alanları		Orman Alanları		Baraj		Büyük Kentsel Yeşil Alanlar	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Çok Yüksek	4.59	5.32	-	-	21.73	25.20	40.76	47.28	8.60	9.97	5.20	6.03	0.93	1.07	1.02	1.18	3.37	3.91
Yüksek	0.20	0.13	1.07	0.70	28.14	18.54	33.88	22.33	66.29	43.69	6.91	4.55	10.58	6.97	2.09	1.37	2.54	1.674
Orta	0.01	-	0.37	0.19	10.08	5.28	40.09	21.03	111.22	58.35	5.55	2.91	20.38	10.69	0.48	0.25	2.40	1.259
Düşük	-	-	0.28	0.16	2.09	1.21	18.27	13.84	108.86	63.28	3.69	2.14	33.12	19.25	-	-	0.17	0.099
Çok Düşük	-	-	-	-	0.49	0.63	5.81	7.57	51.13	66.65	-	0	19.28	25.13	-	-	-	-

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada; Sivas kent merkezi ve yakın çevresinin yer aldığı Kızılırmak nehri alt havzası için uygun maliyetli ve daha az zaman alan bir metodoloji sağlayan CBS tabanlı AHS yöntemi yardımıyla taşkın tehlike haritası oluşturularak taşkın riski potansiyeli belirlenmiştir. AHS yöntemi yardımıyla 8 adet kritere (eğim, yükseklik, bakı, yağış, büyük toprak grubu, akarsulara uzaklık, litoloji, arazi kullanımı) ait kriter ağırlıkları belirlenmiş, bu kriter ağırlıkları ve kriterlere ait sınıflandırılmış tematik haritalar ArcGIS platformuna entegre edilmiştir. Elde edilmiş olan taşkın tehlike haritası “çok yüksek (% 12.72)”, “yüksek (% 24.40)”, “orta (% 28.14)”, “düşük (% 25.40)” ve “çok düşük (% 11.32)” şeklinde 5 farklı risk kategorisi ile temsil edilmiştir. Sivas kent merkezinin bir bölümü taşkın riski açısından “çok yüksek” sınıfında yer alırken bir bölümü de “yüksek” sınıfında yer almıştır. Taşkın riskinin en yüksek olduğu alanlar; genel olarak eğimin ve yükseltinin çok düşük olduğu, litolojik birim açısından alüvyal malzemelerin yoğun olduğu, yıllık toplam yağış miktarının yüksek olduğu ve çalışma alanındaki ana nehir konumundaki Kızılırmak nehrine yakın olan Sivas kent merkezi ve yakın çevresinin bulunduğu alanlar olduğu tespit edilmiştir. Yağış ve eğim kriterleri, çalışma alanının taşkın tehlike haritalamasında en fazla ağırlık değerlerine sahip kriterler olarak göze çarpmıştır. Taşkın tehlike kategorileri ile arazi kullanım şekilleri arasındaki değerlendirmeye göre; yerleşim alanları (%25.20) ile tarım alanları (%47.28) tüm arazi kullanım şekilleri içerisinde 1. derece taşkından (“çok yüksek” risk sınıfında) en fazla etkilenecek alanlar olarak görülmüştür.

Zaharia vd. (2017), eğimi 15°'yi geçen bölgelerin su birikmesini ve durgunluk sürecini desteklemediğini, geniş bir yoğun bitki örtüsüne ve düz yüzey topografyasına sahip bölgelerin bir taşkın sırasında fazla yüzey suyunun tutulmasını desteklediğini öne sürmüştür. Eğimi düşük olan bir alan, kolayca sel altında kalabileceği için daha yüksek risk taşımaktadır. Öte yandan eğimi yüksek bir yüzey taşkın riskine daha az maruz kalmaktadır (Chen vd., 2015). Bu bilgiler doğrultusunda; Sivas kent merkezinin de bulunduğu alanlar düşük eğime sahip alanlar olup, bu alanlar taşkın riski açısından “çok yüksek” sınıfında yer almıştır. Yağışlar, taşkın oluşumunu doğrudan kontrol eden en önemli kriter olup (Das, 2018), çalışma alanında yüksek yağış alan yerler genel olarak taşkın riskinin çok yüksek olduğu yerler olarak göze çarpmıştır. Tablo 1’de verilmiş olan literatür bilgilerine dayalı olarak çalışma alanımızdaki çok yüksek taşkın riskine sahip alanlar, genel olarak en düşük yükseklik ve eğime sahip, kentleşmenin yoğun olduğu, yüksek yağış yoğunluğuna sahip, geçirimsiz ila yarı geçirgen toprak türü ile temsil edilen ve akarsu ağına yakın bölgeler ile karakterize edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yöntem, çalışma alanındaki taşkın yönetimi için öneri olarak alınabilecek bir yöntemdir. Taşkınların öngörülemeden ve yıkıcı sonuçları nedeniyle ani taşkın riski altında olan hassas alanların belirlenmesi, risklerin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, yapısal veya yapısal olmayan önlemlerle bu risklerin hafifletilmesi zorunlu bir ihtiyaçtır. Bu çalışma, karar vericilerin taşkın risklerinin azaltılmasında iklim değişikliği dikkate alınarak yağmur suyunun toplanması ve kontrollü kentleşmenin planlanması gibi potansiyel önleyici tedbirler tasarlamalarına yardımcı olacak bir çalışmadır. Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; taşkın riski yüksek alanlarda yapılaşma ve kentsel gelişim kontrol altına alınmalı, taşkın duyarlılığı yüksek olan alanlardaki alt yapı konularında ilgili standartlar ve mevzuatlar ölçüsünde gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdi, P., 2006. Evaluate the potential of flooding Zanjanrood basin with SCS and GIS, National Committee of Irrigation and Drainage, Technical workshop of coexistence with floods.
- Armenakis, C., Nirupama, N., 2014. Flood risk mapping for the city of Toronto. *Proc. Econ. Financ.*, 18, 320–326.
- Arnell, N.W., Gosling, S.N., 2016. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134, 387–401.
- Atmaca, E., 2004. Sivas İl Merkezi Katı Atık Yönetiminin İrdelenmesi ve Yeniden Planlanması, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas, 137s.
- Bathrellos, G.D., Karymbalis, E., Skilodimou, H.D., Gaki-Papanastassiou, K., Baltas, E. A., 2016. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. *Environ. Earth Sci.*, 75, 319.
- Bathrellos, G.D., Skilodimou, H.D., Chousianitis, K., Youssef, A.M., Pradhan, B., 2017. Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Sci. Total Environ.*, 575, 119–134.
- Bathrellos, G.D., Gaki-Papanastassiou, K., Skilodimou, H.D., Papanastassiou, D., Chousianitis, K.G., 2012. Potential suitability for urban planning and industry development by using natural hazard maps and geological-geomorphological parameters. *Environ. Earth*, 66, 537–548.
- Bhushan, N., Rai, K., 2004. *Strategic decision making: Applying the Analytic Hierarchy Process*, Springer-Verlag, New York, pp. 172.
- Cai, S., Fan, J., Yang, W., 2021. Flooding risk assessment and analysis based on GIS and the TFN-AHP method: A case study of Chongqing, China. *Atmosphere*, 12(5), 623.
- Cabrera, J. S., Lee, H. S., 2020. Flood risk assessment for Davao Oriental in the Philippines using geographic information system-based multi-criteria analysis and the maximum entropy model. *Journal of Flood Risk Management*, 13(2), e12607.
- Chakraborty, S., Mukhopadhyay, S., 2019. Assessing flood risk using analytical hierarchy process (AHP) and geographical information system (GIS): application in Coochbehar district of West Bengal, India. *Natural Hazards*, 99(1), 247–274.
- Chen, Y., Liu, R., Barrett, D., Gao, L., Zhou, M., Renzullo, L., Emlyanova, I., 2015. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. *Sci Total Environ.*, 538, 512–523.
- Cigna, F., Tapete, D., Lee, K., 2018. Geological hazards in the UNESCO World Heritage sites of the UK: from the global to the local scale perspective. *Earth Sci. Rev.*, 176, 166–194.
- CRED, 2018. Centre for research on the epidemiology of disasters-review of disaster events, <https://www.cred.be/publications>. (Accessed 14 April 2019).
- Das, S., 2018. Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19), 1-13.
- Das, S., Pardeshi, S.D., 2018a. Comparative analysis of lineaments extracted from Cartosat, SRTM and Aster DEM: a study based on four watersheds in Konkan region, India. *Spat Inf Res*, 26(1), 47–57.
- Dash, P., Sar, J., 2020. Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12620.
- Demir, V., Kişi, O., 2016. Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey, *Adv. Meteorol.*, 1–9.
- Dölek, İ., 2015. Sungu beldesi ve yakın çevresinde (Muş) sel ve taşkına duyarlı alanların belirlenmesi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 31, 258-280.
- Dölek, İ., Avcı, V., 2017. Muş ilinin sel ve taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulması. *The Journal of Academic Social Science*, 5(44), 190-204.
- Eastman, J.R., 2003. *IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and image processing. Manual Version 14.00*, Clark University Worcester.
- Feloni, E., Mousadis, I., Baltas, E., 2020. Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach—The case of Attica region. *Journal of Flood Risk Management*, 13, e12563.
- Ghezelsofloo, A.A., Hajibigloo, M., 2020. Application of flood hazard potential zoning by using AHP algorithm. *Civil Engineering Research Journal*, 9 (5), 150-159.
- Ghosh, A., Kar, S.K., 2018. Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: a case study in Malda district of West Bengal, India. *Nat. Hazards*, 94, 349–368.
- Gigović, L., Pamučar, D., Bajić, Z., Drobnjak, S., 2017. Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas. *Water*, 9(6), 360.
- Hammami, S., Zouhri, L., Souissi, D., Souei, A., Zghibi, A., Marzougui, A., Dlala, M., 2019. Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 12(21), 1-16.
- Hansen, H.S., 2005. GIS-based multi-criteria analysis of wind farm development. *ScanGIS 2005: Proceedings of the 10th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science*, ScanGIS, Denmark, 75- 87.
- Hanson, S., Nicholls, R., Ranger, N., Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Chateau, J., 2011. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. *Climatic Change*, 104, 89–111.
- Hapciuc, O. E., Romanescu, G., Minea, I., Iosub, M., Enea, A., Sandu, I., 2016. Flood susceptibility analysis of the cultural heritage in the Sucevita catchment (Romania). *Int. J. Conserv. Sci.* 7, 501–510.
- Hategekimana, Y., Yu, L., Nie, Y., Zhu, J., Liu, F., Guo, F., 2018. Integration of multi-parametric fuzzy analytic hierarchy process and GIS along the UNESCO World Heritage: a flood hazard index, Mombasa County, Kenya. *Natural Hazards*, 92(2), 1137-1153.
- HGM, 2005. Çalışma alanına ait 1/25.000 ölçekli sayısal topoğrafik harita, Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Huang, X., Tan, H., Zhou, J., Yang, T., Benjamin, A., Wen, S.S., Li, S., Liu, S., Liu, A., Li, X., et al., 2008. Flood hazard in Hunan province of China: an economic loss analysis. *Nat Hazards*, 47, 6573.

- Işık, F., Bahadır, M., Zeybek, H. İ., Çağlak, S., 2020. Karadere Çayı taşkını (Araklı Trabzon). Mavi Atlas, 8(2), 526–547.
- Jonkman, S.N., Dawson, R.J., 2012. Issues and Challenges in Flood Risk Management-Editorial for the Special Issue on Flood Risk Management. *Water*, 4, 785–792.
- Karakuş, C.B., Demiroğlu, D., 2022. Investigation of relationship between land use/cover (LULC) and GIS-based bioclimatic comfort zones based on environmental climate parameters and bioclimatic indices. *Arab. J. Geosci.* DOI : 10.1007/s12517-022-10407-9 (Publish Online).
- Kazakis, N., Kougiyas, I., Patsialis, T., 2015. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563.
- Khan, S.I., Hong, Y., Wang, J., Yilmaz, K.K., Gourley, J.J., Adler, R.F., Brakenridge, G.R., Policelli, F., Habib, S., Irwin, D., 2011. Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria Basin: Implications for hydrologic prediction in Ungauged Basins. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49, 85–95.
- KHGM, 2001. Çalışma alanına ait 1/25.000 ölçekli sayısal toprak haritası, T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kittipongvises, S., Phetrak, A., Rattanapun, P., Brundiars, K., Buizer, J.L., Melnick, R., 2020. AHP-GIS analysis for flood hazard assessment of the communities nearby the world heritage site on Ayutthaya Island, Thailand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48, 101612.
- Koem, C., Tantanee, S., 2020. Flash flood hazard mapping based on AHP with GIS and satellite information in Kampong Speu Province, Cambodia. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*.
- Komolafe, A. A., Awe, B. S., Olorunfemi, I. E., Oguntunde, P. G., 2020. Modelling flood-prone area and vulnerability using integration of multi-criteria analysis and HAND model in the Ogun River Basin, Nigeria. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1766-1783.
- Kontos, T.D., Komilis, D.P., Halvadakis, C.P., 2005. Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology. *Waste Management*, 25(8), 818-832.
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P., 2016. A flood risk decision making approach for Mediterranean tree crops using GIS; climate change effects and flood-tolerant species. *Environ. Sci. Policy*, 63, 132–142.
- Lanza, S.G., 2003. Flood hazard threat on cultural heritage in the town of Genoa (Italy). *J. Cult. Herit.*, 43, 159–167.
- Lappas, I., Kallioras, A., 2019. Flood susceptibility assessment through GIS-based multi-criteria approach and analytical hierarchy process (AHP) in a river basin in Central Greece. *Int. Res. J. Eng. Technol.*
- Liu, R., Zhang, K., Zhang, Z., Borthwick, A.G., 2014. Land-use suitability analysis for urban development in Beijing. *Journal of Environmental Management*, 145, 170-179.
- Luu, C., Von Meding, J., Kanjanabootra, S., 2018. Assessing flood hazard using flood marks and analytic hierarchy process approach: a case study for the 2013 flood event in Quang Nam, Vietnam. *Natural Hazards*, 90(3), 1031-1050.
- Mahmoud, S. H., Gan, T. Y., 2018. Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production*, 196, 216-229.
- Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *Int J Geogr Inf Sci.*, 20(7), 703-726.
- Manfreda, S., Di Leo, M., Sole, A., 2011. Detection of flood-prone areas using digital elevation models. *J. Hydrol. Eng.*, 16, 781–790.
- Mohamed, S.A., 2019. Application of satellite image processing and GIS-Spatial modeling for mapping urban areas prone to flash floods in Qena governorate, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 158, 103507.
- MPGM, 2015. 1/100.000 ölçekli çevre düzeni planı haritası, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekânsal Planlama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MTA, 2005. Çalışma alanına ait 1/25.000 ölçekli sayısal jeoloji haritası, Maden ve Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Oğuz, K., Oğuz, E., Coşkun, M., 2016. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile taşkın risk alanlarının belirlenmesi: Artvin ili örneği. 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu, 23–25 Kasım 2016, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize.
- Oğuz, E., Oğuz, K., Öztürk, K., 2022. Düzce bölgesi taşkın duyarlılık alanlarının belirlenmesi. *Geomatik*, 7(3), 220-234.
- Oğuz, K., Akın, B.S., 2019. Doğu Akdeniz Havzası'nda Sıcaklık, Yağış ve Aerosol Değişiminin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 244-253.
- Özcan, O., 2017. Taşkın tespitinin farklı yöntemlerle değerlendirilmesi: Ayamama Deresi örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 3(1), 9-27.
- Orencio, P.M., Fujii, M., 2013. A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP). *Int. J. Disast. Risk. Re.*, 3, 62–75.
- Ouma, Y.O., Tateishi, R., 2014. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515-1545.
- Paquette, J., Lowry, J., 2012. Flood hazard modelling and risk assessment in the Nadi River Basin, Fiji, using GIS and MCDA. *South Pacific J Nat Appl Sci.*, 30, 3343.
- Radwan, F., Alazba, A.A., Mossad, A., 2019. Flood risk assessment and mapping using AHP in arid and semiarid regions. *Acta Geophysica*, 67(1), 215-229.
- Rahmati, O., Zeinivand, H., Besharat, M., 2016. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000-1017.
- Ramkar, P., Yadav, S.M., 2021. Flood risk index in data-scarce river basins using the AHP and GIS approach. *Natural Hazards*, 109(1), 1119-1140.
- Razavi A., 2008. Principles of determining the boundary water resources. 1st Edition, Publishers of Power and Water University of Tehran, Iran.
- Saaty, T., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGrawHill, New York.
- Safaripour, M., Monavari, M., Zare, M., Abedi, Z., Gharagozlou, A., 2012. Flood risk assessment using GIS (case study: Golestan province, Iran). *Pol. J. Environ. Stud.*, 21, 1817–1824.

- Scheuer, S., Haase, D., Meyer, V., 2011. Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: from a starting point view towards an end point view of vulnerability. *Nat Hazards*, 58, 731-751.
- Sener, S., Sener, E., Nas, B., 2011. Selection of Landfill Site using GIS and Multicriteria Decision Analysis for Beyşehir Lake Catchment area (Konya, Turkey). *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(3), 134-144.
- Sengun, M.T., Karadeniz, E., Saman, B., 2019. Tavşanlı Deresinde (Sivas-Hafik) taşkın risk analizi. 1st Istanbul International Geography Congress Proceedings Book: Istanbul University Press, İstanbul, Türkiye, 653-668.
- Shahabi, H., Keihanfar, S., Ahmad, B.B., Amiri, M.J.T., 2014. Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images. *Environmental Earth Sciences*, 71(9), 4221-4233.
- SMİM, 2020. Çalışma alanına ait 1970-2020 yılları arasındaki yağış verileri, Sivas Meteoroloji İl Müdürlüğü, Sivas.
- Solin, L., 2012. Spatial variability in the flood vulnerability of urban areas in the headwater basins of Slovakia. *Flood Risk Manag.*, 5(4), 303-320.
- Souissi, D., Zouhri, L., Hammami, S., Msaddek, M. H., Zghibi, A., Dlala, M., 2020. GIS-based MCDM-AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*, 35(9), 991-1017.
- Sözer, B., Kocaman, S., Nefeslioglu, H. A., Firat, O., Gokceoglu, C., 2018. Preliminary investigations on flood susceptibility mapping in Ankara (Turkey) using modified analytical hierarchy process (M-AHP). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-5, ISPRS TC V Mid-term Symposium "Geospatial Technology – Pixel to People", 20–23 November 2018, Dehradun, India.
- Stieglitz, M., Rind, D., Famiglietti, J., Rosenzweig, C., 1997. An efficient approach to modeling the topographic control of surface hydrology for regional and global climate modeling. *J. Clim.*, 10, 118–137.
- Swain, K. C., Singha, C., Nayak, L., 2020. Flood susceptibility mapping through the GIS-AHP technique using the cloud. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 720.
- Tella, A., Balogun, A. L., 2020. Ensemble fuzzy MCDM for spatial assessment of flood susceptibility in Ibadan, Nigeria. *Natural Hazards*, 104(3), 2277-2306.
- Tokgözlü, A., Özkan, E., 2018. Taşkın risk haritalarında AHP yönteminin uygulanması: Aksu Çayı Havzası örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (44), 151-176.
- Topdağ, B., 2003. Sivas ili dolayının sel ve taşkınlar açısından incelenmesi ve alınması gereken önlemler. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Tüzgen, G. A., Karaca, Ö., 2021. Çerçi ve Murt Deresi (Fethiye-Muğla) taşkın duyarlılık alanlarının CBS ile çok kriterli karar verme analizi kullanılarak haritalanması. *Yerbilimleri*, 42(1), 121-143.
URL-1. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/e_kutuphane/kurumsal-raporlar/afet_istatistikleri_2020_web.pdf.
- Veerbeek, W., Zevenbergen, C., 2009. Deconstructing urban flood damages: increasing the expressiveness of flood damage models combining a high level of detail with a broad attribute set. *Flood Risk Manag.*, 2, 4557.
- Wang, J.J., 2013. The empirical study of flood risk maps to cultural heritages in Taiwan. *Int. J. Chem. Environ. Biol. Sci.*, 1, 135–139.
- Yal, G., Akgün, H., 2013. Landfill site selection and landfill liner design for Ankara, Turkey. *Environ Earth Sci.*, 70, 2729–2752.
- Zaharia, L., Costache, R., Prăvălie, R., Ioana-Toroimac, G., 2017. Mapping flood and flooding potential indices: a methodological approach to identifying areas susceptible to flood and flooding risk. Case study: the Prahova catchment (Romania). *Frontiers of Earth Science*, 11(2), 229-247.



DERİN ÖĞRENME TEKNİĞİ KULLANILARAK KARS İLİNİN HAVA SICAKLIK TAHMİNİ

Muhammet Ali KARABULUT^{1*}, Emre TOPÇU²

¹ Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kars, Türkiye

² Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kars, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sıcaklık Tahmini,
Veri Analizi,
LSTM,
Yapay Sinir Ağları.

Öz

Hava sıcaklığının doğru tahmini, su kaynakları yönetiminde, kara-atmosfer etkileşiminde ve tarımda önemli bir rol oynar. Ancak, doğrusal olmayan ve kaotik doğası nedeniyle hava sıcaklığını doğru bir şekilde tahmin etmek zordur. Son yıllarda hava sıcaklığını tahmin etmek için derin öğrenme teknikleri önerilmiştir. Bu çalışma, hava sıcaklığını tahmin etmek için kullanılan yapay sinir ağı (YSA) tabanlı yaklaşımlarından uzun kısa süreli bellek (LSTM) kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Hava durumu verileri, ortalama rüzgâr hızı, yağış, kar yağışı, kar derinliği, ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklığı içeren veriler bu algoritmaya girdi olmuşturlar. Çıktı olarak ise, bir sonraki gün için ortalama sıcaklık olarak belirlenmiştir. Odak noktası Kars ilinin Merkez ilçesinin 2010-2021 dönemindeki meteorolojik ölçümlerdir. İnceleme, sinir ağı modellerinin hava sıcaklığını tahmin etmek için umut verici araçlar olarak kullanılabileceğini göstermektedir. YSA tabanlı yaklaşımlar, hızlı işlem kabiliyeti ve karmaşık problemlerle başa çıkma yetenekleri nedeniyle hava sıcaklığını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmasına rağmen, mevcut en iyi yöntem üzerinde henüz bir fikir birliği yoktur. Aylık ve günlük olarak hesaplanan modelin tahmin doğruluğunun yüksek olması, sıcaklık tahmini çalışmalarında bu modelin başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir.

AIR TEMPERATURE FORECAST OF KARS CITY USING DEEP LEARNING TECHNIQUE

Keywords

Forecasting,
Data Analysis,
LSTM,
Artificial Neural Networks.

Abstract

Accurate estimation of air temperature plays an important role in water resource management, land-atmosphere interaction, and agriculture. However, it is difficult to accurately predict air temperature due to its non-linear and chaotic nature. Deep learning techniques have been proposed to predict air temperature in recent years. This study presents a comprehensive review of long short-term memory (LSTM), one of the artificial neural networks (ANN)-based approaches used to predict air temperature. Data including weather data, average wind speed, precipitation, snowfall, snow depth, average temperature, maximum temperature and minimum temperature have been input to this algorithm. As the output, it is determined as the average temperature for the next day. The focal point is the meteorological measurements of the Central district of Kars province in the period 2010-2021. The review shows that neural network models can be used as promising tools to predict air temperature. Although ANN-based approaches are widely used for estimating air temperature due to their fast computational speed and ability to deal with complex problems, there is still no consensus on the best available method. The monthly and daily calculated model, its high estimation accuracy, showed that this model can be successfully applied in temperature estimation studies.

Alıntı / Cite

Karabulut, M. A., Topçu, E., (2022). Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Kars İlının Hava Sıcaklık Tahmini, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1174-1181.

* İlgili yazar / Corresponding author: mali.karabulut@kafkas.edu.tr, +90-474-225-1150 Dahili:1612

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. A. Karabulut, 0000-0002-2080-5485	Başvuru Tarihi / Submission Date	03.02.2022
E. Topçu, 0000-0003-0728-7035	Revizyon Tarihi / Revision Date	20.05.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	10.06.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Küresel ısınma, hava sıcaklığındaki artışla ilişkili olduğu için son zamanlarda bilim insanlarının dikkatini çekmektedir. Artan hava sıcaklığı, deniz seviyesinin yükselmesi ve küresel ısınma gibi iklim koşullarında değişikliklere yol açmakta ve nihayetinde insan yaşamını olumsuz yönde etkilemektedir. Hava sıcaklığı, atmosferin durum değişkenidir ve hem atmosferik hem de kara yüzeyi süreçlerini etkilemektedir (Tajpar vd., 2020; Valipour vd., 2020). Hava sıcaklığı tahmini, insan yaşamını ve özelliklerini korumak için kullanıldığından hava tahmininin önemli bir parçasıdır. Hava sıcaklığı uygun bir aralıkta olmadığından insanlar potansiyel sağlık sorunları yaşayabilir (Schulte vd., 2016). Hava sıcaklığındaki aşırı değişiklikler bitkilere ve hayvanlara zarar verebilir. Sanayi, enerji ve tarım gibi çeşitli sektörler üzerindeki önemli etkisinden dolayı hava sıcaklığının doğru tahmini çok önemlidir (Sardans vd., 2006). Güvenilir hava sıcaklığı tahminleri, enerji tüketiminin doğruluğunu artırır. Hava sıcaklığı ayrıca akış (Tang vd., 2012), buharlaşma (Jovic vd., 2018) ve güneş radyasyonu (Marzo vd., 2017) gibi diğer meteorolojik değişkenleri tahmin etmede kilit faktörlerden biridir. Bu nedenle, hava sıcaklığının tahmini için uygun bir yaklaşımın bulunması hayati önem taşımaktadır ve küresel ısınma ve iklim değişikliğinin sonuçlarını hafifletebilir. Ayrıca, hava sıcaklığının doğru tahmini, insan faaliyetleri, enerji politikası ve iş geliştirme için bir plan oluşturulmasında önemli bir rol oynar (Smith vd., 2007).

Son zamanlarda, yapay sinir ağlarına (YSA) dayalı modeller, girdiler ve çıktılar arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri yakalama yetenekleri nedeniyle meteoroloji, su kaynakları ve hidroloji gibi çeşitli disiplinlerde bilim adamlarının dikkatini çekmiştir. Çeşitli YSA tabanlı yaklaşımlar, sel (Yang vd., 2019), yağış (Lee vd., 2018), su kalitesi (Zou vd., 2020) ve hava sıcaklığı (Altan vd., 2009) tahminleri gibi birçok hidrolojik problemde başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Biyolojik sinir sistemlerinden esinlenilerek geliştirilen YSA'lar, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için güçlü araçlardır. YSA'lar eğitim verileri üzerinden yapabildikleri genelleme sayesinde kendilerine sağlanmayan test örneklerini doğru olarak tahminleme yetileri yüksektir. Sonuç olarak, YSA tahmin modelleri, fiziksel ve istatistiksel yaklaşımlardan daha umut verici bir performans sunabilmektedir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan programlama ortamlarında (örneğin Matlab, Python, vb.) bir araç kutusu olarak kolayca erişilebilmektedirler.

Bu çalışma, hava sıcaklığı tahmini için derin öğrenme tekniklerinin potansiyelini araştırmaktadır. Uygulanan model uzun-kısa süreli bellek (Long-Short Time Memory - LSTM) modelidir. Kars ilinin Merkez ilçesi için geçmiş hava durumu verilerinin T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden elde edilip modeli eğitmek için kullanılmıştır. Hava durumu verileri, ortalama rüzgâr hızı, yağış, kar yağışı, kar derinliği, ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklığı vb. içeren veriler bu algoritmaya girdi olmuşturlar. Çıktı, daha sonra bir sonraki gün için ortalama sıcaklık olarak belirlenmiştir.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir. Bölüm 2'de, hava tahmini ile ilgili önceki çalışmaların literatür taraması yapılmıştır. Bölüm 3, tahmin için kullanılan LSTM tekniğini açıklamaktadır. Bölüm 4, veri setinin tanıtıldığı, modellerin uygulandığı ve sonuçların sunulduğu deneysel bölümdür. Son olarak, Bölüm 5'te sonuçlar tartışılmıştır.

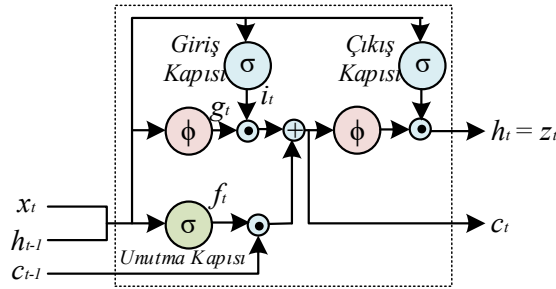
2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Ustaoglu vd. (2009), Türkiye'de günlük ortalama, maksimum ve minimum hava sıcaklığını tahmin etmek için ileri beslemeli geri yayılım (FFBP), radyal temel fonksiyon (RBF) ve genelleştirilmiş regresyon sinir ağı (GRNN) olmak üzere üç farklı YSA kullanmıştır. Modeller, 1 gün öncesi hava sıcaklığını tahmin etmek için önceki yedi günün günlük hava sıcaklığı ölçümlerini kullanılmıştır. Korelasyon katsayısı (R^2) ve ortalama karekök hatası (RMSE) gibi istatistiksel parametreleri kullanarak, kullanılan tüm sinir ağı yöntemlerinin tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Kumar vd. (2013) Hindistan'da haftalık ortalama hava sıcaklıklarını tahmin etmek için FFNN'yi kullanmışlardır. Altı hafta önceki hava sıcaklığı verileri, 1 hafta sonraki hava sıcaklığını tahmin etmek için çeşitli YSA mimarilerinde kullanılmıştır. Farklı konfigürasyonların tahmin yeteneği, R^2 ve RMSE metriklerinin hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir. Tran vd. (2020) geleneksel çok katmanlı ANN, RNN ve LSTM modellerinin hiperparametrelerini optimize etmek için bir genetik algoritma (GA) kullanmışlardır. Hibrit modeller, Güney Kore'deki Cheongju istasyonunda maksimum hava sıcaklığını tahmin etmek için kullanılmıştır. Son haftanın hava sıcaklığı gözlemleri, 1 ila 15 gün arası maksimum hava sıcaklığını tahmin etmek için girdi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, hibrit GA-LSTM'nin uzun vadeli hava sıcaklığı tahmini için diğer modellerden daha iyi bir performansla sahip olduğunu göstermiştir. Li vd. (2019), tarihsel gözlemlerinden yarım saatlik hava sıcaklığını tahmin etmek

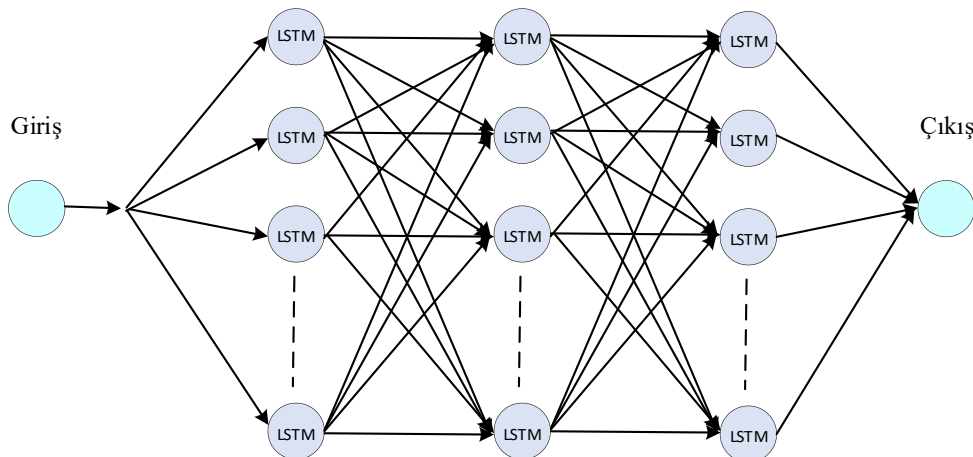
için LSTM kullanmışlardır. LSTM modeli, farklı pencereler altında derin sinir ağı (DNN) ve rastgele orman (RF) yaklaşımları ile karşılaştırılmıştır. LSTM ile oluşturulan ağın DNN ve RF yöntemlerinden daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Abhishek vd. (2012), 1999–2009 yılları arasında Kanada'da günlük maksimum hava sıcaklığını tahmin etmek için ileri beslemeli sinir ağının (FFNN) uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Giriş verileri, son 10 yılda günlük maksimum hava sıcaklığı ölçümlerinden oluşmaktadır. Sinir ağlarının performansını değerlendirmek için farklı transfer fonksiyonları, gizli katman sayısı ve nöronlar test edilmiştir. Sonuçlar tan-sigmoid transfer fonksiyonuna sahip YSA'nın en iyi maksimum hava sıcaklığı tahminlerini ürettiğini göstermektedir. Afzali vd. (2012), İran'ın Kerman şehrinde son 15 gün verileri kullanılarak 1 gün sonraki ortalama, minimum ve maksimum hava sıcaklığını tahmin etmek için iki farklı türde sinir ağı geliştirmiştir (FFNN ve Elman sinir ağı). Sonuçlar, her iki sinir ağının da tatmin edici hava sıcaklığı tahminleri sağladığını göstermektedir. Salman vd. (2015), hava tahmini için Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN), Koşullu Kısıtlı Boltzmann Makinesi (CRBM) ve Evrimsel Sinir Ağı (CNN) gibi derin öğrenme tekniklerini araştırmıştır. Xingjian vd. (2015), yerel bir bölgedeki gelecekteki yağış yoğunluğunu nispeten kısa bir süre içinde tahmin etmek için evrimsel-LSTM adlı bir derin öğrenme modeli geliştirmişlerdir. Yang vd. (1997), tropikal siklon yoğunluğu tahminleri yapmak için uzun bir kısa süreli bellek (LSTM) modeli kullanmışlardır. Günümüzde hava olaylarını tahmin etmek için makine öğrenmesi tekniklerinin yanı sıra derin öğrenme tekniklerinin kullanıldığı çeşitli uygulamalar bulunmaktadır.

3. Uzun-kısa süreli bellek (Long Short Term Memory Network, LSTM)

LSTM ilk olarak Hochreiter (1997) tarafından sunulmuştur. LSTM, uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmek için geliştirilmiş bir RNN sınıfıdır. Tekrarlayan sinir ağları, birimler arasındaki bağlantıların yönlendirilmiş bir döngü oluşturduğu yapay sinir ağlarının bir alt sınıfıdır. Bu döngü, dinamik zamansal davranışın sergilenmesine izin veren dahili bir ağ durumu yaratır (Salcedo vd., 2012). Geleneksel ileri beslemeli sinir ağlarından farklı olarak, LSTM'nin geri besleme bağlantıları vardır. RNN'ler verileri soldan sağa tarar. LSTM, dizi tahmini görevlerinde uzun vadeli bağımlılıkları öğrenebilen özel bir RNN türüdür. Bu model, geleneksel RNN'leri eğitme problemini, kaybolan gradyan problemini, sabit hata karesel birimlerini ekleyerek ele alır (Rajendra vd., 2019). Tipik bir LSTM birimi, bir hücre, bir giriş kapısı, bir çıkış kapısı ve bir unutmaya kapısından oluşur. Hücre keyfi zaman aralıklarında değerleri hatırlar ve üç kapı (unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı) hücrenin içine ve dışına bilgi akışını düzenler. LSTM birimleri Şekil 1'de görülebilir, x_t : LSTM biriminin giriş vektörü, f_t : geçidin aktivasyon unutmaya vektörünü, i_t : giriş kapısının aktivasyon vektörü, c_t : hücre durum vektörü, h_t : LSTM biriminin çıkış vektörü. Girdi sayısı arttığında, ilk birkaç girdiye olan gradyanlar kaybolur ve sıfıra eşitlenir. LSTM, hücreye bilgi ekleyebilen, düzenleyebilen veya çıkarabilen iç kapıları kullanarak bu sorunu çözebilir.



Şekil 1. LSTM biriminin gösterimi (Representation of LSTM unit)



Şekil 2. LSTM sistem modeli (LSTM system model)

Bu ağlar, ağ çıktısı ile beklenen çıktı arasındaki hatayı en aza indirmek için eğitilir ve bu tür öğrenmeye, ağı Derin Öğrenme alanında eğitmek için geri yayılım kullanarak denetimli öğrenme tekniği denir (Smith vd., 2007). Klasik ileri beslemeli sinir ağlarından farklı olarak, LSTM'nin geri besleme bağlantıları vardır. Şekil 2'de bir LSTM sistem modeli gösterilmektedir. Ayrıca önerilen sistemin pseudo kodu Algoritma 1'de verilmektedir.

Algoritma 1. LSTM sisteminin pseudo kodu (Pseudo code of the LSTM system)

- 1: **Input:** x= Günlük/Aylık veriler
 - 2: **for** t=1:...: 4380/144 **do**
 - 3: **Hesaplama:** Tahmin edilen ortalama sıcaklık
 - 4: **end for**
 - 5: **Output:** Ortalama sıcaklık
-

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1 Veri Seti ve Özellikleri (Dataset and Features)

1/1/2010 ile 31/12/2021 tarihleri arası Kars ilinin Merkez ilçesi istasyonundan her gün için hava durumu verileri, T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanmıştır. Veri setinin özellikleri arasında ortalama rüzgâr hızı, yağış, ortalama nem, ortalama buhar basıncı, ortalama güneşlenme şiddeti, güneşlenme süresi, ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık bulunmaktadır. Tablo 1'de 4380 güne ait meteorolojik ölçümlerden oluşan veri seti gösterilmektedir. Tablo 2'de 144 aya ait meteorolojik ölçümleri içeren aylık veri seti gösterilmektedir. Algoritmayı eğitmek için ilk 10 yıla ait veriler, test etmek için ise son iki yıla ait veriler kullanılmıştır. Ağ eğitilmeden önce veriler veri setindeki en büyük değere bölünerek normalize edilmiştir. Tablo 3'te ağın eğitilmesi sırasında LSTM içerisinde kullanılan parametreler gösterilmektedir.

Tablo 1. 2010-2021 Yılları Arasındaki Kars İlinin Günlük Veri Seti (Daily Data Set of Kars City Between 2010-2021)

No	TOPLAM AÇIK YÜZEY BUHARLAŞMASI mm	ORTALAMA AKTÜEL BASINÇ Pa	ORTALAMA NEM %	ORTALAMA GÜNEŞLENME ŞİDDETİ	GÜNLÜK ORTALAMA RÜZGAR HIZI m/sn	GÜNEŞLENME SÜRESİ saat	ORTALAMA SICAKLIK °C
1	4,90	818,20	85,50	267,01	2,00	5,50	-2,80
2	4,60	816,90	77,80	450,48	4,20	4,60	1,70
3	1,20	812,90	83,50	448,07	4,30	2,70	1,40
4	0,90	813,30	85,70	533,22	2,60	0,00	-0,60
5	1,20	821,60	72,50	447,66	1,60	1,80	-7,00
.
.
.
4376	3,20	821,00	65,20	172,84	1,50	9,90	15,30
4377	2,50	821,50	71,70	93,67	1,30	9,60	17,30
4378	2,70	822,20	65,30	46,09	1,30	10,80	19,90
4379	2,60	821,40	70,00	81,33	1,20	10,50	21,30
4380	3,60	822,80	67,70	177,20	1,40	10,60	19,90

Tablo 2. 2010-2021 Yılları Arasındaki Kars İlinin Aylık Veri Seti (Monthly Data Set of Kars City Between 2010-2021)

No	TOPLAM AÇIK YÜZEY BUHARLAŞMASI mm	ORTALAMA AKTÜEL BASINÇ Pa	ORTALAMA NEM %	TOPLAM GÜNEŞLENME SÜRESİ	ORTALAMA RÜZGAR HIZI m/sn	ORTALAMA SUBUHARI BASINCI Pa	ORTALAMA SICAKLIK °C
1	118,20	822,30	82,30	72,60	2,20	4,00	-3,60
2	140,80	816,60	81,20	69,20	2,30	4,60	-1,30
3	146,70	821,40	67,70	125,20	3,40	5,10	2,60
4	156,30	822,30	74,20	96,80	2,30	6,40	4,90
5	149,30	821,50	70,90	150,40	2,20	8,50	10,00
.
.
.
140	133,00	825,00	70,00	134,00	3,10	4,30	0,20
141	129,80	825,00	84,90	10,90	2,40	5,00	-2,40
142	10,40	822,70	66,00	2231,50	2,30	7,20	6,50
143	579,60	821,70	74,30	0,00	2,70	9,80	-6,80
144	164,00	819,90	79,20	127,00	2,60	10,40	-6,20

Tablo 3. Ağın Eğitilmesinde Kullanılan Parametreler (Parameters Used in Training the Network)

PARAMETRE	DEĞER
Giriş	6
Çıkış	1
Nöron	13
Katman	4
Epochs	125
Batch Boyutu	100
Öğrenme oranı	0.001

4.2 Değerlendirme Metrikleri (Evaluation Metrics)

Tahmin için önerilen yöntemlerin performansını değerlendirmek için, hataların karesel ortalamasının karekökü (RMSE), ortalama kare hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) ve korelasyon katsayısı (R^2) olmak üzere beş metrik kullanılmıştır. Bu metrikler genellikle zaman serisi tahmininde değerlendirme için kullanılmaktadır. Metrik değerler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (H_{tah,j} - H_{ölç,j})^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (H_{tah,j} - H_{ölç,j})^2 \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |H_{tah,j} - H_{ölç,j}| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{H_{tah,j} - H_{ölç,j}}{H_{ölç,j}} \right| \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{N \left(\sum_{j=1}^N H_{tah,j} H_{ölç,j} \right) - \left(\sum_{j=1}^N H_{tah,j} \right) \left(\sum_{j=1}^N H_{ölç,j} \right)}{\sqrt{\left(N \sum_{j=1}^N (H_{tah,j})^2 - (H_{ölç,j})^2 \right) \left(N \sum_{j=1}^N (H_{ölç,j})^2 - (H_{tah,j})^2 \right)}} \quad (5)$$

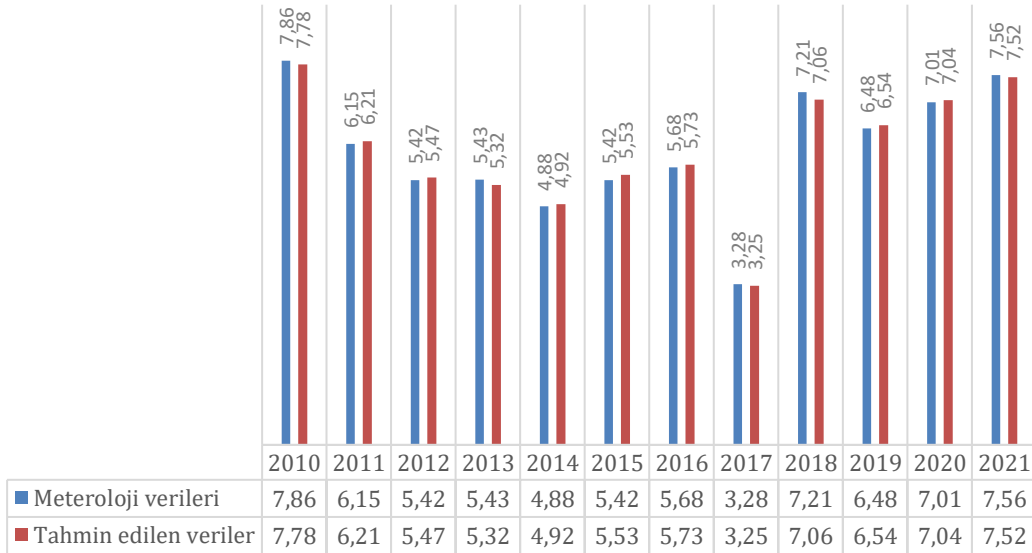
Burada H_{tah} , tahmin edilen ortalama sıcaklık $H_{ölç}$, ölçülen ortalama sıcaklık ve N , veri kümesindeki eleman sayısıdır.

4.3 Sonuçlar ve Analiz (Results and Analysis)

Bu çalışmada, sınıflandırma ve regresyon analizi için kullanılan denetimli öğrenme modeli olan destek vektör makineleri (SVM) ile LSTM incelenmiştir. Ancak LSTM modelinin performansı, modelin karmaşıklığı arttıkça hem aylık hem de günlük ölçümler ile gerçekleştirilen tahminlerin çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu, değerlendirme metrikleriyle yapılan performans karşılaştırmasıyla ayrıca doğrulanmaktadır. Performans metrikleri Tablo 4'de gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3'te 2010-2021 yıllarına ait yıllık ortalama sıcaklık gerçek değerlerinin ve LSTM ile tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 4. Performans Metrikleri (Performance Metrics)

		R-Squared	RMSE	MSE	MAE	MAPE
LSTM	Aylık	0,9867	0,4821	0,2324	0,4649	0,0242
	Günlük	0,9937	0,4976	0,2476	0,4987	0,0174
SVM	Aylık	0,8632	0,4244	0,1801	0,4152	0,0199
	Günlük	0,8869	0,4383	0,1921	0,4289	0,0154



Şekil 3. 2010-2021 yılları arasındaki Kars ilinin yıllık ortalama sıcaklık gerçek ve LSTM ile tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of annual average temperature actual and LSTM predicted values of Kars city between 2010-2021)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, Kars ilinin Merkez ilçesine ait istasyondan alınan gerçek hava durumu verilerini kullanarak ortalama günlük hava sıcaklığını tahmin etmek için LSTM uygulanabilirliği araştırılmıştır. Ortalama hava sıcaklığı, kendi tarihsel değerlerinin yanı sıra ortalama rüzgâr hızı, yağış, ortalama nem, ortalama buhar basıncı, ortalama güneşlenme şiddeti, güneşlenme süresi, ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık gibi diğer hava değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Sonuçlar, daha karmaşık derin sinir ağları kullanıldığında tahminlerin doğruluğunun arttığını göstermektedir. Aylık ve güncel olarak ele alınan durumlarda günlük ele alınan durumun 0,9937 oranında doğruluk oranına sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, çok değişkenli, çok adımlı ve çok bölge bir hava durumu tahmin problemi oluşturmak için daha fazla konumun dahil edilmesi amaçlanmaktadır. Sıcaklık tahmini için barometrik basınç, bağıl nem,

rüzgâr yönü, rüzgâr hızı gibi daha fazla hava değişkeninin etkisini araştırılması planlanmaktadır. Son olarak, daha doğru tahminler oluşturup oluşturamayacaklarını görmek için daha karmaşık derin öğrenme tabanlı tahmin modelleri denenecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmaya katkılarından dolayı T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Tajfar, E.; Bateni, S.M.; Lakshmi, V.; 2020. Estimation of surface heat fluxes via variational assimilation of land surface temperature, air temperature and specific humidity into a coupled land surface-atmospheric boundary layer model. *J. Hydrol.* 583, 124577.
- Valipour, M.; Bateni, S.M.; Gholami Sefidkouhi, M.A.; Raeini-Sarjaz, M.; Singh, V.P., 2020. Complexity of Forces Driving Trend of Reference Evapotranspiration and Signals of Climate Change. *Atmosphere (Basel)*, 11, 1081.
- Schulte, P.A.; Bhattacharya, A.; Butler, C.R.; Chun, H.K.; Jacklitsch, B.; Jacobs, T.; Kiefer, M.; Lincoln, J.; Pendergrass, S.; Shire, J.; et al., 2016. Advancing the framework for considering the effects of climate change on worker safety and health. *J. Occup. Environ. Hyg.* 13, 847–865.
- Sardans, J.; Peñuelas, J.; Estiarte, M., 2006. Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland. *Plant Soil*, 289, 227–238.
- Tang, C.; Crosby, B.T.; Wheaton, J.M.; Piechota, T.C. Assessing streamflow sensitivity to temperature increases in the Salmon River Basin, Idaho. *Glob. Planet. Change* 2012, 88–89, 32–44.
- Jovic, S.; Nedeljkovic, B.; Golubovic, Z.; Kostic, N. Evolutionary algorithm for reference evapotranspiration analysis. *Comput. Electron. Agric.* 2018, 150, 1–4.
- Marzo, A.; Trigo, M.; Alonso-Montesinos, J.; Martínez-Durbán, M.; López, G.; Ferrada, P.; Fuentealba, E.; Cortés, M.; Batlles, F.J., 2017. Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation. *Renew. Energ.* 113, 303–311.
- Smith, D.M.; Cusack, S.; Colman, A.W.; Folland, C.K.; Harris, G.R.; Murphy, J.M. Improved Surface Temperature Prediction for the Coming Decade from a Global Climate Model. *Science* 2007, 317, 796–799.
- Yang, T.; Sun, F.; Gentine, P.; Liu, W.; Wang, H.; Yin, J.; Du, M.; Liu, C., 2019. Evaluation and machine learning improvement of global hydrological model-based flood simulations. *Environ. Res. Lett.*, 14, Water, 13, 1294 14 of 15.
- Lee, J.; Kim, C.G.; Lee, J.E.; Kim, N.W.; Kim, H., 2018. Application of artificial neural networks to rainfall forecasting in the Geum River Basin, Korea. *Water (Switzerland)*, 10, 1448.
- Zou, Q.; Xiong, Q.; Li, Q.; Yi, H.; Yu, Y.; Wu, C., 2020, A water quality prediction method based on the multi-time scale bidirectional long short-term memory network. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 16853–16864.
- Altan Dombayci, Ö.; Gölcü, M. Daily means ambient temperature prediction using artificial neural network method: A case study of Turkey. *Renew. Energ.* 2009, 34, 1158–1161.
- Ustaoglu, B.; Cigizoglu, H.K.; Karaca, M. Forecast of daily mean, maximum and minimum temperature time series by three artificial neural network methods. *Meteorol. Appl.* 2008, 15, 431–445.
- Kumar, P.; Kashyap, P.; Ali, J. Temperature Forecasting using Artificial Neural Networks (ANN). *J. Hill Agric.* 2013.
- Tran, T.T.K.; Lee, T.; Kim, J.S. Increasing neurons or deepening layers in forecasting maximum temperature time series? *Atmosphere (Basel)* 2020, 11, 1072.
- Li, C.; Zhang, Y.; Zhao, G. Deep Learning with Long Short-Term Memory Networks for Air Temperature Predictions. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM)*, Dublin, Ireland, 16–18 October 2019; pp. 243–249.
- Abhishek, K.; Singh, M.P.; Ghosh, S.; Anand, A. Weather Forecasting Model using Artificial Neural Network. *Procedia Technol.* 2012, 4, 311–318.
- Afzali, M.; Afzali, A.; Zahedi, G. The Potential of Artificial Neural Network Technique in Daily and Monthly Ambient Air Temperature Prediction. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 2012, 3, 33–38.
- Salman, A.G., Kanigoro, B., Heryadi, Y., 2015. Weather forecasting using deep learning techniques, in: 2015 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), IEEE. pp. 281–285.
- Xingjian, S., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D.Y., Wong, W.K., Woo, W.c., 2015. Convolutional lstm network: A machine learning approach for precipitation nowcasting, in: *Advances in neural information processing systems*, pp. 802–810.
- Yang, Q., Lee, C.Y., Tippet, M.K., 2020. A long short-term memory model for global rapid intensification prediction. *Weather and Forecasting* 35, 1203–1220. Hochreiter, S. Long Short-Term Memory. *Neural Comput.* 1997, 1780, 1735–1780.
- Salcedo-Sanz, S.; Deo, R.C.; Carro-Calvo, L.; Saavedra-Moreno, B., 2016. Monthly prediction of air temperature in Australia and New Zealand with machine learning algorithms. *Theor. Appl. Climatol.*, 125, 13–25.
- Rajendra, P.; Murthy, K.V.N.; Subbarao, A.; Boadh, R., 2019. Use of ANN models in the prediction of meteorological data. *Model. Earth Syst. Environ.*, 5, 1051–1058.

Smith, B.A.; McClendon, R.W., 2007. Hoogenboom, G. Improving Air Temperature Prediction with Artificial Neural Networks. Int. J. Comput. Inf. Eng., 1, 3159.



METEOROLOJİK PARAMETRELERİN HAVA KİRLİLİĞİNE ETKİSİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ – MUŞ İLİ (2021)

Zinnur YILMAZ^{1*}

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>ANOVA, Hava Kirliliği, Korelasyon, Pm10 ve SO2, Zamansal Değişim.</i>	<p>Bu çalışma, Türkiye’de 2020 yılında en fazla hava kirliliğinin görüldüğü şehir olan Muş il merkezine ait bazı meteorolojik parametreler ile kükürt dioksit (SO₂) ve çapı 10 mikrometreden küçük partikül madde (PM10) değeri arasındaki ilişkilerin istatistiksel olarak araştırılmasını amaçlamaktadır. Bu nedenle çalışmada, varyans analizi (ANOVA), korelasyon ve regresyon modellerinden yararlanılmıştır. Muş il merkezinde 2021’de ortalama PM10 değeri 90.21 µg m⁻³ ve SO₂ değeri ise 9.04 µg m⁻³ olarak hesaplanmıştır. Yapılan istatistiksel analizlerin sonuçlarına göre; ortalama PM10 değerleri Ocak, Mart, Ekim ve Kasım ayları ile diğer aylar arasında bir fark olduğu, SO₂ değerlerinde ise Ocak, Şubat, Mayıs, Temmuz, Kasım ve Aralık ile diğer aylar arasında %95 güven aralığında anlamlı farkların olduğu görülmektedir. Pearson korelasyon analizi sonuçlarına göre, PM10 seviyelerinin değişimlerinde basınç (pozitif), sıcaklık ve rüzgar hızı (negatif) ile SO₂ parametresinde ise en etkili değişkenin sıcaklık (negatif) ve nem (pozitif) etkili olduğu belirlenmiştir. PM10 ve SO₂’in tahmin edilebilmesi için meteorolojik değişkenlere göre regresyon modelleri oluşturulmuş ve modeller, PM10 parametresinin %23’ünü, SO₂’nin ise ancak %54 oranında açıklanabilmektedir. Ayrıca Muş’ta hava kirliliği, sıcaklığın düşük olduğu zamanlarda PM10 ve SO₂ değerlerinin yüksek düzeylerde olmasından dolayı öncelikle ısınmadan kaynaklı olduğu, PM10 ve SO₂ seviyelerinin birbiriyle etkileşimi açısından korelasyon katsayısına bakıldığında yüksek bir ilişkiye (r=0.625) sahip olduğu sonucuna varılmaktadır.</p>

STATISTICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF METEOROLOGICAL PARAMETERS ON AIR POLLUTION – CITY OF MUŞ (2021)

Keywords	Abstract
<i>ANOVA, Air Pollution, Correlation, Pm10 and SO2, Temporal Variation.</i>	<p>This study aims to statistically investigate the relationships between some meteorological parameters of the city center of Muş, which is the city with the highest air pollution in Turkey in 2020, and the value of sulfur dioxide (SO₂) and particulate matter (PM10) with a diameter of less than 10 micrometers. Therefore, analysis of variance (ANOVA), correlation and regression models were used in the study. In the center of Muş, the mean PM10 value was 90.21 µg m⁻³ and the SO₂ value was 9.04 µg m⁻³ in 2021. There is a difference between the mean PM10 values in January, March, October and November and other months, it is observed that there are differences in SO₂ values between January, February, May, July, November and December and other months (significant at 95% confidence interval). According to the results of the Pearson correlation analysis, it was determined that the pressure (positive), temperature and wind speed (negative) in the changes of PM10 levels and the most effective variables in the SO₂ parameter were temperature (negative) and humidity (positive). In the last part of this study, regression models were created according to meteorological variables in order to predict PM10 and SO₂ separately. If statistically significant meteorological parameters are included in the regression model, 23% of PM10 and only 54% of SO₂ can be explained. In addition, it is concluded that air pollution in Muş is primarily caused by heating, since the PM10 and SO₂ values are high when the temperature is low. Considering the</p>

* İlgili yazar / Corresponding author: zinnuryilmaz@cumhuriyet.edu.tr, +90-346-487-2476

correlation coefficient in terms of the interaction of PM10 and SO₂ levels with each other, it is concluded that there is a high correlation (r=0.625).

Alıntı / Cite

Yılmaz, Z., (2022). Meteorolojik Parametrelerin Hava Kirliliğine Etkisinin İstatistiksel Analizi - Muş İli (2021), Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1182-1193.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Z. Yılmaz, 0000-0002-2029-3854

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.04.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	13.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	17.06.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Atmosferde bulunan kirleticilerin canlı ve cansız varlıklara zarar verecek etkiler ortaya çıkaracak konsantrasyon ve sürede bulunması şeklinde tanımlanan hava kirliliği, son yüzyıldaki dünyanın nüfus artışı sonucu insan ihtiyaçlarının farklılaşması ve artmasıyla birlikte yoğun nüfuslu yerleşim alanlarında ısınmadan kaynaklanan gazlar ile partikül maddeler, yeşil alanların azalması, enerji tüketiminin artması ve motorlu araç kullanımının yaygınlaşması, şehirleşme, sanayi ve endüstrilerdeki gelişmeler günümüzde yaşanan hava kirliliğinin en önemli nedenleridir (Cavkaytar vd., 2013; Kardeşoğlu vd., 2011; Koç, 1999; Tecer, 2011; Wark ve Warner, 1981). Hava kirliliği, küresel olarak önde gelen çevresel risk faktörüdür. Bu nedenle hava kirliliği günümüzde önemli bir sorun olarak görülmekte olup son zamanlarda yapılan araştırmalardan elde edilen verilere göre insan sağlığını tehdit eden ilk on tehlikeden biri olarak değerlendirilmektedir (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2014). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) raporlarına göre bir yılda yaklaşık 7 milyon ölümün, hava kirliliği etkilerine bağlı olduğu raporlanmıştır (WHO, 2018). Küresel bir çalışmada hava kirliliği, yılda 4-9 milyon ölüm ile yüz milyonlarca yıl sağlıklı yaşam kaybına neden olduğunu hesaplanmış olup, bu durumun genellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde görüldüğünü raporlanmıştır (Burnett vd., 2018; Murray vd., 2020; Vohra vd., 2021; WHO, 2018). Ayrıca 2050 yılında Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) tarafından dış ortam hava kirliliği, insan sağlığı açısından çevresel şartlara bağlı ölümler arasında birinci neden olacağı raporlanmıştır (OECD, 2012). DSÖ ise her yıl milyonlarca insanın ölümüne neden olan hava kirliliğini "görünmez katil" şeklinde adlandırmaktadır (WHO, 2018). Türkiye'deki hava kirliliği nedeni, genellikle ısınmak için kullanılan yakıtlar ve motorlu araçların olduğu bilinmektedir. Ayrıca bu kirleticilere endüstrilerden gelen emisyonlardaki kirleticiler de eklenmektedir. Türkiye'de 1950'li yıllarda başlayan sanayileşme ile hızlı kentleşmeye bağlı olarak sorun haline gelmiş olan hava kirliliği ilk kez 1960'lı yıllarda kayıt altına alınmış (Çiçek vd., 2004; Garipağaoğlu, 2006) olup hava kirliliği ve kontrolü izlenmesi kapsamında Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY) 2008 yılında yürürlüğe girmiştir. Türkiye'de hava kirliliği genellikle kükürt dioksit (SO₂) ve çapı 10 mikrometre küçük partikül madde (PM10) değişimlerinin ölçülmesiyle saptanmaktadır (Cavkaytar vd., 2013).

Partikül madde, havada katı ve sıvı damlacıkların karışımından oluşmaktadır. Bazı partikül maddeler doğrudan yayılırken bazıları da çeşitli kaynaklardan yayılan kirleticilerin atmosferde reaksiyona girmesiyle de oluşmaktadır. Partikül madde farklı boyutlarda olabilir. PM10'da bulunan "10" sayısı, çapı 10 µm'den daha küçük olan toz parçacıklarını belirtmektedir. PM10, toz, duman ve is gibi çok çeşitli kaynaklardan, ayrıca görünür ve görünmez parçacıklardan oluşmaktadır. Bunlara fosil yakıtlar, polenler, yer tozu, inşaat ve sanayi tozu örnek olarak verilebilir. Ortamdaki partikül madde konsantrasyonu sağlık sorunlarına neden olan en önemli kirleticiler arasındadır. PM10 solunum, astım, bronşit, akciğer ve kalp sorunlarından, göz, boğaz ve burun tahrişlerine kadar olan hastalıklar arasında doğrusal bir ilişkisi vardır (Akyürek, 2012; Babin vd., 2008; Tecer vd., 2009; Turgut ve Temiz, 2015).

Kükürt dioksit (SO₂) ise, kömür ve fuel-oil gibi yakıtların yapısında olan kükürt bileşiklerinin yanmasıyla birlikte açığa çıkan, renksiz, yanmayan, boğucu ve asidik bir gazdır. Her yıl SO₂'in %60'ı, kömür yakılmasıyla oluşmaktadır. Mevcut havada bulunan temel kükürt dioksit konsantrasyonu, endüstriyel prosesler, ısınmak için tüketilen evsel yakıtlar, enerji elde etmek için kullanılan termik santraller ve bir kısmı da dizel yakıtlı araçların kullanımından kaynaklanmaktadır. SO₂ değeri çoğunlukla ısınmak için kömür kullanımının çok olduğu şehirlerin merkezlerinde ve sanayi bölgelerinin çevrelerinde yüksek değerlerdedir. Ayrıca SO₂, orman yangını, volkan patlaması gibi doğal olaylar sonucunda da oluşmaktadır. Volkanik faaliyetlerden ve sanayide kükürt içeren yakıtların yanması sonucu oluşan SO₂, havada oksijen ve su ile reaksiyona girerek ikincil kirleticilerden olan önce sulfüroz asit (H₂SO₃)'i, sonra ise sülfürik asit (H₂SO₄)'e dönüşerek asit yağmurlarını oluşturmaktadır (Akyürek, 2012).

PM10 ve SO₂ dışında kalan kirleticilerin konsantrasyonları ülke genelinde çok az noktada ölçülmektedir. Türkiye'de son zamanlarda hava kirliliği endişe verici boyutlara ulaşmıştır. Hava kirleticilerin ölçüm sonuçlarının yüksek çıkması, canlıların soluduğu havanın sağlıklı olmadığını göstermektedir. Bu sebepten dolayı Türkiye, 2009 yılından başlayarak hava kirleticilerinin sınır değerlerini azaltmaya başlamıştır. Fakat hala hava kirliliği

HKDYY'nin izin verilebilir sınır değerlerin oldukça üzerindedir. HKDYY'de verilen PM10 ve SO₂ için sınır değerlerin yıllara göre değişimi Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Türkiye için yıllara göre PM10 ve SO₂ sınır değerleri (µg m⁻³). (PM10 and SO₂ limit values for Turkey by years (µg m⁻³))

Parametre	Zaman	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	İzin verilebilir sınır değeri geçen gün sayısı
PM10	24 saat	180	140	100	90	80	70	60	50	50	50	35
	1 yıl	96	78	60	56	52	48	44	40	40	40	-
SO ₂	24 saat	310	280	250	225	200	175	150	125	125	125	3
	1 yıl	36	28	20	20	20	20	20	20	20	20	-

Çalışma alanı olan Muş ili, son yıllarda hava kirliliğinden çok ciddi boyutlarda etkilenmektedir. Bu bağlamda HKDYY'ye göre SO₂ ve PM10 verileri analiz edildiğinde özellikle PM10, izin verilebilir sınır değerinden oldukça üstünde seyrettiği görülmektedir. 2020 yılında Muş'ta PM10 değeri izin verilebilir sınır değerinden 306 gün üzerinde ölçülerek Türkiye'de en fazla hava kirliliği olan il olmuştur. Bu çalışmada, literatüre bakıldığında Muş ili için yapılmış hava kirliliği konusunda bir çalışmanın olmadığından dolayı, Muş'un 2021 yılındaki iklim verilerinin (hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, basınç ve nem) hava kirleticileri (PM10 ve SO₂) üzerindeki etkileri istatistikî yöntemlerle araştırılmıştır.

Bu çalışmada aşağıda sıralanan araştırma sorularına cevap aranmaktadır.

- Muş'ta hava kirliliği parametrelerinden SO₂ ve PM10'nin zamansal (saatlik, günlük, aylık ve yıllık) değişimi nasıldır?
- Muş'ta (2021 yılı için) iklim koşullarının (hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, nem ve basınç) SO₂ ve PM10 üzerinde belirleyici etkisi var mıdır?
- Muş'ta 2021 yılı hava kirleticilerin ortalamalarının hangi aylarda aynı ya da farklı olduğu bulunabilir mi, aylar arasındaki ilişki nedir?
- Muş'ta hava kirleticilerin tahmini için iklim değişkenleri yardımıyla bir model yapılabilir mi?

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada Muş ilinin hava kirliliği ile meteorolojik parametrelerini oluşturan 2021 yılı verileri istatistiksel olarak analiz edilerek, tablo ve grafikler ile sonuçlar gösterilmiş olup SO₂ ve PM10'nin zamansal konsantrasyonları şekillerde verilmiş, elde edilen sonuçlar yönetmelikçe belirlenen izin verilebilir sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan PM10 ve SO₂ verileri T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Muş ilinde bulunan Hava Kalitesi İzleme İstasyonuna aittir (<http://www.havaizleme.gov.tr/Services/AirQuality>). Ölçümler 1 Ocak 2021 00:00'dan 31 Aralık 2021 23:00'e kadar saatlik şekilde alınmıştır. Elde edilen ölçümlerin ortalama değerleri günlere, aylara ve yıllara göre zamansal olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca Muş'un hava kirliliğini etkileyen meteorolojik koşulların etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada yararlanılan meteorolojik parametreler Meteoroloji Genel Müdürlüğünden elde edilmiştir.

2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Çalışmanın bulgular kısmının ilk bölümünde kirletici parametrelerin zamansal analizi yapılmıştır. Burada kirleticilerin ve meteorolojik parametrelerin ortalama (µ) değerleri bulunurken aritmetik ortalama yöntemi kullanılmıştır.

$$\mu_{PM10,SO_2} = \frac{\sum x_{PM10,SO_2}}{N} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de µ kirletici parametresinin ortalama değerini, x kirletici parametresinin değerini ve N ise veri sayısını göstermektedir. Bu çalışmada parametrelerin standart sapmalarının yerine güven aralıklarına bakılmıştır. Güven aralıklarına bakılmasındaki sebep kirletici değerlerinin standart sapmalarından daha dar bir alan vermesidir.

$$CI = \mu \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de µ kirletici parametrenin ortalama değeri, Z_{α/2} değeri ise güven katsayısını (buradaki α güven düzeyini), σ kirletici parametrenin standart sapması ve N ise veri sayısını temsil etmektedir. Çalışmanın aynı bölümünde kirletici parametrelerinin günlük (24 saat) izin verilebilir sınır değerleri geçen gün sayılarını bulurken aşağıdaki koşullardan yararlanılmıştır.

$$Y_{PM10(24saat)} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$Y_{SO_2(24saat)} > 125 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Çalışmanın bulgular kısmının ikinci bölümünde, hava kirletici parametrelerinin değerleri aylar arasında farklı ya da aynı olup olmadığını tespit etmek için varyans analizleri (ANOVA) ve Post-Hoc/LSD testi yapılarak p değerleri hesaplanmıştır. p (probability) değeri, bir sonucun istatistiksel olarak anlamlılığın varlığının ve varsa da var olan farklılığın kanıtının düzeyinin belirlenmesi amacı ile kullanılan bir değerdir (Dawson ve Trapp, 2004). ANOVA'da k tane örnekleme ait ortalamaların eşit olup olmadığı test edilir. Burada H_0 ve H_1 isimlerinde 2 hipotez kurulmaktadır. H_0 hipotezi boş(null) modeli test eder yani hava kirletici konsantrasyonlarının ortalaması arasında fark yoktur olarak ifade edilir. H_1 'deki ifade ise hava kirletici konsantrasyonlarının ortalamaları arasında fark olduğunu ifade etmektedir. Buna göre;
 $p > \alpha$ (0.05) olduğunda H_0 hipotezi kabul edilir veya H_1 hipotezi reddedilir.
 $p < \alpha$ (0.05) olduğunda H_1 hipotezi kabul edilir veya H_0 hipotezi reddedilir.

Çalışmanın bulgular kısmının üçüncü bölümünde her bir meteorolojik faktörlerin hava kirleticileri arasında bir ilişkinin var olup ya da olmadığını, varsa bu ilişkinin yönü ve şiddetinin ne olduğunu hesaplamak için korelasyon yönteminden yararlanılmıştır. İlişkinin yönünü ve derecesini belirten katsayıya korelasyon katsayısı denmekte ve "r" ile gösterilmektedir. Bu çalışmada değişkenler arasındaki ilişkiyi anlamak için pearson korelasyon yöntemi kullanılmıştır.

$$r = \frac{n\sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2][n\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (3)$$

Pearson korelasyon ilişkisinin belirlenmesi için kullanılan Eşitlik (3)'te n değişkenlerin veri sayısı, X_i bir kirletici parametrenin değerini, Y_i diğer bir kirleticinin değerini temsil etmektedir. r değeri, 0.19'dan küçükse veriler arasında zayıf ilişki vardır ya da ilişki yok, 0.2 ve 0.39 arasındaysa zayıf, 0.4 ve 0.59 arasındaysa orta şiddette, 0.6 ve 0.79 arasındaysa yüksek ve 0.8 den büyüğe çok yüksek ilişki olduğu anlaşılır (Çakır Yıldız ve Güneş, 2017).

Çalışmanın bulgular kısmının dördüncü bölümünde, Muş ili için ayrı ayrı PM10 ve SO₂ seviyesini tahmin etmede meteorolojik parametreler arasındaki ilişkileri ortaya koyabilmek için regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon modellerinde PM10 ve SO₂ parametreleri bağımlı değişken, meteorolojik elemanlar ise bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Çalışmada birden fazla bağımsız değişkenin, bağımlı değişken ile ilişkilerini bulmak için çok değişkenli regresyon model oluşturulmuştur. Çok değişkenli regresyona ilişkin matematiksel ifade Eşitlik 4'te verilmektedir.

$$Y_{PM10,SO_2} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te y PM10 veya SO₂ parametresinin değeri, β_0 regresyon sabiti, $\beta_{1,2,\dots,n}$ regresyon katsayısını, $X_{1,2,\dots,n}$ meteorolojik değişkenlerin değerleri ve ε ise hata katsayısını ifade etmektedir. Sabitin ve regresyon katsayılarının önemlilik dereceleri t dağılımı kullanılarak test edilmiştir. Bağımlı değişkenlerin (Y) değişimin yüzdesine bağlı olarak, bağımsız değişkenler (X) tarafından ne kadar etkilendiğini ifade edebilmek için belirleyicilik katsayısı olan R² değeri hesaplanmaktadır.

$$R_{x,y}^2 = 1 - \frac{\text{Regresyonda açıklanamayan kısım}}{\text{Toplam kareler toplamı}} = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te y_i kirleticinin olarak saptanmış değerlerini, \hat{y} regresyon eşitliğinden hesaplanmış değerleri, \bar{y} ise kirletici verilerin ortalamasını ifade etmektedir. Yapılan hesaplama sonucunda X ve Y değişkenleri arasındaki ilişki korelasyon katsayısı ile belirlenmektedir. Bu katsayının {-1,+1} sınırlarına yakınlığı varsa kareleri de bu sınıra yakın olacağından, bağımlı değişkenin ilgili bağımsız değişkenle yüksek bir ilişkiye sahip olduğu sonucuna varılmaktadır (Can, 2013; Çiçek vd., 2004).

3. Bulgular (Result)

3.1. Hava Kirletici ve Meteorolojik Parametrelerin Analizi (Analysis of Air Pollutant and Meteorological Parameters)

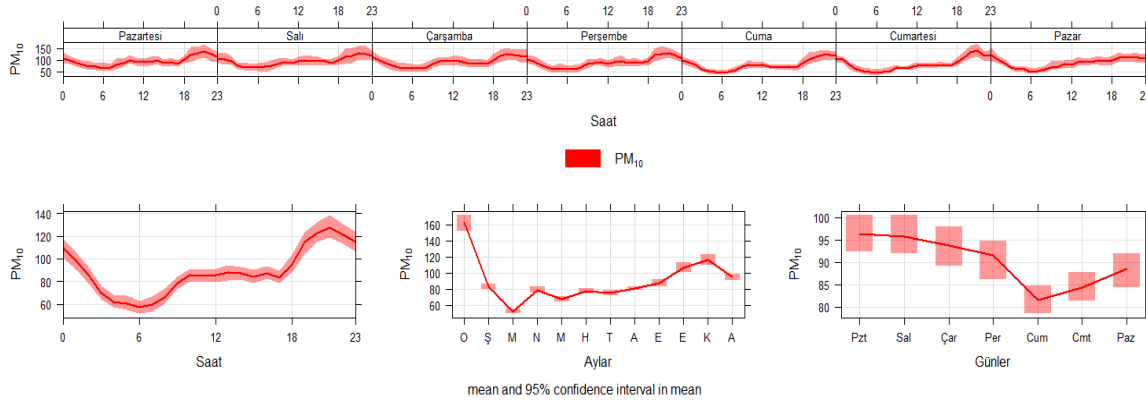
Çalışmada kullanılan veri setini oluşturan hava kirleticiler (PM10 ve SO₂) ile meteorolojik parametrelere (sıcaklık (t), nem (rh), basınç (p), rüzgar hızı (ws) ve rüzgar yönü (wd)) ait tanımlayıcı istatistiksel hesaplamalar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Hava Kirlenmelerine ve Meteorolojik Parametrelere Ait Genel Tanımlayıcı İstatistikler (General Descriptive Statistics of Air Pollutants and Meteorological Parameters)

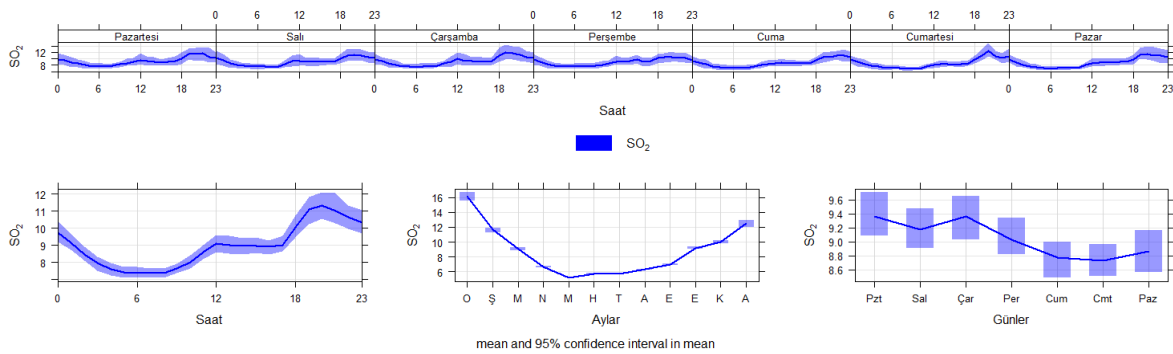
	Hava kirlenici		Meteorolojik Parametre					
	PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	SO ₂ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	t (°C)	rh (%)	p (hPa)	ws (m/sn)	wd (°)	
Ortalama (μ)	90.21	9.04	12.38	53.67	868.84	0.88	115.91	
95% Ortalama için Güven Aralığı (CI)	Alt Limit	88.62	8.93	11.20	51.03	868.33	0.85	103.88
	Üst limit	91.80	9.16	13.56	56.31	869.35	0.92	127.93
Değişim Aralığı	Minimum	16.38	4.78	-19.60	16.70	853.20	0.30	
	Maksimum	427.90	27.84	30.30	99.30	881.90	2.60	
Veri Sayısı (N-gün)	339	340	365	365	365	365	365	

Muş ilinin 2021 yılı incelenen parametrelerin ortalama değerlerine bakıldığında PM10 $90.21 \mu\text{g m}^{-3}$, SO₂ $9.04 \mu\text{g m}^{-3}$, sıcaklık $12.38 \text{ }^\circ\text{C}$, nem %53.67, basınç 868.84 hPa, rüzgar hızı 0.88 m sn^{-1} ve rüzgar yönü olarak 115.91 ° olduğu hesaplanmıştır.

PM10 değerleri incelendiğinde Ocak ($163.24 \mu\text{g m}^{-3}$), Ekim ($106.07 \mu\text{g m}^{-3}$), Kasım ($116.07 \mu\text{g m}^{-3}$), Aralık ($94.76 \mu\text{g m}^{-3}$) aylarında en yüksek; Mart ($51.63 \mu\text{g m}^{-3}$) ve Mayıs ($67.17 \mu\text{g m}^{-3}$) aylarında ise en düşük olduğu gözlenmiştir. 2021 yılında en yüksek PM10 seviyeleri Pazartesi, Salı, Çarşamba ve Perşembe günlerinde olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca PM10 konsantrasyonu akşam 19:00 ile 00:00 saatlerinde maksimum seviyede olduğu görülmüştür (Şekil 1).

**Şekil 1.** Muş ilinde ölçülen PM10 parametresinin ortalama saatlik, günlük, aylık değerleri (Mean hourly, daily and monthly values of PM10 parameter measured in Muş province)

SO₂ konsantrasyonuna bakıldığında Ocak ($16.14 \mu\text{g m}^{-3}$), Şubat ($11.64 \mu\text{g m}^{-3}$), Aralık ($12.47 \mu\text{g m}^{-3}$) aylarında en yüksek; Mayıs ($5.20 \mu\text{g m}^{-3}$), Haziran ($5.74 \mu\text{g m}^{-3}$) ve Temmuz ($5.77 \mu\text{g m}^{-3}$) aylarında ise en düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca 2021 yılında en yüksek SO₂ seviyeleri (aynı PM10'da görüldüğü gibi) Pazartesi, Salı, Çarşamba ve Perşembe günlerinde olduğu hesaplanmıştır. Saatlik SO₂ ise akşam 18:00 ile 00:00 saatlerinde maksimum seviyelerde olduğu hesaplanmıştır (Şekil 2).

**Şekil 2.** Muş ilinde ölçülen SO₂ parametresinin ortalama saatlik, günlük, aylık değerleri (Mean hourly, daily and monthly values of SO₂ parameter measured in Muş province)

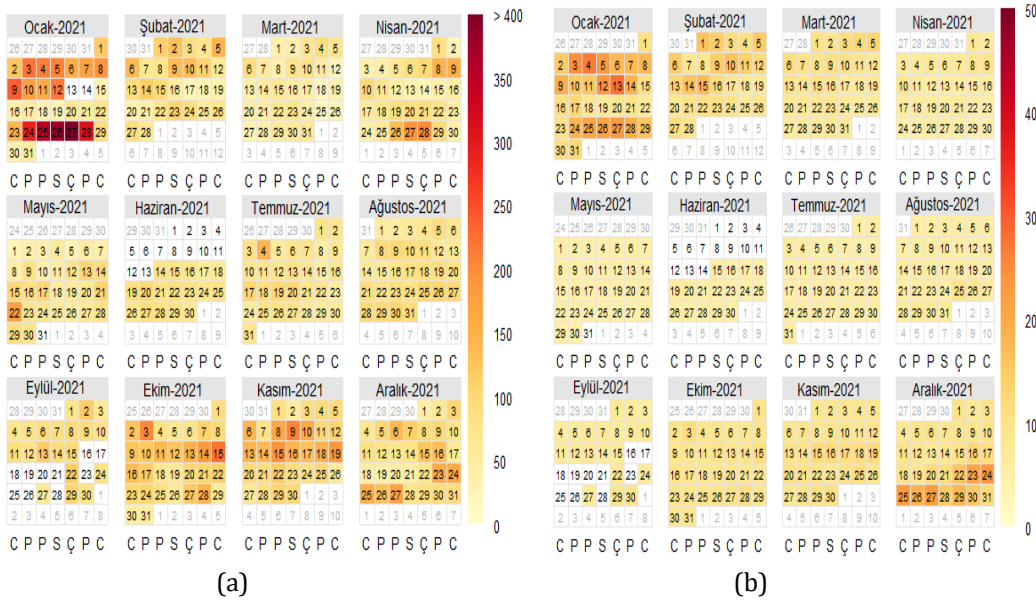
24 saatlik ortalama PM10 ve SO₂ değerleri incelendiğinde; HKDYY'nin izin verdiği PM10 için $50 \mu\text{g m}^{-3}$, SO₂ için $125 \mu\text{g m}^{-3}$ 'e göre sınır aşım günleri sayıldı (Tablo 3). PM10 için düşük değer 25.03.2021 tarihinde $16.38 \mu\text{g m}^{-3}$,

en yüksek PM10 değeri ise 27.01.2021 tarihinde $427.90 \mu\text{g m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Muş ilinde yapılan ölçümler sonucunda 24 saatlik ortalama PM10 için HKDYY'nin koyduğu sınır değer olan $50 \mu\text{g m}^{-3}$ değeri, 2021 yılında 282 gün aşılmıştır. İzin verilebilen bu PM10 değeri ($50 \mu\text{g m}^{-3}$) yılda 35 gün üzerinde olmaması gerekmektedir. Oysaki bu değer Muş'ta tam 8.05 kat fazla olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca yönetmelikte PM10 için yıllık ortalama değer $40 \mu\text{g m}^{-3}$ olarak belirlenmiş olmasına rağmen Muş'ta bu değer $90.21 \mu\text{g m}^{-3}$ 'tür. SO₂ için ise min değer 26.05.2021 tarihinde $4.78 \mu\text{g m}^{-3}$, max SO₂ değeri ise 13.01.2021 tarihinde $27.84 \mu\text{g m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre HKDYY'ye göre SO₂ sınır değeri olan 24 saatlik ortalama $125 \mu\text{g m}^{-3}$ değeri ile yıllık ortalama $20 \mu\text{g m}^{-3}$ değerleri 2021 yılında aşılmamıştır.

Tablo 3. Hava Kirleticilerin 2021 yılında Türkiye ve AB yönetmeliklerine göre izin verilebilen sınır değerleri geçen gün sayısı (The number of days in which Air Pollutants exceed the allowable limit values according to Turkish and EU regulations in 2021)

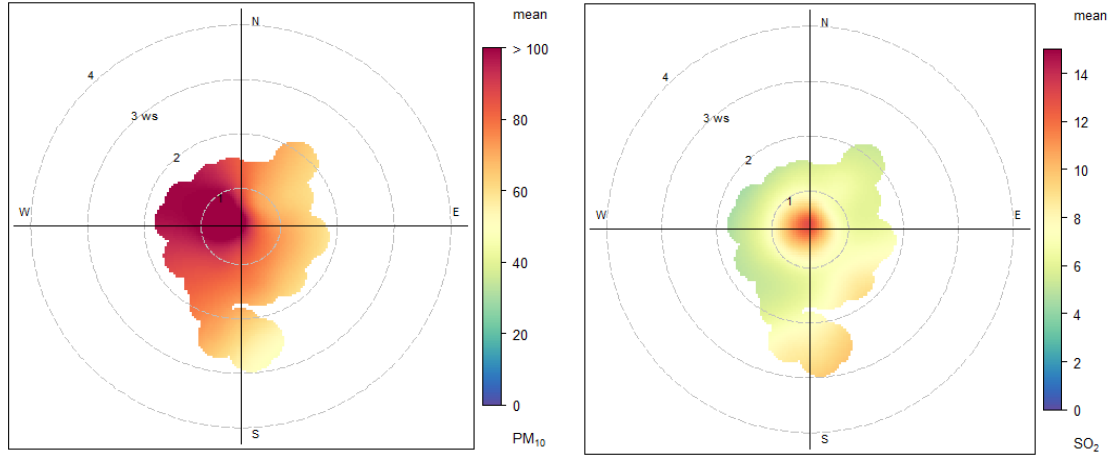
Parametre	HKDYY'ye göre Sınır Değeri Geçen Gün Sayısı
PM10	282
SO ₂	0

Muş'ta 2021 yılına ait her bir gün için ölçülen kirleticilerin ortalamaları hesaplanmış ve kirletici dağılımlarını gösterebilmek için bir kirlilik takvimi oluşturulmuştur (Şekil 3). Kirlilik takviminden de görüleceği üzere en yüksek PM10 seviyesine sahip günler 24-28 Ocak arası olarak tespit edilmiştir. En yüksek PM10 konsantrasyonun ölçüldüğü bugünlerden önce ve sonrasında herhangi bir yüksek değer oluşmadığı da kirlilik takviminden görülmektedir. Şehir merkezine ait SO₂ en yüksek olduğu günler yine Ocak ayında ve 25-27 Ocak 2021 günleri görülmektedir. Hem PM10 hem de SO₂ için birleşme günleri olan 24-28 Ocak arasında PM10 ve SO₂ konsantrasyonunun maksimum seviyeye çıkararak olağan dışı bu durum incelendiğinde, o tarihlerde 2021 yılı içinde ölçülen sıcaklık değerlerinin ($-13.8 \text{ }^\circ\text{C}$) en düşük seviyesinde olduğu görülmektedir. Bu oluşan en yüksek PM10 ve SO₂ değerlerinin ısınmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. Muş ilinin 2021 yılı kirlilik takvimi (a) PM10, (b) SO₂ (The pollution calendar of Muş province for 2021 (a) PM10, (b) SO₂)

Muş için alınan 2021 yılı verileri kullanılarak hazırlanan kirlilik gülü grafiklerinde (Şekil 4) PM10 açısından istasyonun önemli ölçüde KKB, KB, BKB, B ve BGB yönlerinden gelen kirletici emisyonlarına maruz kaldığı belirlenmiştir. SO₂ açısından kirlilik ise daha çok G yönünden ve merkezden kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 4. Muş ilinde ölçülen PM₁₀(a) ve SO₂(b) parametrelerine ait kirlilik gülü grafikleri ($\mu\text{g m}^{-3}$) (Pollution rose graphs of PM₁₀(a) and SO₂(b) parameters measured in Muş province ($\mu\text{g m}^{-3}$))

3.2. Varyans Analizi - ANOVA (Analysis of Variance - ANOVA)

Muş için hava kirletici değerleri aylar bazında incelendiğinde, aylar arasında PM₁₀ ve SO₂ değerlerinde fark olup olmadığını bulabilmek amacıyla varyans analizleri (ANOVA) yapılmıştır. Kirleticilerin aylara ait ortalamaları ile genel tanımlayıcı istatistikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Hava kirleticilerin aylara ait genel tanımlayıcı istatistikleri (General descriptive statistics of air pollutants for months)

	PM ₁₀						SO ₂					
	N	Ortalama	95% Ortalama için Güven Aralığı		En Düşük Değer	En Yüksek Değer	N	Ortalama	95% Ortalama için Güven Aralığı		En Düşük Değer	En Yüksek Değer
			Alt Değer	Üst Değer				Alt Değer	Üst Değer			
Ocak	654	163.24	153.61	172.87	3.81	577.65	729	16.14	15.54	16.74	5.22	61.82
Şubat	672	82.86	78.96	86.76	7.53	343.53	669	11.64	11.27	12.00	5.19	41.53
Mart	729	51.63	48.99	54.27	5.41	298.64	733	9.06	8.84	9.29	5.28	31.78
Nisan	718	78.78	74.64	82.92	5.09	305.96	715	6.63	6.51	6.74	4.67	14.66
Mayıs	556	67.17	63.65	70.69	8.00	333.77	588	5.20	5.18	5.23	4.12	7.27
Haziran	347	77.22	74.24	80.20	24.00	213.09	360	5.74	5.66	5.82	4.41	11.33
Temmuz	734	75.08	72.34	77.83	13.42	395.77	737	5.77	5.72	5.81	4.77	12.43
Ağustos	690	80.33	77.88	82.78	20.31	314.99	700	6.31	6.25	6.38	5.35	13.49
Eylül	320	87.05	82.82	91.28	27.18	383.35	341	6.99	6.90	7.09	5.26	10.59
Ekim	541	106.07	100.01	112.13	10.17	702.89	544	9.20	9.06	9.34	5.83	18.7
Kasım	692	116.07	108.91	123.24	3.59	700.44	698	9.97	9.77	10.18	5.66	26.21
Aralık	722	94.76	90.99	98.53	7.75	263.32	738	12.47	12.01	12.93	6.20	58.32
Ortalama	7375	90.21	88.62	91.80	3.59	702.89	7552	9.07	8.94	9.21	4.12	270.29

N: veri sayısı – Saatlik veriler kullanılarak tablo oluşturulmuştur.

2021 yılına ait PM₁₀ ve SO₂ değişimlerinin analiz edildiği, aylar arasında kirletici değerlerinin değişimlerinin nasıl olduğu, bu kirleticilerin hangi ayda en yüksek değere veya hangi ayda en düşük değere ulaştığını bulmak için varyans analizi (ANOVA) ve Post-Hoc çoklu karşılaştırma testleri uygulanmıştır. Hava kirletici parametrelerin 2021 yılındaki aylar arasında kıyaslamalarını içeren Post-Hoc/LSD testinin p değeri sonuçları Tablo 5-6'te sunulmuştur. ANOVA testi sonuçlarına göre, Muş ilinde ölçülen en yüksek ortalama PM₁₀ değeri Ocak, en düşük ise Mart ayında ölçülmüş olup seçilen Post-Hoc çoklu kıyaslama testi (Least Squared Difference - LSD) sonucuna göre H₁ hipotezi kabul edilerek kirleticinin aylık ortalama değerlerinin birbirleriyle aynı olmadığı tespit edilmiştir (p<0.05). Ayların aralarındaki farkın %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu ve Post-Hoc çoklu kıyaslama testine göre aylar arasında en az birinde farklılık tespit edilmiştir. Farklılığın hangi ay/aylardan

kaynaklandığını anlamak için yapılan Post-Hoc ikili kıyaslama testi sonucunda ise istatistiksel olarak PM10 değerleri açısından Ocak, Mart, Ekim ve Kasım ayları ile diğer aylar arasında bir fark olduğu, ortalama değerlerin aynı olmadığı ($p < 0.05$) ve bunun yanında Şubat ile Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül aylarında, Nisan ile Haziran, Temmuz, Ağustos aylarında, Mayıs ile Temmuz ayında, Haziran ile Temmuz, Ağustos aylarında, Temmuz ile Ağustos ayı, Eylül ile Aralık ayları arasında istatistiksel olarak aralarında farkın olmadığı hesaplanmıştır (H_0 hipotezi kabul edilmiştir, $p > 0.05$).

Tablo 5. PM10 parametresinin 2021’de aylar arasında kıyaslamalarını içeren Post-Hoc/LSD testi p değeri sonuçları (Post-Hoc/LSD test p value results including comparisons of PM10 parameter between months in 2021)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ocak		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Şubat	.00		.00	.23	.00	.18	.02	.46	.33	.00	.00	.00
Mart	.00	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Nisan	.00	.23	.00		.00	.71	.27	.65	.05	.00	.00	.00
Mayıs	.00	.00	.00	.00		.02	.02	.00	.00	.00	.00	.00
Haziran	.00	.18	.00	.71	.02		.61	.46	.04	.00	.00	.00
Temmuz	.00	.02	.00	.27	.27	.61		.12	.00	.00	.00	.00
Ağustos	.00	.46	.00	.65	.00	.46	.12		.12	.00	.00	.00
Eylül	.00	.33	.00	.05	.00	.04	.00	.12		.00	.00	.07
Ekim	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.00	.00
Kasım	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.01		.00
Aralık	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.07	.00	.00	

Muş’ta 2021 yılında SO_2 parametresinin en yüksek değeri Ocak, en düşük ise Mayıs ayında ölçülmüş olup yapılan ANOVA testi sonucuna göre H_1 hipotezi kabul edilmiş ve aylık ortalama değerler birbirine eşit olmadığı görülmüştür ($p_{value} < 0.05$). Aralardaki farkın anlamlı olduğu ve Post-Hoc çoklu kıyaslama testine göre aylar arasında en az birinde farklılık tespit edilmiştir. Farklılığın hangi ay/aylardan kaynaklandığını anlamak için yapılan Post-Hoc ikili kıyaslama testi sonucuna göre istatistiksel olarak H_1 hipotezi kabul edilmiş ve SO_2 değerleri Ocak, Şubat, Mayıs, Temmuz, Kasım ve Aralık ile diğer aylar arasında bir fark olduğu ($p < 0.05$) ve bunun yanında Mart ile Ekim ayında, Nisan ile Haziran, Ağustos, Eylül aylarında, Haziran ile Ağustos, Eylül ayları arasında farkın olmadığı hesaplanmıştır (H_0 hipotezi kabul edilmiş, $p > 0.05$).

Tablo 6. SO_2 parametresinin 2021’de aylar arasında kıyaslamalarını içeren Post-Hoc/LSD testi p değeri sonuçları (Post-Hoc/LSD test p value results including comparisons of SO_2 parameter between months in 2021)

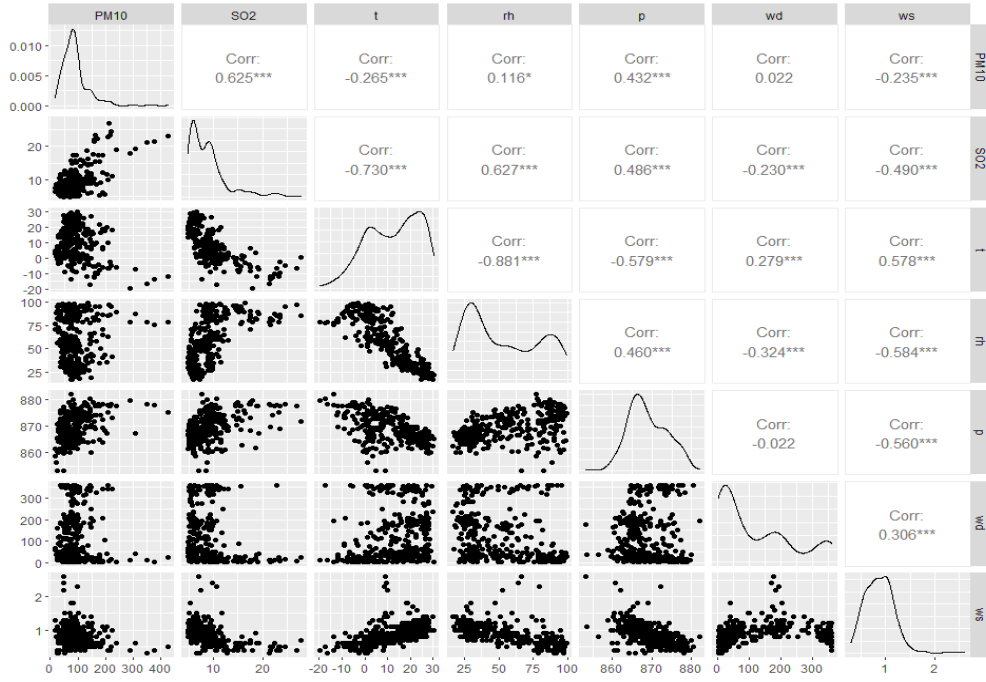
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ocak		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Şubat	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Mart	.00	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.62	.00	.00
Nisan	.00	.00	.00		.00	.62	.00	.23	.26	.00	.00	.00
Mayıs	.00	.00	.00	.00		.00	.04	.00	.00	.00	.00	.00
Haziran	.00	.00	.00	.62	.00		.03	.62	.16	.00	.00	.00
Temmuz	.00	.00	.00	.00	.04	.03		.04	.00	.00	.00	.00
Ağustos	.00	.00	.00	.23	.00	.62	.04		.04	.00	.00	.00
Eylül	.00	.00	.00	.26	.00	.16	.00	.04		.00	.00	.00
Ekim	.00	.00	.62	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.01	.00
Kasım	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.01		.00
Aralık	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	

3.3. Korelasyon Analizi (Correlation Analysis)

Hava kirliliği sorunu bölgelerin kirletici emisyon oranlarını ve kaynağını belirlerken; bölgelerin iklimi ve topografyası kirliliğin atmosferde dağılımını etkilemektedir (Ilten ve Selici, 2008). Bu nedenle kentlerdeki hava kalitesi ile meteorolojik koşullar arasındaki ilişki araştırmalara konu olmuştur (Keser, 2002). İklim koşullarının yılın büyük bir bölümünde elverişsiz şartlar göstermesi ile beşeri coğrafya etmenleri hava kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Kopar ve Zengin, 2009). Sıcaklık, nem, yağış miktarı, dikey ve yatay hava akımları gibi meteorolojik koşulların hava kirliliği üzerinde etkili olduğu bilinmektedir (Eser vd., 1999).

Çalışmada, hava kirleticileri (PM_{10} ve SO_2) ile meteorolojik parametreler (sıcaklık, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, basınç ve bağıl nem) arasında ilişki türleri korelasyon analizleriyle tespit edilmiş olup saçılım grafikleri ile korelasyon katsayıları ve ilişkilerin yönleri gösterilmiştir (Şekil 5). PM_{10} ile basınç ($r = 0.43$) arasında pozitif, sıcaklık ($r = -0.27$) ve rüzgâr hızı ($r = -0.24$) arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir. PM_{10} ile basınç arasında orta şiddette, ortalama sıcaklık ve rüzgâr hızı ile PM_{10} arasında zayıf ve %95 güven düzeyinde anlamlı bir ilişki vardır ($p < 0.05$). SO_2 ile sıcaklık ($r = -0.73$) ve rüzgâr hızı ($r = -0.49$) arasında negatif, SO_2 ile nem ($r = 0.63$) ve basınç ($r = 0.49$) arasında

pozitif korelasyon olduğu görülmektedir. Ortalama SO₂ ile sıcaklık arasında kuvvetli, rüzgâr hızı, basınç ve nem değişkenleri ile arasında orta şiddetli ve %95 güven düzeyinde anlamlı bir ilişki vardır ($p < 0.05$). Sıcaklık ile SO₂ arasındaki negatif ve kuvvetli korelasyonun sebebi, sıcaklığın düşmesiyle birlikte insanların ısınmak için tükettikleri yakıt miktarının artmasıyla ilişkili olduğu düşünülmüştür.



Şekil 5. PM10 ve SO₂ konsantrasyonlarının Meteorolojik parametreler ile arasındaki ilişki (Relationship between PM10 and SO₂ concentrations and Meteorological parameters)

Aylık olarak hava kirleticilerinin meteorolojik faktörlerle korelasyonuna bakıldığında en fazla ilişki PM10 ile sıcaklık arasında Mayıs'ta ($r=0.707$, $p=0.00$), bağıl nem ile Kasım'da ($r=-0,563$, $p=0.00$), basınç ve rüzgar hızı ile Ocak'ta (sırasıyla $r=0.561$, $p=0.00$; $r=-0.411$, $p=0.03$), rüzgar yönü ile Şubat ($r=-0.433$, $p=0.02$) aylarında, SO₂'nin ise sıcaklıkla arasında Aralık'ta ($r=-0.860$, $p=0.00$), bağıl nem ile Mayıs'ta ($r=0.636$, $p=0.00$), basınç ile Kasım'da ($r=-0.485$, $p=0.01$), rüzgar yönü ile Eylül'de ($r=0.459$, $p=0.04$), rüzgar hızı ile Mart ve Ekim (sırayla $r=-0.403$, $p=0.02$; $r=0.403$, $p=0.02$) aylarında gerçekleştiği hesaplanmıştır (Tablo 7).

Hava kirleticilerinin birbiriyle olan etkileşimlerini incelemek amacıyla 2021 yılı bazında PM10 ve SO₂ arasında pozitif yönde orta şiddette, aylara göre incelendiğinde ise özellikle hava sıcaklığının düşük seyrettiği aylarda güçlü bir ilişkinin olduğu görülmektedir ($p < 0.05$). Yani SO₂ seviyeleri artış eğiliminde olduğu zaman bu değişimle birlikte şehir merkezinde aynı zamanda PM10 seviyelerinde de artış görülmektedir. Özellikle hava sıcaklığının az olduğu aylarda, PM10 ve SO₂ değerlerinin yüksek düzeylerde olması, Muş için PM10 ve SO₂ parametrelerinin birbiriyle etkileşimi açısından bakıldığında ısınmak için kullanılan yakıtların salınımlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 7. Meteorolojik parametreler ile hava kirleticiler arasındaki aylık pearson korelasyon katsayıları (Monthly Pearson correlation coefficients between meteorological parameters and air pollutants)

Aylar		PM10						SO ₂					
		SO ₂	t	rh	p	wd	ws	PM10	t	rh	p	wd	ws
Ocak	r	.799*	-.647*	-.258	.561*	-.091	-.411*	.799*	-.132	-.005	.385*	-.172	-.340
	p	.000	.000	.176	.002	.637	.027	.000	.479	.978	.032	.356	.061
Şubat	r	.807*	-.162	.340	.522*	-.433*	-.325	.807*	.196	.327	.221	-.350	-.249
	p	.000	.411	.077	.004	.021	.091	.000	.319	.089	.258	.068	.201
Mart	r	.659*	.096	-.232	.430*	-.214	-.167	.659*	-.366*	.197	.329	-.083	-.403*
	p	.000	.606	.210	.016	.248	.369	.000	.043	.288	.071	.657	.025
Nisan	r	.297	.616*	-.429*	-.369*	.303	.236	.297	-.241	.161	-.309	.265	.083
	p	.111	.000	.018	.045	.104	.210	.111	.199	.397	.096	.157	.663
Mayıs	r	-.085	.707*	-.523*	-.170	.230	.273	-.085	-.286	.636*	.131	.018	-.245
	p	.657	.000	.003	.369	.221	.145	.657	.125	.000	.490	.925	.192
Haziran	r	.440	.539*	-.546*	-.207	.102	.452	.440	.299	-.384	-.332	.176	-.056
	p	.088	.025	.023	.425	.696	.069	.088	.260	.141	.210	.514	.837
Temmuz	r	.211	.262	-.494*	.137	.309	.150	.211	.600*	-.543*	-.175	-.085	.131

	p	.256	.154	.005	.461	.091	.420	.256	.000	.002	.346	.650	.484
Ağustos	r	.563*	.237	-.429*	.230	.048	.085	.563*	.224	-.339	.282	-.152	.066
	p	.001	.200	.016	.214	.797	.649	.001	.226	.062	.124	.414	.726
Eylül	r	.270	.234	-.146	-.183	.123	.292	.270	-.402	.023	.094	.459*	-.073
	p	.250	.322	.539	.441	.605	.212	.250	.079	.924	.695	.042	.761
Ekim	r	.749*	.629*	-.489	-.052	.277	.383*	.749*	.523*	-.425*	-.184	.242	.403*
	p	.000	.000	.005	.783	.131	.034	.000	.003	.017	.321	.190	.025
Kasım	r	.536*	.040	-.563*	-.033	.341	.043	.536*	-.304	-.184	-.485*	.032	.185
	p	.002	.834	.001	.861	.065	.823	.002	.103	.330	.007	.868	.328
Aralık	r	.652*	-.615*	.015	.435*	-.233	-.360*	.652*	-.860*	-.073	.056	-.272	-.184
	p	.000	.000	.938	.015	.207	.047	.000	.000	.697	.766	.140	.322

3.4. Doğrusal Reg Regresyon Modeli (Linear Regression Model)

Hava kirlenici parametrelerinin, ayrı ayrı meteorolojik değişkenlerle ilişkilerinin incelenmesinden sonra, hava kirlenici seviyelerinin modellenmesi için anlamlı tüm meteorolojik değişkenlerin etkisinin olduğu regresyon modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan regresyon modellerinde, hava kirlenici bağımlı değişkenler (Denklem 1'deki $y_{(PM_{10}, SO_2)}$ değeri), tüm meteorolojik parametreler ise bağımsız değişkenler (Denklem 1'deki $\beta_{1,2,3...}$ değerleri) olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan bu regresyon modellerde "enter" yöntemi kullanılmış olup hava kirlenici parametreleri açıklayabilmek için meteorolojik değişkenler modele tek tek dahil edilmiş ve modelde gerekli olan tüm anlamlı meteorolojik değişkenler etkisi araştırılmıştır. Modelde en yüksek R^2 değerine sahip olan basamak, hava kirleniciyi açıklayabilmeye uygun model olarak seçilmiştir. PM_{10} değerinin tahmin edilmesi için oluşturulan regresyon model ve sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. PM_{10} parametresi için oluşturulan regresyon modeli adımları (Regression model steps generated for parameter PM_{10})

Model Adımları	Model Adımları	%95 Güven Aralığı		t istatistiği	p values	R^2		
		β	Std. Hata				Alt Değer	Üst Değer
1	β_0	104.732	3.905	97.051	112.413	26.821	.000	0.07
	$\beta_1 (t)$	-1.182	.234	-1.642	-.722	-5.051	.000	
2	β_0	185.386	17.197	151.558	219.213	10.780	.000	0.13
	$\beta_1 (t)$	-3.187	.475	-4.121	-2.253	-6.714	.000	
	$\beta_2 (rh)$	-1.034	.215	-1.457	-.611	-4.808	.000	
3	β_0	-3302.980	536.968	-4359.234	-2246.727	-6.151	.000	0.23
	$\beta_1 (t)$	-1.862	.492	-2.831	-.894	-3.783	.000	
	$\beta_2 (rh)$	-.863	.205	-1.266	-.461	-4.218	.000	
	$\beta_3 (p)$	3.985	.613	2.779	5.191	6.499	.000	

Tablo 8'de PM_{10} için yapılan regresyon modeli basamaklarında, ilk başta sıcaklık (t) değişkeni eklenmiş ve uygun R^2 , β_0 ve β_1 katsayıları hesaplanarak model oluşturulmuştur. Bu ilk basamakta modelin R^2 değeri 0.07 şeklinde hesaplanmıştır. Bunun anlamı sadece tek parametre olan sıcaklık modele dahil edildiğinde, model PM_{10} 'u sadece %7 oranında açıklayabilmektedir. Regresyon modeline tüm anlamlı meteorolojik değişkenler (sıcaklık (t), nem (rh) ve basınç (p)) dahil edildiğinde (3.basamak) ise, R^2 değeri 0.23 olup modelde olan sabit katsayı (β_0) ve her bir meteorolojik değişkenlere ait katsayılar (β_1 , β_2 ve β_3) hesaplanmıştır. Modelde tüm anlamlı ($p < 0.05$) meteorolojik parametrelerin kullanıldığında, PM_{10} konsantrasyonu %23 oranında tahmin edilebilmektedir. Yani PM_{10} 'daki değişimin kalan kısmı ise ele alınmayan değişkenlere bağlıdır. Buna göre modeldeki diğer değişkenler sabit tutulup sadece sıcaklıkta 1 birimlik artış olduğunda PM_{10} 'da ortalama 1.86 birimlik azalışa neden olmaktadır. Aynı şekilde diğer değişkenler sabit tutulup sadece basınçtaki 1 birimlik artış PM_{10} 'da ortalama 3.985 birim artacağı anlamına gelmektedir. Nemde ise meydana gelen 1 birimlik artış ise diğer değişkenler sabit tutulduğunda PM_{10} 'da 0.863 birimlik bir azalış yaratacaktır. Ayrıca t istatistiklerine bakıldığında, bütün model adımlarında bağımsız değişkenler %95 güven düzeyinde anlamlıdır. Benzer şekilde, SO_2 seviyelerinin tahmin edilmesinde kurulan regresyon model sonuçları Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. SO_2 parametresi için oluşturulan regresyon modeli adımları (Regression model steps generated for parameter SO_2)

Model Adımları	Model Adımları	%95 Güven Aralığı		t istatistiği	p values	R^2		
		β	Std. Hata				Alt Değer	Üst Değer
1	β_0	11.993	.218	11.566	12.421	55.133	.000	0.53
	$\beta_1 (t)$	-.257	.013	-.283	-.213	-19.625	.000	
2	β_0	12.945	.458	12.044	13.847	28.249	.000	0.54
	$\beta_1 (t)$	-.235	.016	-.267	-.204	-14.833	.000	
	$\beta_2 (ws)$	-1.387	.589	-2.546	-.229	-2.356	.019	

Yapılan PM10 regresyon modeli gibi, SO₂ için bağımsız parametreler olan meteorolojik parametrelerden sadece anlamı olarak modelin 1. basamağında sıcaklık (t) değeri modele dahil edilmiştir. Bu modelin R²'si 0.53 olarak bulunmuştur. Oluşturulan modelde SO₂'yi tahmin etmek için sadece sıcaklık değişkeni kullanıldığında, model SO₂ değerini %53 oranında açıklayabilmektedir. Modele tüm anlamlı meteorolojik değişkenler (sıcaklık (t) ve rüzgar hızı (ws)) eklendiğinde (2. basamak) R² değeri 0.54 olarak hesaplanmıştır. Tüm anlamlı (p<0.05) meteorolojik parametrelerin kullanıldığında, oluşturulan modelde SO₂ seviyesi %54 oranında tahmin edilebilir anlamına gelmektedir. SO₂'in kalan kısmı ise ele alınmayan değişkenlere bağlıdır. Buna göre SO₂, sıcaklıkta ve rüzgar hızında meydana gelebilecek 1 birimlik artış, SO₂'de sırasıyla 0.235 ve 1.387 birimlik azalış yaratacaktır. Diğer meteorolojik faktörler regresyon modelinde anlamlı olmadığından dolayı (p>0.05) işleme alınmamıştır.

4. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Muş ilinde 2021 yılındaki, hava kirlilik parametrelerinden olan PM10 ve SO₂'in meteorolojik değişkenler (sıcaklık, nisbi nem, rüzgâr hızı, rüzgar yönü ve atmosfer basıncı) ile olan ilişkilerinin düzeyleri istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada, Muş ilinin 2021 yılı içindeki aylarda hava kirleticilerin değerleri diğer aylar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre kirletici parametrelerin en yüksek görüldüğü aylar, PM10 için ocak, ekim, kasım ve aralık ile SO₂ için ocak, şubat, kasım ve aralık ayları olduğu saptanmıştır. Hava sıcaklığının düşük olduğu aylarda PM10 ve SO₂ değerlerinin yüksek düzeylerde olması, Muş için öncelikle ısınmadan kaynaklı yakıtların salınımlardan olduğu, PM10 ve SO₂ seviyelerinin birbiriyle etkileşimi açısından ise korelasyon katsayısı bakıldığında yüksek bir ilişkiye (r=0.625) sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca yukarıda belirtilen aylarda PM10, sınır değerlerin çok üzerinde seyrettiği görülürken, SO₂ değerleri ise sınır değerlerin altında ama belirtilen aylarda 2021'in ortalama değer üzerinde olduğu görülmekte olup Muş'ta hava kirliliğinin ana nedeni PM10 değerinin yüksek olması sonucuna varılmaktadır. Hava sıcaklığının az olduğu ve hava kirleticilerin birbirleriyle olan ilişkisi göz önüne alındığında ısınmak için kullanılan yakıtlardan oluşan hava kirliliği, düşük yakıtların iyileştirilme işlemine tabi tutulmadan kullanılması, yakma yöntemlerinin yanlış uygulanması ve kullanılmakta olan yakma sistemlerinin bakımlarının planlı ve düzenli olarak yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca şehirlerdeki hava kirliliğine, artan motorlu araçlardan çıkan egzoz gazları da katkıda bulunmaktadır (Muş Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2018). İzmir'de yapılan bir çalışmada ise 2009-2018 yılları arasında partikül madde konsantrasyonlarının değişimleri incelenmiş ve kasım, aralık, ocak, şubat ve mart aylarında PM10 değerinin diğer aylardan daha yüksek olduğu hesaplanmıştır (Teker, 2020).

Literatür tarandığında pek çok araştırmacı, meteorolojik parametreler ile hava kirleticileri arasındaki ilişkileri ortaya koymak için regresyon analizine dayalı çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada yapılan modellemeler sayesinde Muş'ta 2021 yılı için PM10 konsantrasyonu iklim parametreleri ile yaklaşık %23'ünü, SO₂ düzeyinde ise yaklaşık %54'ünü açıklamak mümkün olmaktadır. SO₂ konsantrasyonu ile anlamlı iklim parametreleri arasındaki ilişkiler değerlendirildiğinde, sıcaklık ile yüksek, rüzgâr hızı ile orta düzeyde ve negatif yönlü, nisbi nem ile yüksek, basınçla orta düzeyde ve pozitif yönlü ilişkilerin varlığı saptanmışken; PM10 ile basınç arasında orta düzeyde ve pozitif yönlü, rüzgâr hızı ve sıcaklıkla zayıf düzeyde ve negatif yönlü bir ilişki tespit edilmiştir. Denizli'de yapılan bir çalışmada PM10'un %47'si günlük ortalama sıcaklık, rüzgâr hızı, basınç ve bulutluluk faktörleri ile açıklanabilmektedir. Yine aynı meteorolojik unsurlar ile de SO₂'deki değişimin % 65'ini açıkladığı görülmektedir (Çukur ve Aygören, 2018). Ayrıca Balıkesir'de benzer şekilde yapılan başka bir çalışmada ise PM10 ve SO₂ parametreleri için oluşturulan regresyon modellerinde R²'lerini sırasıyla 0.16 ve 0.24 olarak bulunmuş, PM10 ile en yüksek korelasyon katsayıları rüzgar hızı ve sıcaklık olarak belirlenmiş, rüzgar hızı ve sıcaklık ile PM10 seviyelerinde arasında negatif yönlü bir ilişkinin olduğu hesaplanmıştır. SO₂ seviyelerinin değişimlerinde en yüksek korelasyon katsayısı yine sıcaklık parametresinde belirlenmiş, sıcaklıktan sonra, nem ve yine rüzgar hızı önemli rol oynadığı saptanmıştır. SO₂ seviyeleri sıcaklık ve rüzgar hızı arasındaki korelasyon ise negatif yönlü olup, nemin artması ile artış eğiliminde olmaktadır (Mutlu, 2019). Daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde, çalışmanın yapıldığı yerin çevresel özellikleri hava kirleticilerinin konsantrasyonları üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir. Muş ili için ileride gerçekleştirilecek hava kirleticilerinin istatistik, tahmin gibi çalışmalarında, mevsimsel olarak ve girdi parametresi olarak da kirleticilere bakılması (özellikle PM10 için) daha performanslı sonuçlara ulaşılabileceği önerilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

- Akyürek, Ö., 2012. Trabzon Kent Merkezi İçin Hava Kirliliği İle Meteorolojik Koşullar Arasındaki İlişkinin 2006-2011 Arası Verilerine Dayalı Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Babin, S., Burkom, H., Holtry, R., Taberner, N., Davies-Cole, J., Stokes, L., Dehaan, K., Lee, D., 2008. Medicaid patient asthma-related acute care visits and their associations with ozone and particulates in Washington, DC, from 1994-2005. *Int J Environ Health Res* 18 (3) , 209-221. doi:10.1080/09603120701694091
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkwicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C.A., Apte, J.S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S.S., Kan, H., Walker, K.D., Thurston, G.D., Hayes, R.B., Lim, C.C., Turner, M.C., Jerrett, M., Krewski, D., Gapstur, S.M., Diver, W.R., Ostro, B., Goldberg, D., Crouse, D.L., Martin, R.V., Peters, P., Pinault, L., Tjepkema, M., van Donkelaar, A., Villeneuve, P.J., Miller, A.B., Yin, P., Zhou, M., Wang, L., Janssen, N.A.H., Marra, M., Atkinson, R.W., Tsang, H., Quoc Thach, T., Cannon, J.B., Allen, R.T., Hart, J.E., Laden, F., Cesaroni, G., Forastiere, F., Weinmayr, G., Jaensch, A., Nagel, G., Concin, H., Spadaro, J.V., 2018. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115 (38) , 9592-9597. doi:10.1073/pnas.1803222115
- Çakır Yıldız, N., Güneş, M.Ş., 2017. Örgütsel Stresin, Örgütsel Sessizlik ve Tükenmişlik Üzerine Etkisi: Eczane Çalışanları Üzerinde Bir Araştırma. *Uygulamalı Sosyal Bilimler Dergisi* 1 1 , 45-66.
- Can, A., 2013. SPSS ile nicel veri analizi, 6th ed. Pegem A Yayıncılık, Ankara.
- Cavkaytar, Ö., Soyer, Ö.U., Şekerel, E., 2013. Türkiye'de Hava Kirliliğinden Kaynaklanan Sağlık Sorunları. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi* 2 (4) , 105-111.
- Çiçek, İ., Türkoğlu, N., Gürgen, G., 2004. Ankara'da Hava Kirliliğinin İstatistiksel Analizi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 14 (2) , 1-18.
- Çukur, H., Aygören, T., 2018. Denizli'de Hava Kirliliği ve Klimatik Özellikler Arasındaki İlişki. *ASOS* 82 (82) , 594-611. doi:10.16992/ASOS.14336
- Dawson, B., Trapp, R.G., 2004. *Basic & Clinical Biostatistics (LANGE Basic Science)*. McGraw-Hill Education / Medical, England.
- Eser, E., Dinç, G., Özcan, C., Tartan, M., 1999. Rutin Hava Kirliliği ve Meteoroloji Verileri ile Bir Gün Sonraki Hava Kirliliğinin Tahmini Üzerine Bir Deneme. Presented at the Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu, pp. 105-114.
- Garipağaoğlu, N., 2006. Türkiye'de Hava Kirliliği Sorununun Coğrafi Bölgelere Göre Dağılımı. *Doğu Coğrafya Dergisi* 9 , 57-77.
- İlten, N., Selici, A.T., 2008. Investigating the impacts of some meteorological parameters on air pollution in Balıkesir, Turkey. *Environ Monit Assess* 140 (1) , 267-277. doi:10.1007/s10661-007-9865-1
- Institute for Health Metrics and Evaluation, 2014. *Global Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors Study 2013*. Washington University, Washington.
- Kardeşoğlu, E., Yalçın, M., Işılak, Z., 2011. Hava Kirliliği ve Kardiyovasküler Sistem. *TAF Preventive Medicine Bulletin* 10 (1) , 97-106.
- Keser, N., 2002. Kütahya'da Hava Kirliliğine Etki Eden Topografik ve Klimatik Faktörler. *Marmara Coğrafya Dergisi* 5 , 69-100.
- Koç, T., 1999. Kuzeybatı Anadolu'nun Isıtma İhtiyacı Özellikleri. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 2 (3) , 24-45.
- Kopar, İ., Zengin, M., 2009. Coğrafi Faktörlere Bağlı Olarak Erzurum Kentinde Hava Kalitesinin Zamansal ve Mekânsal Değişiminin Belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi* 53 , 51-68.
- Murray, C.J.L., vd., 2020. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet* 396 10258 , 1223-1249. doi:10.1016/S0140-6736(20)30752-2
- Muş Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2018. Muş ili 2017 yılı çevre durum raporu. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Mutlu, A., 2019. Hava Kalitesi ve Meteoroloji: Korelasyon, Trend ve Epizot Analizleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (4): 724-741. doi:10.17714/gumusfenbil.563848
- Tecer, L.H., 2011. Hava Kirliliği ve Sağlığımız. *Bilim ve Aklın Aydınlığında Eğitim Dergisi* 135 , 15-29.
- Tecer, L.H., Tomac, N., Karaca, F., Kaplan, A., Tuncer, T., Aydın, H., 2009. The evaluation of the effect of air pollution on the health status of children in Zonguldak City, Turkey. *International Journal of Environment and Pollution* 39 3-4 , 352-364. doi:10.1504/IJEP.2009.028697
- Teker, A.G., 2020. İzmir İlinde 2009-2018 Yılları Arasında Partiküler Madde Kirliliği. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Halk Sağlığı Dergisi*, 5(2):216-22. doi:10.35232/estudamhsd.661491
- The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2012. *OECD Environmental Outlook to 2050*. OECD Publishing.
- Turgut, D., Temiz, İ., 2015. Time Series Analysis and Forecasting For Air Pollution In Ankara: A Box-Jenkins Approach. *Alphanumeric Journal* 3 (2) , 131-138.
- Vohra, K., Vodonos, A., Schwartz, J., Marais, E.A., Sulprizio, M.P., Mickley, L.J., 2021. Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem. *Environmental Research* 195 , 110754. doi:10.1016/j.envres.2021.110754
- Wark, K., Warner, C.F., 1981. *Air Pollution Its Origin & Control*, 2. ed. Harper & Row Publishers, New York.
- WHO, 2018. *Burden of disease from ambient air pollution for 2016, version 2*. World Health Organization, Geneva.



THE EFFECT OF USING PHASE CHANGE MATERIALS AND EXAMINING THE ASPECT RATIO IN AN AIR-COOLED SYSTEM OF A PLATE BATTERY CONNECTED TO A SOLAR SYSTEM

Nevzat AKKURT*

Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 62000 Tunceli, Türkiye

Keywords

PCM,
Plate-Type Battery,
Building,
Energy Consumption,
Air-Cooled.

Abstract

Lithium-ion batteries are widely used in the electronics industry to store electrical energy. One of the challenges with these batteries is that they heat up during operation, which can damage the battery. For this reason, this paper simulates the cooling process of a plate-type (BTP) lithium-ion battery pack. To control the temperature of the battery (T-B), a laminar air flow and a phase change material (PCM) are used. The PCM is placed in a heat sink around the battery. This evaluation is performed temporarily for four different dimensions of the PCM pack. The hot outlet of this system is used to provide the thermal energy required for a small residential building (THE) at a mild temperature. The BTP was also simulated using COMSOL. The results show that the use of larger heat sinks can increase the maximum (MAX) and average (AVE) temperature of the battery. The minimum T-B occurs at different times for the smaller PCM heat sinks. Also, when using a heatsink with a larger PCM volume, it takes longer for the PCM to fully solidify. A BTP with 5 or 50 battery cells can provide up to 3% or 30% of the THE required for the building.

GÜNEŞ SİSTEMİNE BAĞLI PLAKA PİL HAVA SOĞUTMALI BİR SİSTEMDE FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ KULLANILMASI VE GÖRÜNÜŞ ORANININ İNCELENMESİ ETKİSİ

Anahtar Kelimeler

Faz Değiştiren malzemeler
Plaka Tipi Pil,
Bina,
Enerji tüketimi,
Hava soğutmalı.

Öz

Lityum iyon piller, elektronik endüstrisinde elektrik enerjisini depolamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pillerin zorluklarından biri, çalışma sırasında pile zarar verebilecek şekilde ısınmalarıdır. Bu sorundan dolayı, bu çalışmada plaka tipi lityum iyon pil takımının (BTP) soğutma süreci simüle edilmiştir. Pilin (T-B) sıcaklığını kontrol etmek için laminer hava akımı ve faz değiştirme malzemesi (PCM) kullanılır. PCM, pilin etrafındaki bir soğutucunun içine yerleştirilmiştir. Mevcut değerlendirme, PCM paketinin dört farklı boyutu için geçici olarak yapılır. Bu sistemin çıkış sıcaklığı, ılıman bir sıcaklıkta küçük bir konut binası için gerekli olan termal enerjiyi (THE) sağlamak için kullanılır. BTP ayrıca COMSOL kullanılarak simüle edilmiştir. Sonuçlar, daha büyük soğutucu pillerin kullanımının pilin maksimum (MAX) ve ortalama (AVE) sıcaklıklarını artırabileceğini gösterdi. Minimum T-B, daha küçük PCM soğutucusunda farklı zamanlarda meydana gelir. Ayrıca, daha büyük PCM hacmine sahip bir soğutucu kullanmak, PCM'nin tamamen katılaşması için daha uzun sürer. 5 ve 50 pil hücreli bir BTP, binanın ihtiyaç duyduğu THE'nin sırasıyla %3'ünü ve %30'unu sağlayabilir.

Akkurt, N., (2022). The Effect Of Using Phase Change Materials And Examining The Aspect Ratio In An Air-Cooled System Of A Plate Battery Connected To A Solar System, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1194-1211.

* İlgili yazar / Corresponding author: nakkurt@munzur.edu.tr, +90-428-213-17-94

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
N. Akkurt, 0000-0001-5550-1265	Başvuru Tarihi / Submission Date	20.04.2022
	Revizyon Tarihi / Revision Date	29.06.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	29.06.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

Compared to other types of batteries, lithium-ion batteries are used in various industries, including electric vehicles, due to their suitable thermal capacity, relatively long lifetime, and low discharge rate. However, there are several challenges in using these batteries, such as their thermal stability or explosion due to overheating or uneven heat distribution (Al-Zareer et al., 2017; Amalesh and Lakshmi Narasimhan, 2020; Bibin et al., 2020; Elsheikh et al., 2014). Therefore, the design and application of battery cooling system and thermal management are important to provide suitable and safe working conditions. In recent years, the idea of introducing electric and hybrid electric vehicles and fuel cells has attracted much interest in the industry to replace internal combustion engine vehicles. This generation of vehicles has a battery to store energy. Electric vehicles are similar in many ways to gasoline and diesel vehicles. The only difference is the replacement of the internal combustion engine with a rechargeable battery (Hannan et al., 2014; Lopes et al., 2010; Nilsson, 2011; Sanguesa et al., 2021; Sun et al., 2019).

The electric motor is powered by the battery, and the battery drives the wheels. Batteries are generally the most widely used form of energy storage technology due to their low cost, mobility, and ability to function in a variety of situations. Batteries generate electricity by releasing energy that has been stored in chemicals. Because of their lower cost, longer life, and better energy density, lithium-ion batteries are becoming increasingly popular in electric cars. Significant breakthroughs in lithium-ion battery technology have enabled industry owners and technological pioneers to bring new products to market, including satellites and spacecraft, space stations, electric and hybrid cars, and advanced communications equipment. In addition, the technology used in the metallurgy of this type of batteries has led to the introduction of flexible and curved batteries into the market (Jiang et al., 2022; Orooji et al., 2022; Tran et al., 2022; Xie et al., 2021; Zhang, J. et al., 2022; Zhang, Y.S. et al., 2022). It should be noted that the thermal problems of these batteries have limited their applicability for high energy consumption, as high operating temperatures in these batteries can significantly reduce their lifetime and even cause burns and fires. In general, the best performance of lithium-ion batteries is determined solely by their temperature, as these batteries are very sensitive to operating temperature and must be operated within a certain temperature range (An et al., 2017; Karimi and Li, 2013; Khateeb et al., 2005; Pesaran, 2001; Qian et al., 2016; Yang et al., 2019). These batteries have a MAX working temperature of 45 °C. It has been emphasized that they should not exceed a safe temperature of 60 degrees Celsius. Therefore, many researchers are interested in studying the thermal management systems of these batteries, and numerous studies have been conducted on practical high-efficiency cooling systems for thermal management of these devices (Hajatzadeh Pordanjani et al., 2019; Pordanjani et al., 2021; Pordanjani et al., 2019). Various methods such as air cooling, liquid cooling, nanofluids, heat pipes, and the use of PCMs have been proposed to provide the desired thermal management conditions and maintain the temperature of the batteries within a normal and safe range (Huang et al., 2021; Kirad and Chaudhari, 2021; Shen et al., 2021; Yao et al., 2021; Zhang, X. et al., 2022; Zichen and Changqing, 2021). A review of researches on encapsulation of organic phase change materials, thermal conductivity enhancement and modeling of thermal behavior reported in the last 20 years has presented by (Mert et al., 2018). (Gürbüz et al., 2021) conducted a numerical analysis of the melting and solidification processes of the thermal energy storage (TES) system designed for the exhaust waste heat recovery of a spark-ignition engine was performed. Paraffin wax, which stores thermal energy as latent heat and is commercially identified with the code RT35, is used as phase change material in the thermal energy storage (TES) system. Sisk et al. (Sisk et al., 2015) summarized the electrochemical and thermal models of the battery. COMSOL software was used for the electrochemical modeling. The dynamic resistance of the battery was one of the most important properties studied in this simulation. Based on the results and comparison with the static resistance of the battery, it was found that the thermal load was overestimated in the design phase. Shojaei et al. (Shojaei et al., 2016) evaluated the battery as a component of the vehicle from a systematic point of view to cool the battery of the hybrid vehicle. They evaluated passenger compartment cooling, internal combustion engine cooling, and battery cooling. Due to the complexity of the model, numerous assumptions were made, such as neglecting spatial effects in the battery or the cabin.

Thermal resistance, heat generation, radiation, and convective heat transfer were considered in the numerical models. Singh et al. (Singh et al., 2021) studied forced airflow in the BTP and found that using different designs did not affect the MAX -T-B. Shi et al. (Shi et al., 2021) studied the cooling system by optimizing the airflow in the BTP using an artificial neural network. They demonstrated a device with three outputs that can reduce the temperature of the BTP by up to 6 degrees Celsius.

Khateeb et al. (Khateeb et al., 2004) evaluated the thermal management system of a lithium-ion battery cooled with PCMs. They used air to charge and discharge the PCMs. The BTP consisted of nine 18650 batteries. They designed the battery for different conditions and showed that PCMs are a good alternative to cooling systems. In one of the studies conducted using the active method, Wang et al. (Wang et al., 2014) investigated the optimal arrangement of cells in the BTP. They also evaluated the effects of the location of the air inlet and outlet. They investigated the thermal behavior of the battery module at different flow rates, different charging rates, and different operating temperatures. Using air for cooling was not suitable in many cases due to the weak thermal properties of air and caused the T-B to exceed its allowable temperature. Therefore, some researchers used liquids to cool the battery to improve the cooling rate.

Huo et al. (Huo and Rao, 2015) numerically evaluated the effect of adding alumina nanoparticles to the base fluid. The addition of nanoparticles can lower the MAX temperature of battery cells. Their results showed that the MAX cell temperature could be reduced by 7% by using a nanofluid with a volume fraction of 4%. Using waste energy to provide the energy needed for heating can reduce energy consumption and decrease fossil fuel consumption. One of the devices that generate unwanted heat is batteries. Batteries come in a variety of shapes and sizes, including those that can be alternately charged and discharged. These batteries are used in various devices, such as electric cars and solar vehicles, electronic devices, etc. On the other hand, a considerable amount of energy is consumed annually to heat a residential house in the world. Therefore, reducing energy consumption in buildings can be very important. In this paper, the effect of using the heat generated by a BTP to heat a building is studied. The BTP consists of plate batteries and a PCM pack placed around the batteries in a rectangular enclosure. The batteries are placed in the air duct, and the effects of different dimensions of the PCM pack on the T-B and delivered energy of the house are estimated at different times.

2. Problem definition

As shown in Fig. 1, a BTP with plate-type lithium-ion battery cells is housed in an air vent. Each battery cell is in a separate channel. To reduce the computation time, only one battery cell is simulated. A no-slip boundary condition applies to the walls of these ducts. Air enters the ducts at constant temperature and velocity with a Reynolds number (Re) of 150 and exits at atmospheric pressure. A rectangular PCM heat sink is placed around all battery cells. Four models of the heat sink with different thicknesses are considered. (Kant et al. 2017) is used for the PCM properties used in this study.

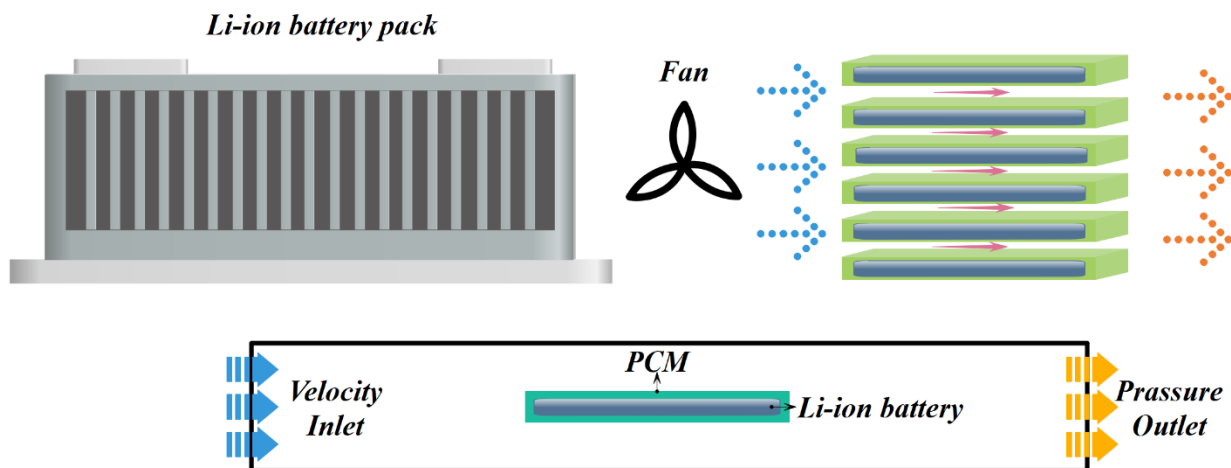


Figure. 1. A schematic of the battery cooling system and different types of heatsink used for PCM.

The battery cooling system is used in the air conditioning system of a 48 m² building. The house consists of two rooms and a kitchen. It is located in a mild climate in the northern hemisphere. The materials used were selected based on the study (Alqaed, 2022). Figure. 2 shows a schematic diagram of the building and its climate system.

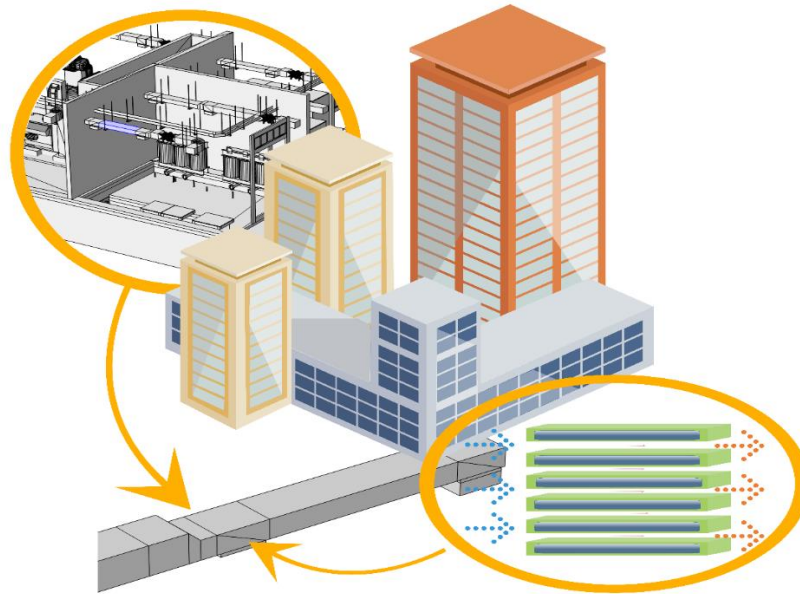


Figure 2. The building studied and its ventilation system.

2.1. Governing equations

The air enters the duct with constant temperature and velocity and exits the other side with constant pressure. After solving the battery equations, which appear as source terms in the energy equation, heat is generated inside the battery, causing the PCM to melt. The PCM leads to a uniform temperature distribution on the battery surface.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_\phi}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (1)$$

Where Q is the current generated in the battery and λ is the thermal conductivity. Also, ρ and c_p are the density and heat capacity, respectively. (Bernardi et al., 1985) showed that the amount of heat flow in the battery can be calculated as follows:

$$Q = I[(U_{ocv} - U) + IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}] \quad (2)$$

This equation includes two types of heat generated in the battery: heat generated by Joule resistance and heat generated by entropy and electrochemical reaction in the battery. I is the charge and discharge current and U_{ocv} is the open circuit voltage. Therefore, the equation for heat generation in the battery is written as follows:

$$q = \frac{I}{V} [(U_{ocv} - U) + T \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}] = \frac{I}{V} \left(IR_j + T \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \right) \quad (3)$$

The enthalpy-porosity method is used for numerical modelling of the solid-liquid phase change. In this method, the computational domain is a porous region such that the value of the porosity coefficient is equal to one in the liquid phase and zero in the solid phase. The solid-liquid interface forms a mushy region where the porosity coefficient varies between zero and one. In this method, a fixed grid is used and the location of the solid-liquid interface is determined implicitly at each time point (Kalbasi, 2021; Kalbasi et al., 2019). The following continuity, momentum, and energy equations are established:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \cos(\theta) (T - T_m) + Au \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \sin(\theta) (T - T_m) + Av \quad (6)$$

Here, A is the porosity function:

$$A = -C \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \quad (8)$$

where $c = 10^6$ is a mushy constant. Also, ε is 10^{-3} to avoid dividing the above fraction by zero when the amount of liquid fraction is zero. The liquid fraction is also calculated using the following equation:

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L_{sf}} = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{Liquidus} - T_{solidus}} & \text{if } T_{Liquidus} < T < T_{solidus} \\ 1 & \text{if } T > T_{Liquidus} \end{cases} \quad (9)$$

Energy conservation equation:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (c_P T) + \frac{\partial}{\partial x} (c_P u T) + \frac{\partial}{\partial y} (c_P v T) \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_T \quad (10)$$

$$S_T = \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (\Delta H) + \frac{\partial}{\partial x} (u \Delta H) + \frac{\partial}{\partial y} (v \Delta H) \right) \quad (11)$$

Two-dimensional continuity and momentum equations for a Newtonian fluid are introduced. A laminar, incompressible and steady flow is assumed. Body forces such as gravity. The continuity equations and the x and y components of the momentum equations are as follows:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (14)$$

3. Numerical method

To solve the equations, discrete equations must be established. Therefore, the equations for air flow, phase change PCM, and battery equations are discretized. There are several methods to discretize equations, and researchers are still searching for new methods. In this paper, the finite element method is used to discretize the equations. COMSOL Multiphysics software, version 5.6, is used to solve the discrete equations. To calculate the heat load of the building and evaluate the impact of the heat of the batteries on the energy supply of the house, the Design Builder software is used.

After discretizing the equations, it is necessary to solve the discrete equations at points on the geometry. Therefore, a grid is created on the geometry. Due to the importance of solving the PCM phase change and the battery, a fine grid is used for these two parts and a normal grid for the channel. Finally, the number of elements used is 965,382 elements. Table 1 shows the AVE -T-B and the volume fraction of the melt PCM for different number of elements. From the table, it can be seen that the selected number of elements is acceptable in terms of computational time.

Table 1. AVE-T-B and volume fraction of molten PCM for a different number of elements and computational time for the largest PCM heatsink.

No. of elements	610834	793864	965382	1258640
Computational time	16 min	50 min	110 min	260 min
AVE battery temperature	303.67	303.98	304.07	304.09
Volume fraction of molten PCM	47.67	47.44	47.31	47.30

4. Validation

A similar article is selected to confirm the present results. (Almehmedi et al., 2022) studied the effects of using a battery heater to heat a building. A cylindrical battery was used. The T-B quantities determined in the present work are compared with those of (Almehmedi et al., 2022) at different velocities and times (Fig. 3). From the table,

it can be seen that the error MAX between the present work and the study of (Almehmadi et al., 2022) is less than 4%, which is indicative of the accuracy of the present simulations.

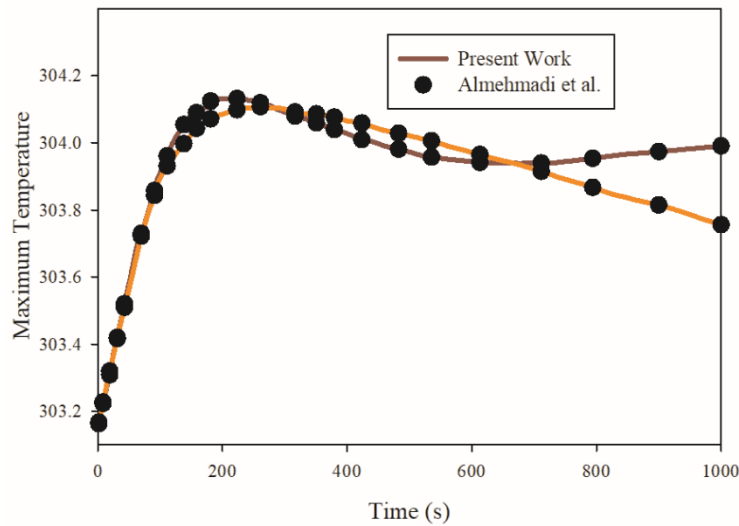


Figure. 3. Comparison of T-B obtained from the present work with those reported by (Almehmadi et al., 2022) at different velocities.

4. Results and discussion

The velocity contours are shown in Fig. 4 for different models of the heat sink PCM. The change of velocity during the collision with the heat sink and the battery depends on the dimensions of the heat sink. When more PCM is used in the heat sink, the amount of velocity changes is higher, but when the heat sink is smaller (model 1), the amount of velocity changes is lower. A larger heat sink also results in the velocity of MAX being slightly higher than with a smaller heat sink.

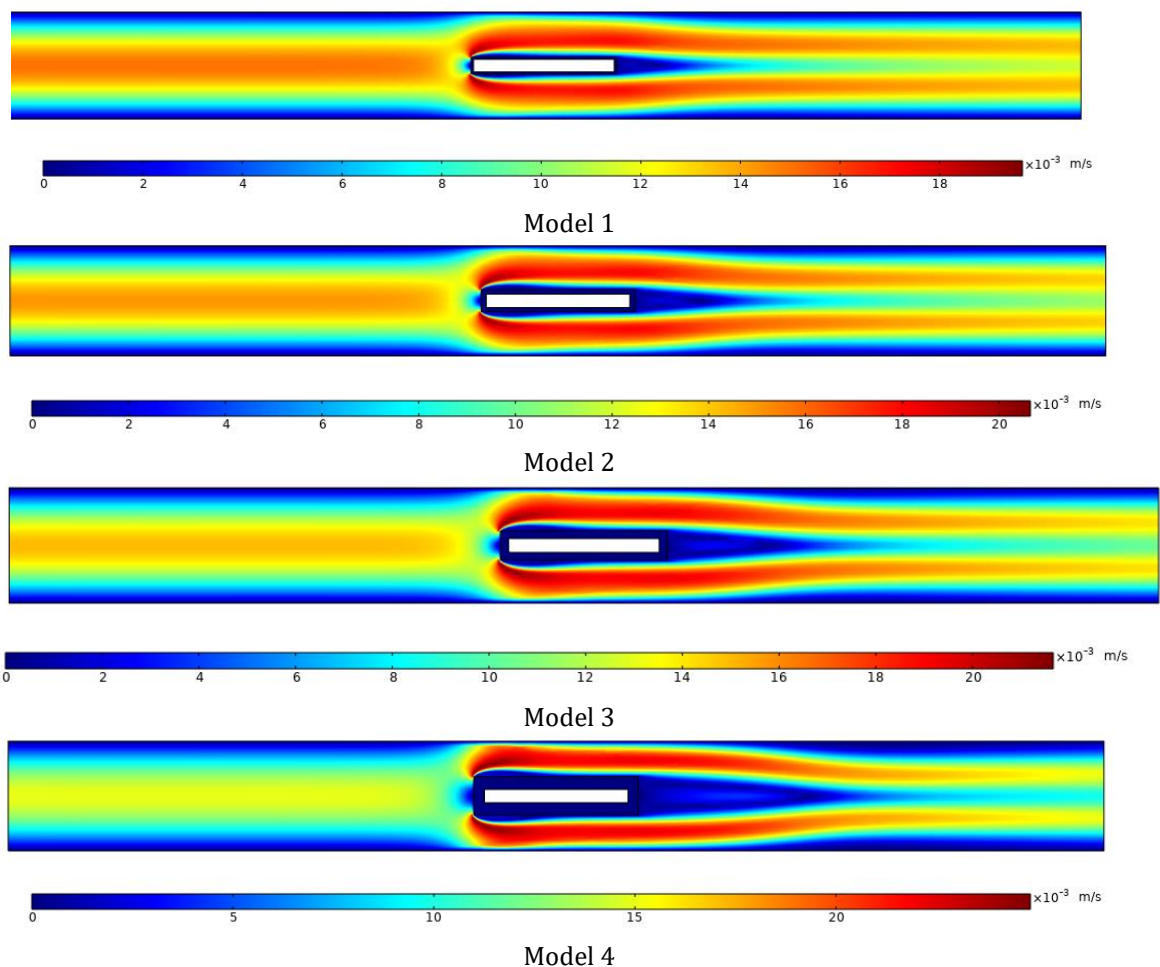
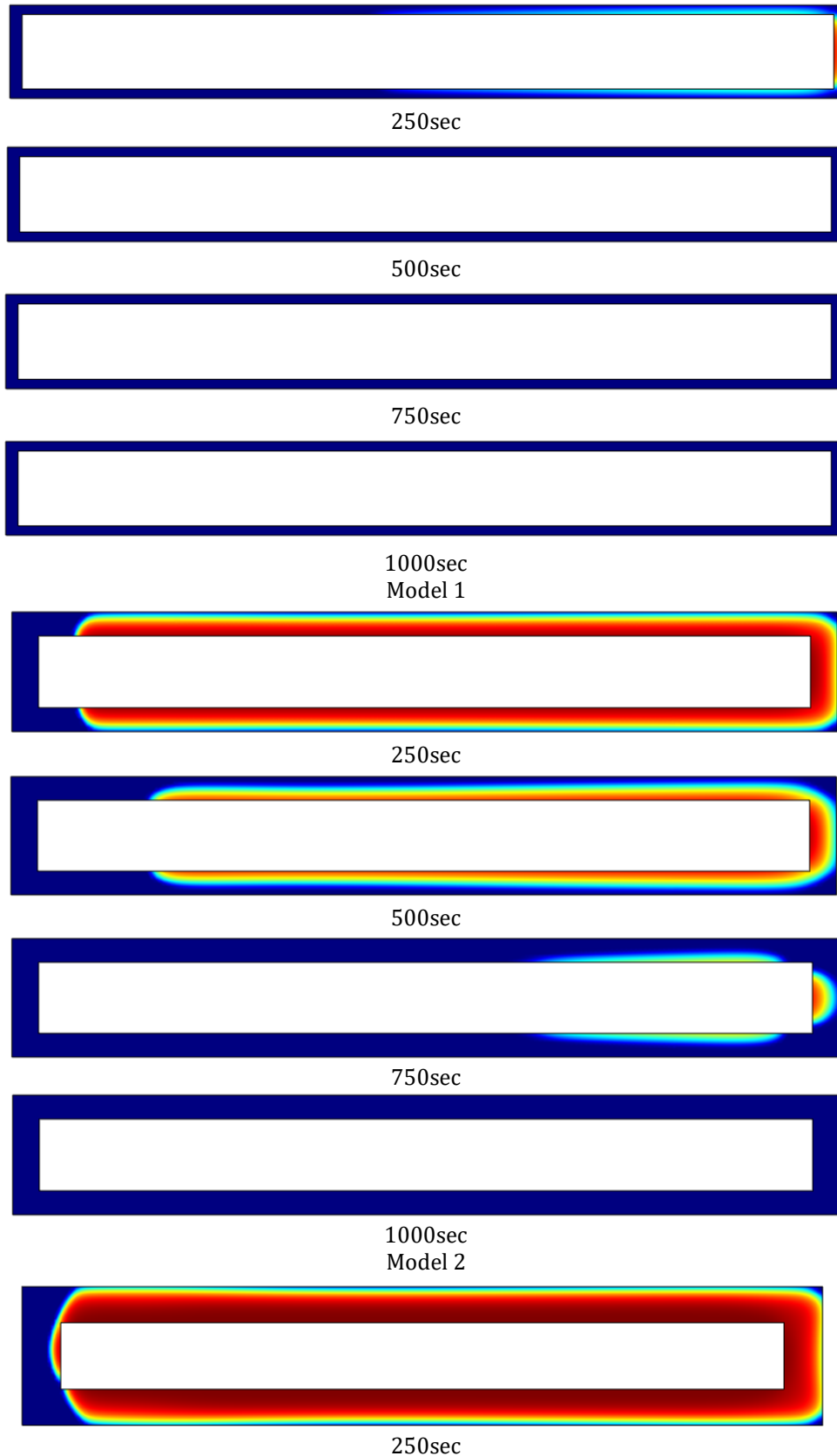


Figure. 4. velocity contour for different cavity models filled with phase change materials with different aspect ratios.

Figure. 5 illustrates the phase change of PCM at different times for different models of the PCM heat sink. The amount of PCM used in the heat sink affects its solidification time. The more PCM used in the heat sink, the longer it takes for PCM to solidify completely. Therefore, in Model 4, a significant amount of molten PCM remains over time, while in Model 1, all PCM solidifies in a short time. The solidification of PCM starts at the point where the air collides with the side of the battery. Then the parts of the heat sink that are exposed to more air become solid. Due to the heat generation in the battery, the PCM on the side of the battery becomes solid later than the other parts.



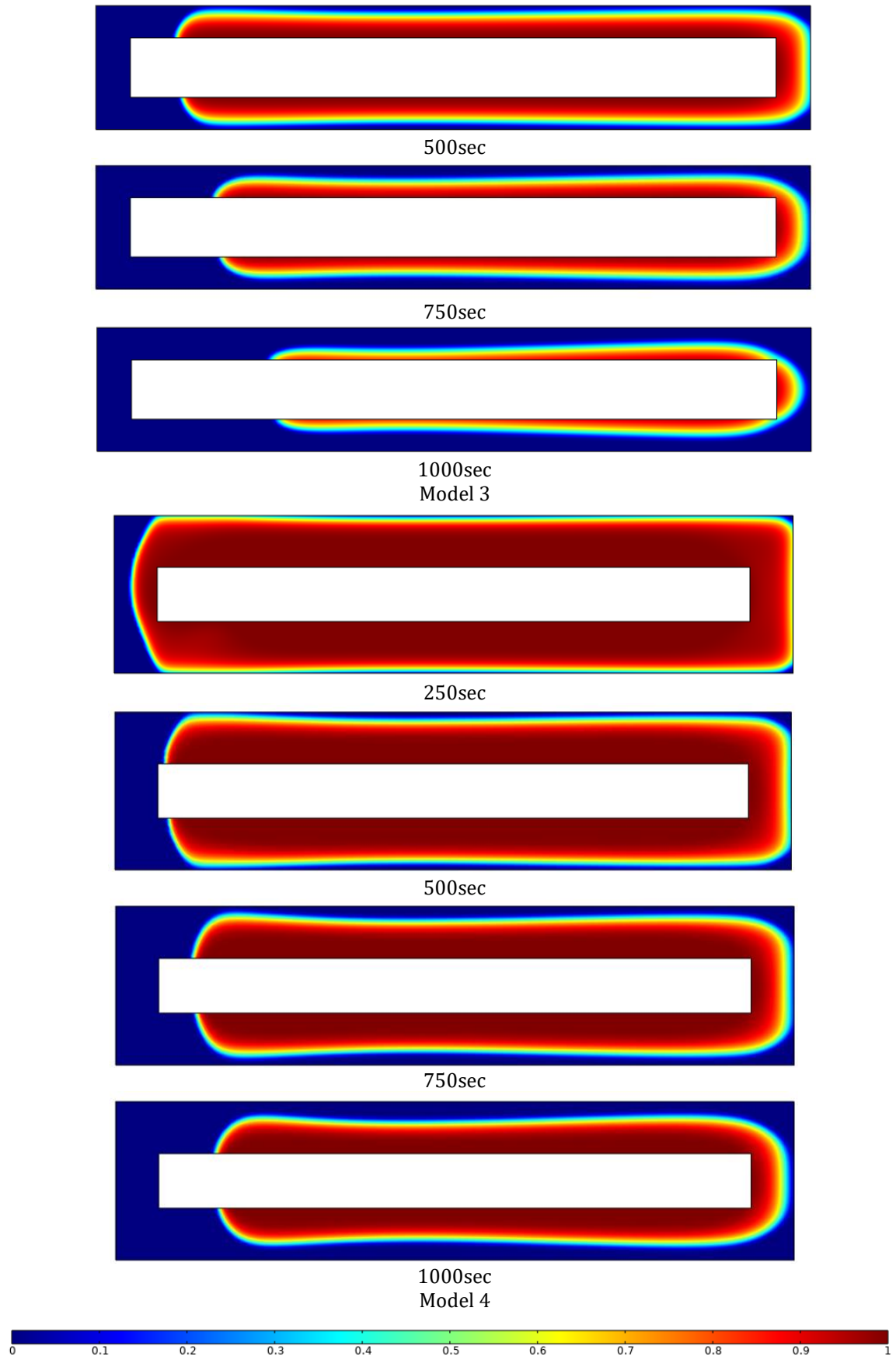
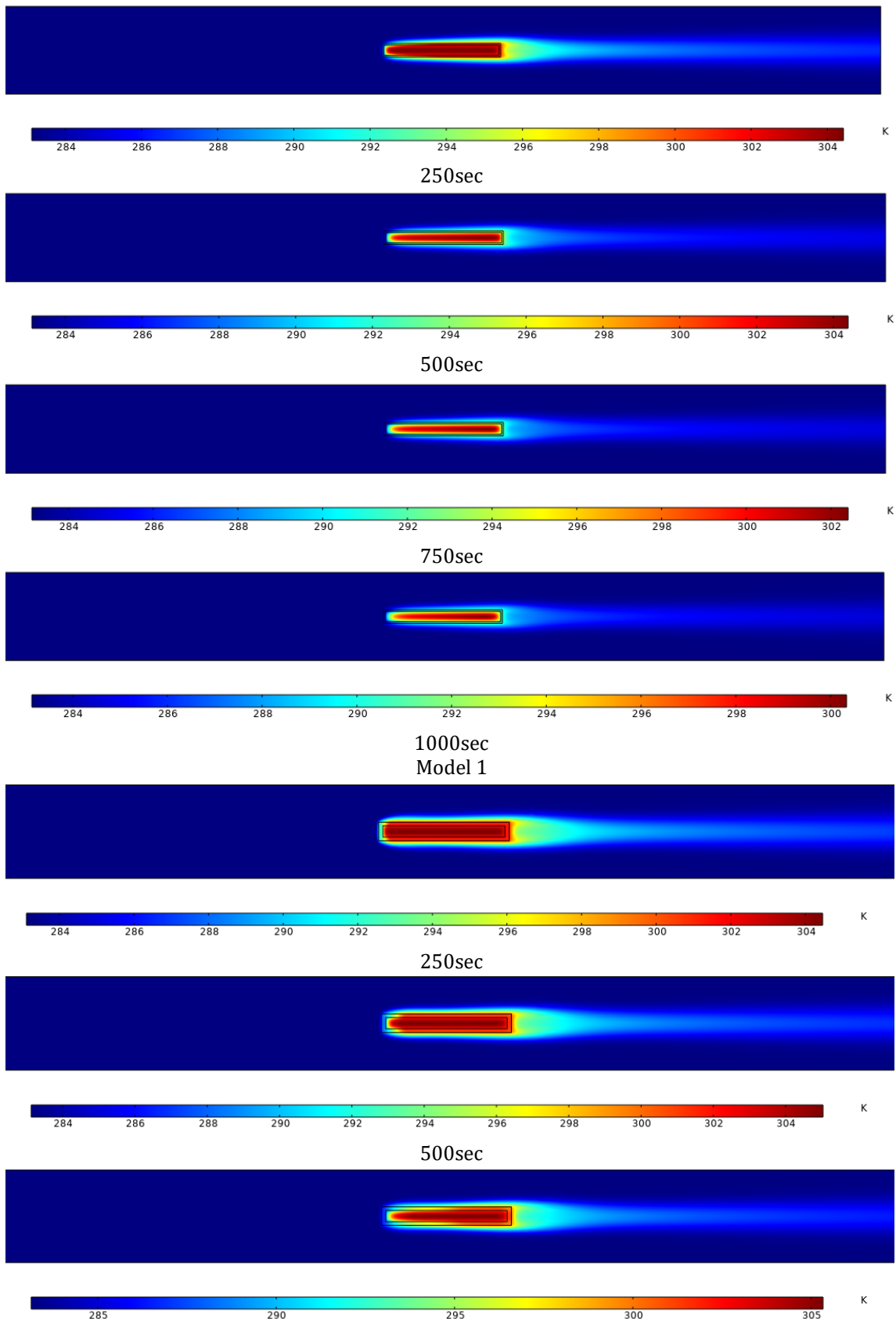


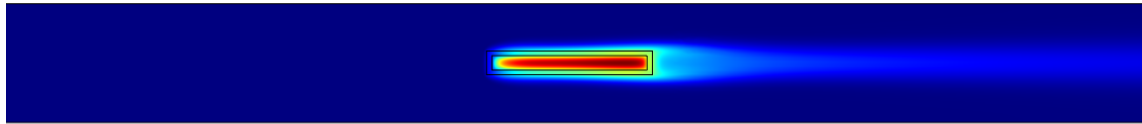
Figure 5. The amount of PCM for different cavity models filled with phase change materials with different aspect ratios.

Figure 6 illustrates the temperature profiles at different times for different models of the PCM heat sink. The cold air meets the battery at the inlet and its temperature is increased by the cooling of the battery. Due to the horizontal

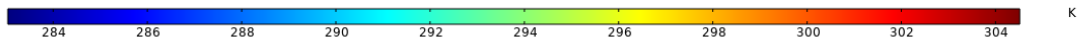
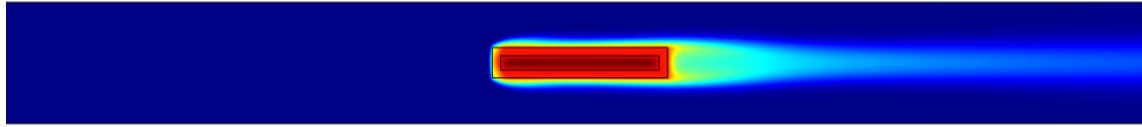
position of the battery in the air duct, the T-B at the inlet is reduced. The battery has a lower temperature at the inlet and a higher temperature at the outlet. The PCM heat sink solidifies first at the inlet and then at the outlet. For heat sink models with a higher percentage of PCM, e.g., Model 4, the temperature changes slightly over time, and the melt PCM does not allow T-B and PCM to be reduced. However, in Model 1, where less PCM is used in the heat sink, T-B and heat sink increase over time. The larger the amount of heat sink, the smaller the temperature changes over time.



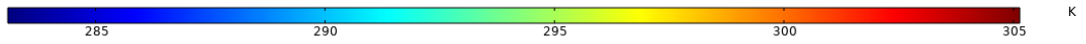
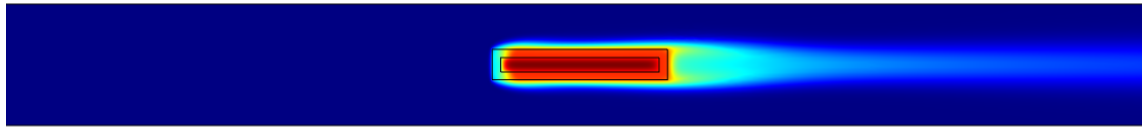
750sec



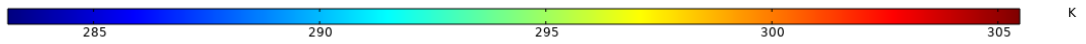
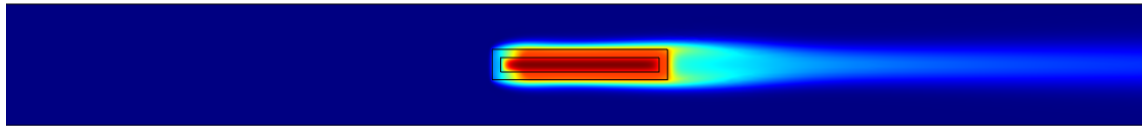
1000sec
Model 2



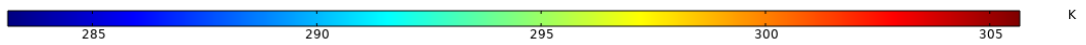
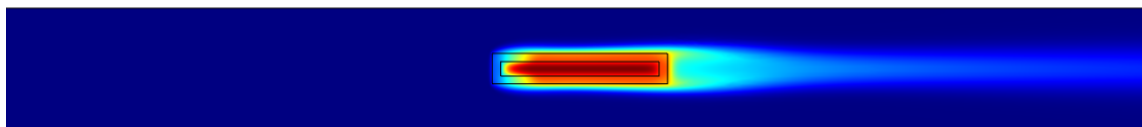
250sec



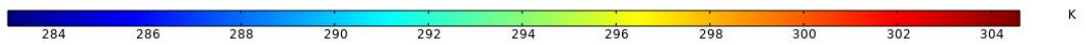
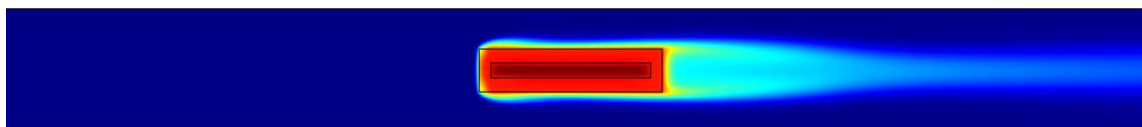
500sec



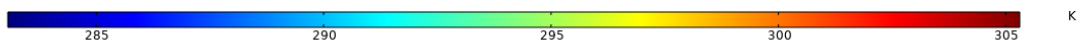
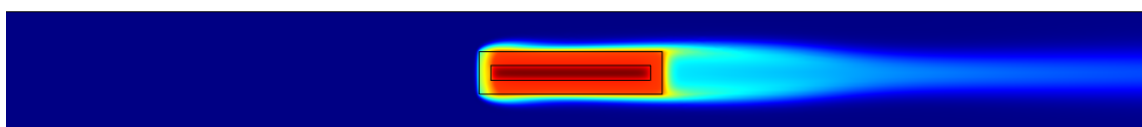
750sec



1000sec
Model 3



250sec



500sec

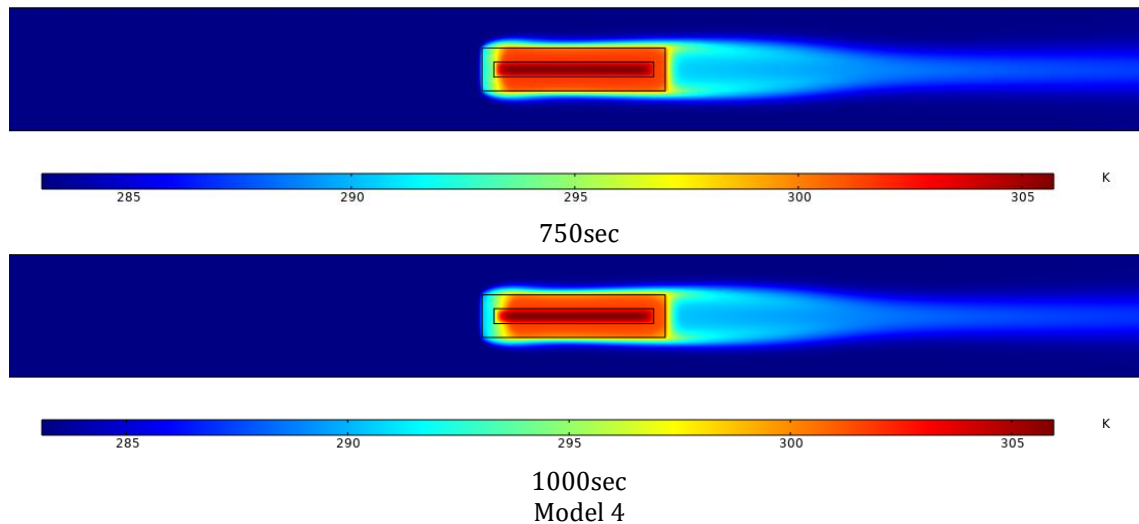


Figure.6. The temperature contours for different cavity models filled with phase change materials with different aspect ratios.

Figure. 7 shows the AVE T-B at different times for different PCM heat sink models. T-B is increased by the chemical reactions in the battery. The chemical reactions show up as heat flow. This heat should be dissipated from the battery, otherwise it will cause an excessive increase due to the heat buildup in the battery. As a result, the battery will burn or explode in a short time. Due to the presence of molten PCM around the battery, the heat transfer rate from the battery to the air is low. This is the most critical condition for passive temperature management. When the PCM is completely melted and can no longer manage the T-B, the air solidifies the PCM, dissipating the excess heat so that it can effectively manage the T-B . The higher the PCM in the heat sink (Model 4), the higher the T-B. For Model 1, where the amount of PCM is lower, the T-B is smaller.

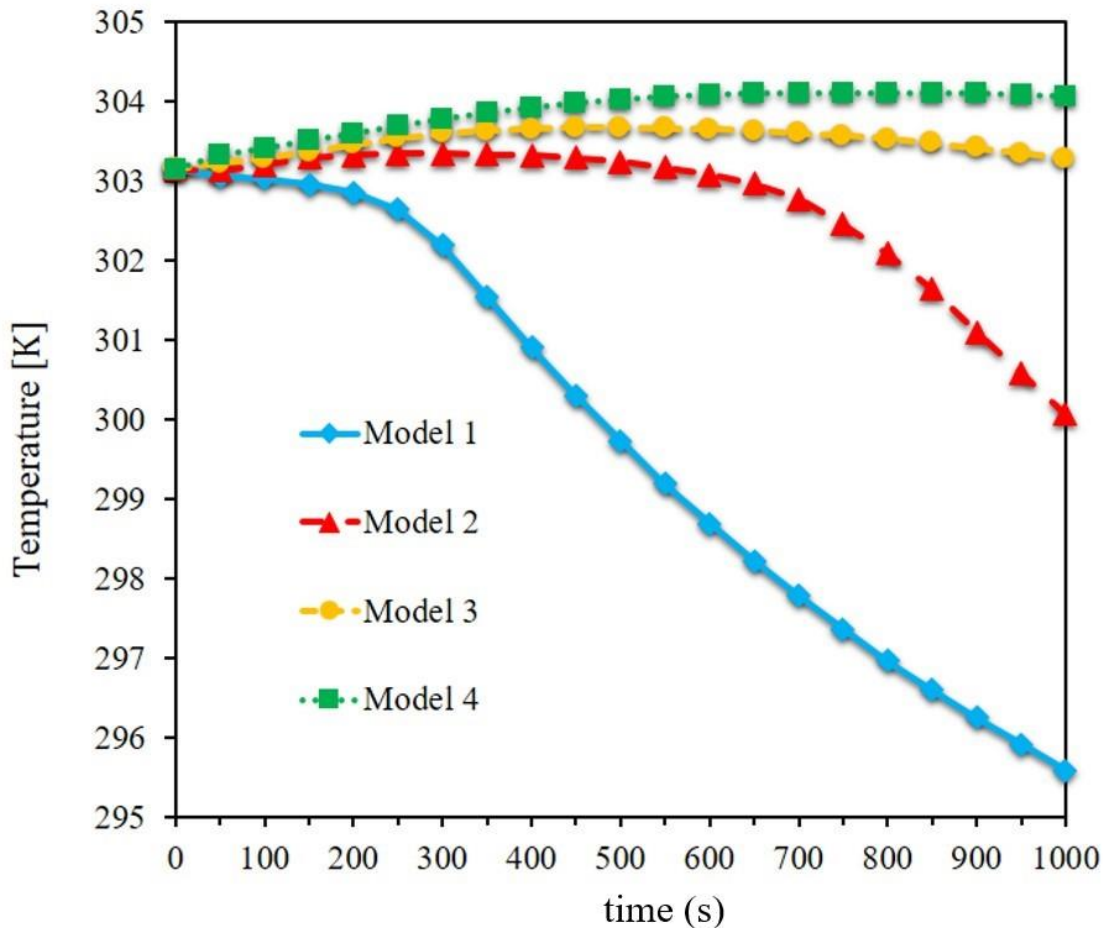


Figure. 7. The AVE temperature values of the battery at different times for different aspect ratios of the cavity filled with phase change material.

Figure. 8 shows the AVE temperature of PCM at different times for different PCM heat sink models. The temperature inside the heat sink is lower than in the battery because no energy is generated and only THE is stored as latent heat of fusion. The heat generated in the battery is dissipated to the air via PCM. As long as there is a significant amount of PCM in the liquid phase, the temperature is high because the latent heat of fusion does not cause the temperature of PCM to drop. However, when PCM solidifies, the temperature decreases. Therefore, in heat sink model 1, where the amount of PCM is less and PCM solidifies completely in a shorter time, the temperature of PCM is lower than in other cases. In heat sink model 4, where a higher value of PCM is used and PCM is in the liquid phase for a longer time, the temperature of PCM is slightly higher.

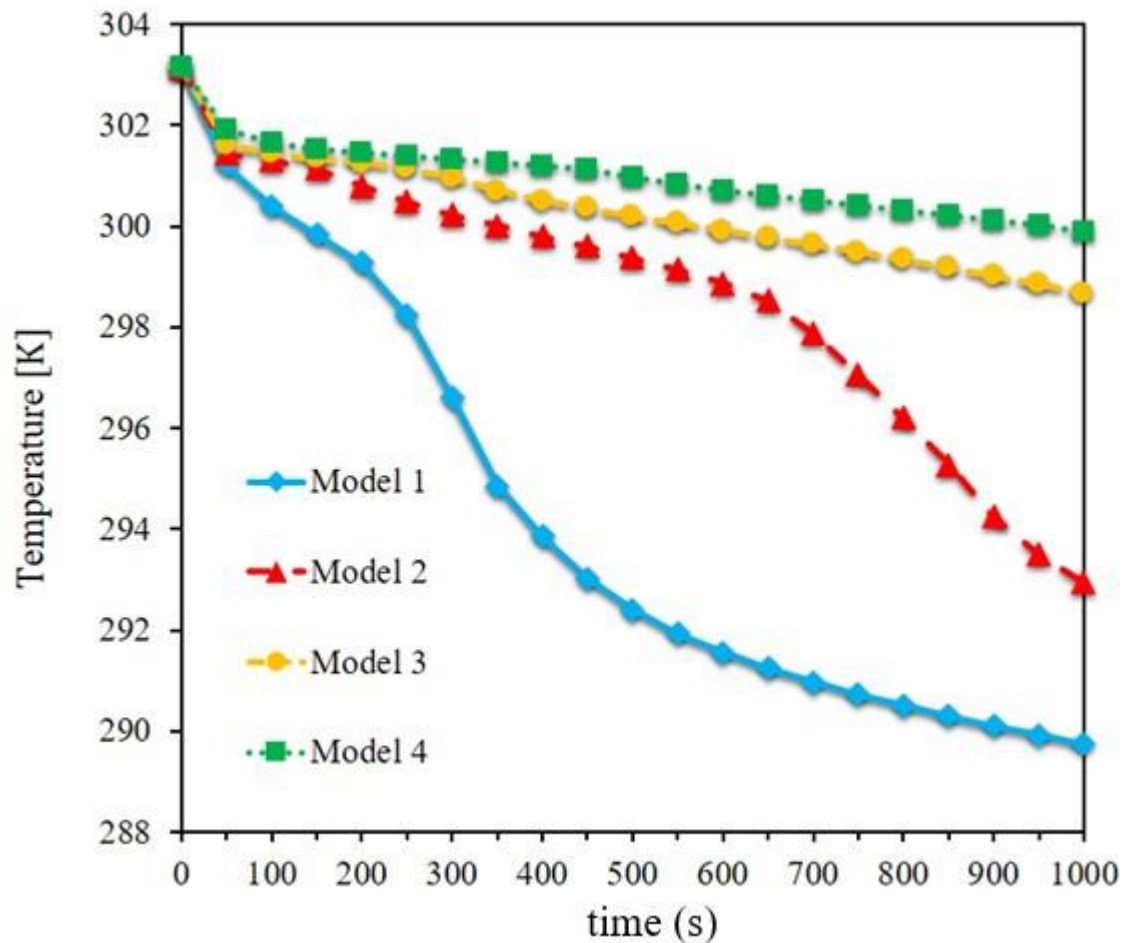


Figure. 8. The AVE temperature values of the PCM at different times for different aspect ratios of the cavity filled with phase change material.

Figure 9 shows the MAX T-B at different times for different PCM heat sink models. Due to the shape of the battery in the duct and the collision of the air with one side of the battery, the temperature values in the battery are different, so the temperature at the inlet of the battery is slightly lower than at the outlet. Since the PCM solidifies earlier in the inlet area of the battery, the temperature in this area drops faster, but the temperature in the lower part of the battery is higher for a longer time. MAX Battery temperatures occur in this area. For models with higher PCM thickness, i.e. models 3 and 4, the MAX temperature in the battery cell is slightly higher for a longer period of time. For Model 1, where less PCM is used in the heat sink, the MAX T-B is greatly reduced in a shorter time and the MAX T-B drops sharply.

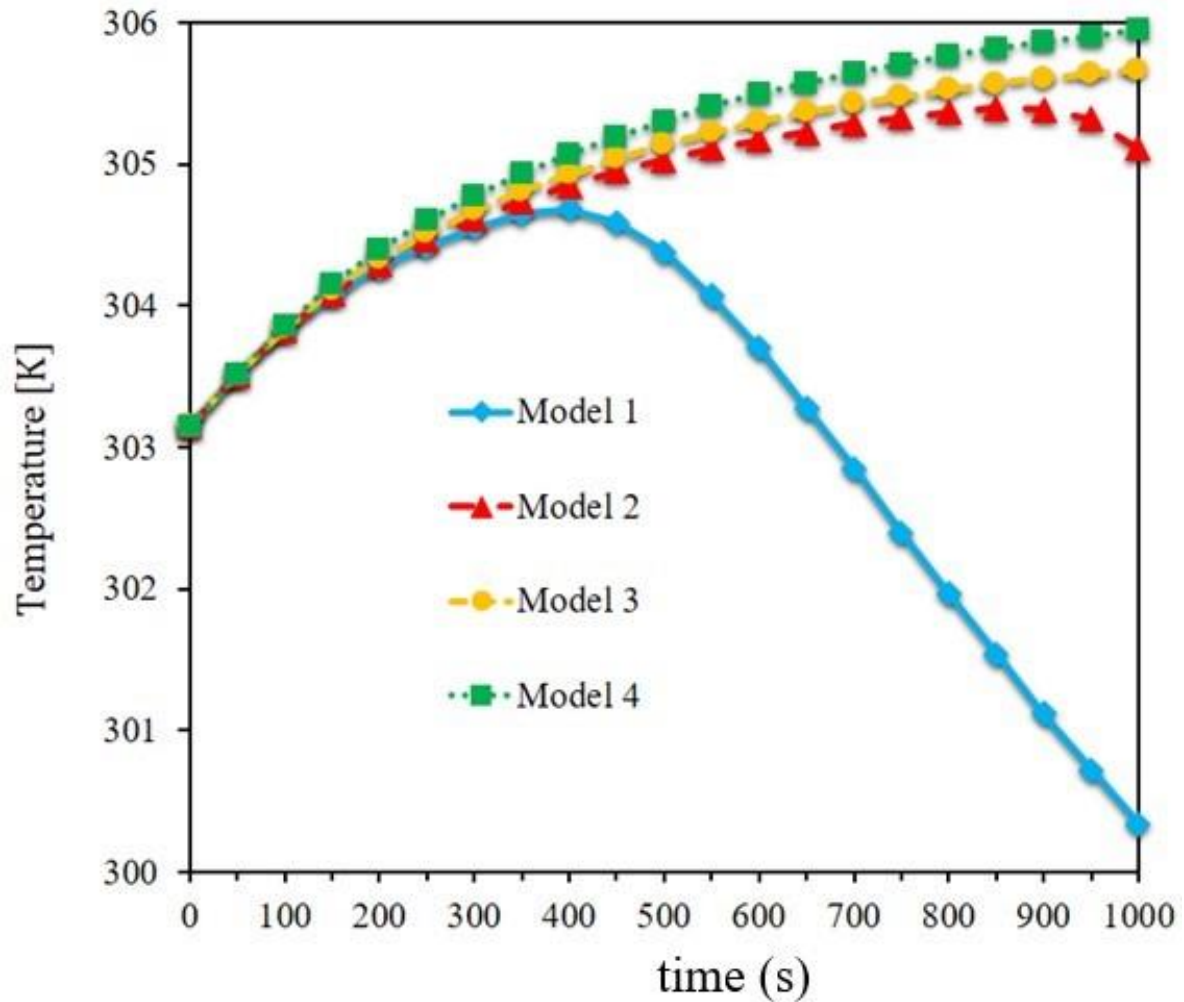


Figure. 9. The MAX temperature values of the battery at different times for different aspect ratios of the cavity filled with phase change material.

Figure. 10 shows the values of air outlet temperature at different times for different PCM heat sink models. The air temperature is higher compared to the inlet for two reasons. The first reason is the performance of the battery during the studied period. The battery generates a heat flux due to its chemical reactions. This heat flux causes the air temperature to rise. Also, due to the melting of the entire PCM in the initial period, a large amount of energy is stored in the PCM. As the air passes through the heat sink, some of this energy is transferred to the air. As a result, the air temperature is increased. Also, some of the PCM solidifies by losing its internal energy. Since the dimensions and the type of battery are kept constant for the different heat sink models, the same amount of heat is generated by them. However, due to the different amount of PCM used in the heat sinks of the different models, the amount of energy dissipated to the air is different. Therefore, the MAX amount of air leakage temperature is observed in model 4, which has the highest amount of PCM in the heat sink. In this model, more heat is transferred from PCM

to the air, and consequently the outlet air temperature is higher. Also, the discharge air temperature is higher for a longer time in this model.

The volume fraction of melt PCM is shown in Fig. 11 at different times for different PCM heat sink models. The more PCM used by the battery heat sink, the longer it takes for PCM to completely solidify in the heat sink. Thus, in Model 4, where the PCM heat sink dimensions are larger and more PCM is used around the battery, the PC

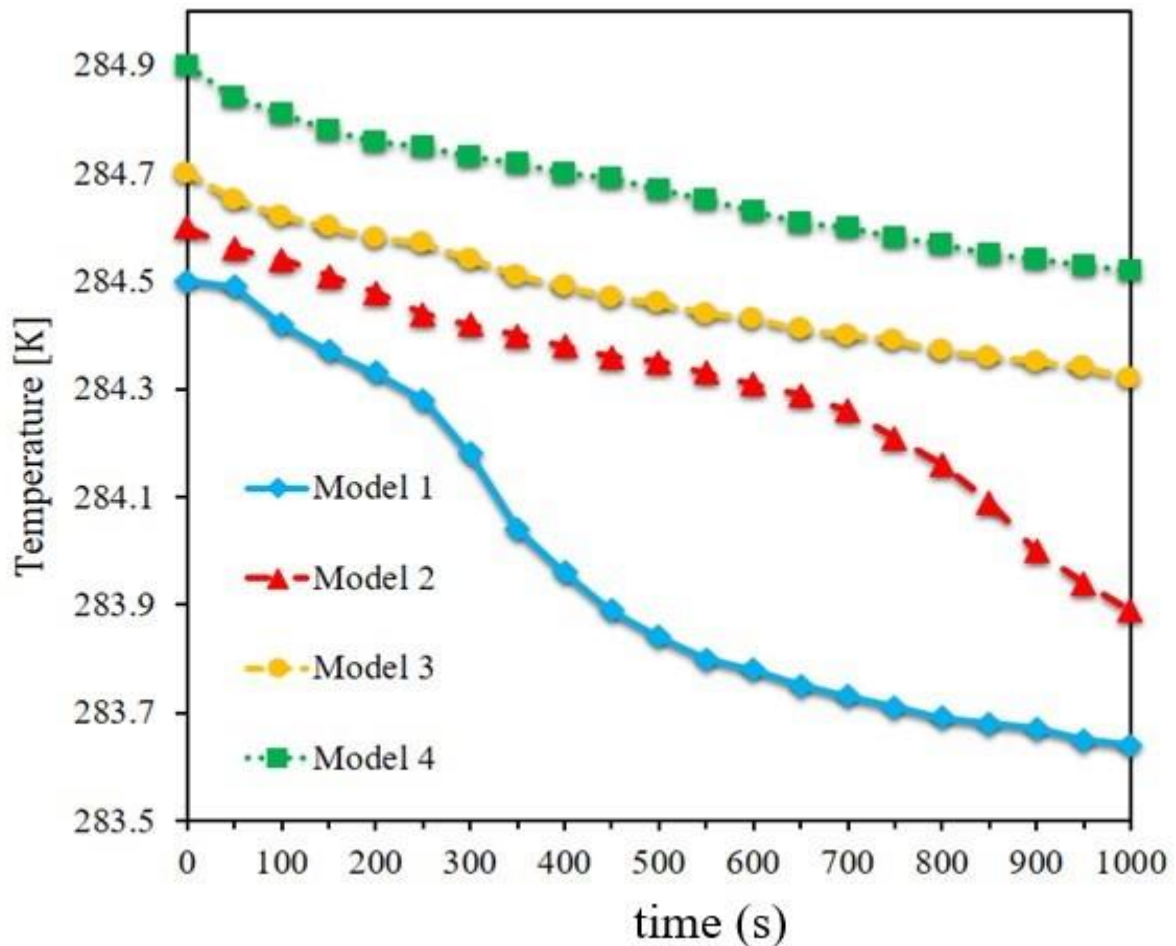


Figure 10. Outlet air temperature values at different times for different aspect ratios of the cavity filled with phase change material.

M solidification time is longer. In contrast, in Model 1, where the heat sink around the battery is smaller and a small amount of PCM is used, PCM solidifies in less than 400 seconds. In Model 2, PCM solidifies in less than 900 seconds, but in Models 3 and 4, some of PCM in the heat sink is still liquid in 1000 seconds. Since the air absorbs the energy stored in the PCM, the amount of solid PCM increases as the air flows with the PCM heat sink for a longer period of time.

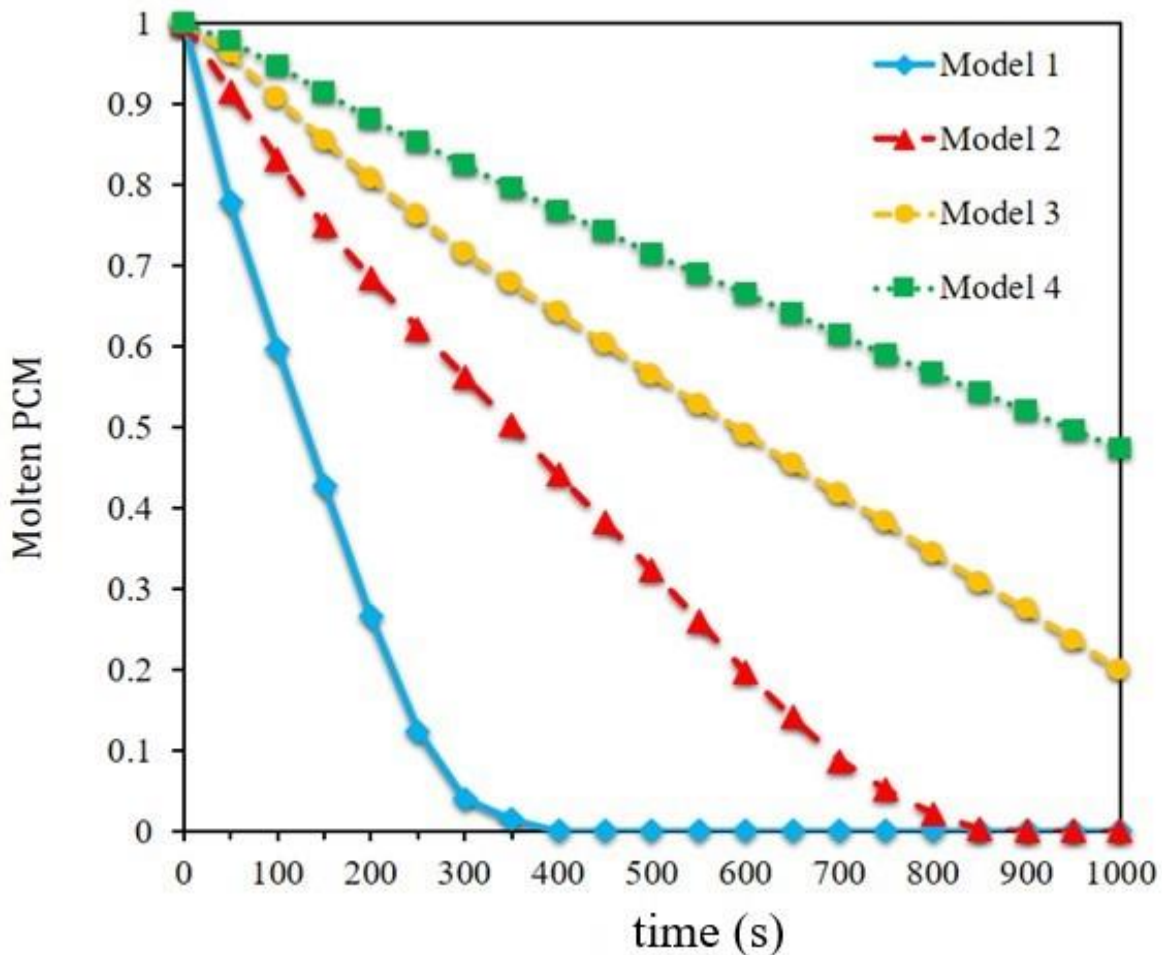


Figure. 11. Volume fraction values of molten PCM at different times for different aspect ratios of cavities filled with phase change materials.

In figure. 12, the percentage of energy supplied by the batteries to the annual energy needed to heat the building is shown for two models of the heat sink PCM and a different number of battery cells. Since the amount of THE required in summer is lower and the amount of energy dissipated by the battery cooling system is constant, a significant percentage of the THE required by the building in summer can be supplied by the battery cooling system. In winter, when the building's energy demand is somewhat higher, the amount of energy supplied by the battery cooling system is significantly reduced. Due to the location of the building in a mild climate, the difference between summer and winter temperatures is not very large. In the spring and fall, a moderate amount of the energy required by the building is provided by the battery cooling system. Overall, these improvements and reductions show that 3 to 30% of the building's energy needs can be met by using 5 to 50 battery cells in the battery cooling system. It is also shown that the use of PCM round heat sinks is more suitable for the energy supply of the building than other forms of heat sinks. Due to better heat exchange between air and batteries, the air temperature in this model is higher, which leads to better energy supply than other models. It has more possibilities to increase the amount of energy easily. The air temperature is higher in this model and thus the energy supply is also higher than other models.

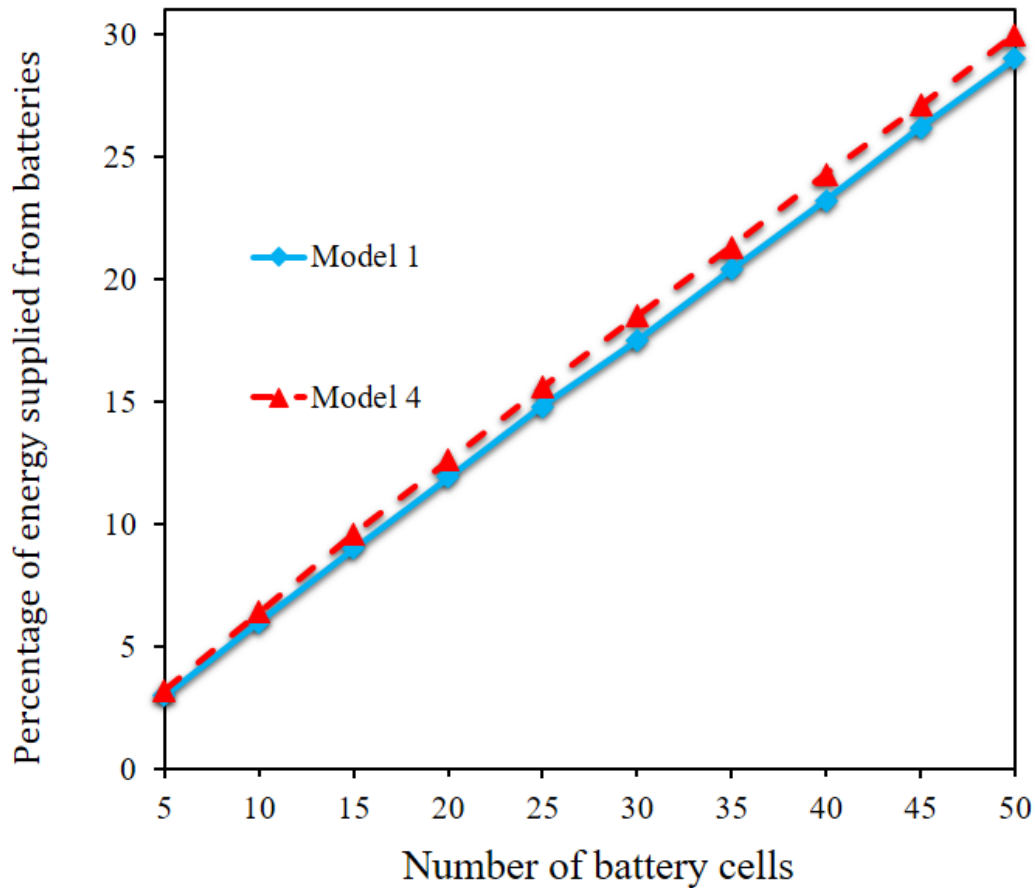


Figure. 12. Percentage of energy supplied from heat generated higher than the required heating energy of the building annually for the two aspect ratios of the PCM-filled cavity and the different number of battery cells.

Conclusions

This paper investigates the effect of using a plate-type lithium-ion battery in the air-conditioning duct of a building to power the building's THE. The batteries are located in a rectangular heat sink with PCM in a laminar air flow. The investigation of different heat sink models leads to the following results.

- 1- The battery has a lower temperature at the inlet and a higher temperature at the outlet. The MAX -T-B occurs at the outlet.
- 2- The use of thicker heat sink models leads to an amplification of the MAX -T-B.
- 3- Model 4 has the MAX average temperature and model 1 has the lowest AVE temperature compared to the other models.
- 4- Model 4 takes the most time and model 1 takes the least time to completely solidify PCM inside the heat sink.
- 5- Using 5 to 50 battery cells in the battery cooling system can provide 3 to 30% of the energy needed for the building annually.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Mert, Mehmet Selçuk, S. E. R. T. Merve, and Hatice Hande MERT. "Isıl enerji depolama sistemleri için organik faz değıştiren maddelerin mevcut durumu üzerine bir inceleme." *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6.1 (2018): 161-174.

- Gürbüz, Habib, and A. T. E. Ş. Durukan. "Egzoz gazlarını kullanan termal enerji depolama sisteminde RT35 parafin mumunun erime ve katılaşma süreçlerinin sayısal analizi" *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 9.2 (2021): 520-534.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., Rosen, M.A., 2017. Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources* 363, 291-303.
- Almehmedi, F.A., Alqaed, S., Mustafa, J., Jamil, B., Sharifpur, M., Cheraghian, G., 2022. Combining an active method and a passive method in cooling lithium-ion batteries and using the generated heat in heating a residential unit. *Journal of Energy Storage* 49, 104181.
- Alqaed, S., 2022. Effect of annual solar radiation on simple façade, double-skin facade and double-skin facade filled with phase change materials for saving energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 51, 101928.
- Amalesh, T., Lakshmi Narasimhan, N., 2020. Cooling of a lithium ion battery using phase change material with air/dielectric fluid media: A numerical study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 234(5), 722-738.
- An, Z., Jia, L., Ding, Y., Dang, C., Li, X., 2017. A review on lithium-ion power battery thermal management technologies and thermal safety. *Journal of Thermal Science* 26(5), 391-412.
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., Newman, J., 1985. A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The Electrochemical Society* 132(1), 5-12.
- Bibin, C., Vijayaram, M., Suriya, V., Ganesh, R.S., Soundarraj, S., 2020. A review on thermal issues in Li-ion battery and recent advancements in battery thermal management system. *Materials Today: Proceedings* 33, 116-128.
- Elsheikh, M.H., Shnawah, D.A., Sabri, M.F.M., Said, S.B.M., Hassan, M.H., Bashir, M.B.A., Mohamad, M., 2014. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, 337-355.
- Hajatzadeh Pordanjani, A., Aghakhani, S., Afrand, M., Mahmoudi, B., Mahian, O., Wongwises, S., 2019. An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *Energy Conversion and Management* 198, 111886.
- Hannan, M.A., Azidin, F., Mohamed, A., 2014. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, 135-150.
- Huang, Q., Li, X., Zhang, G., Deng, J., Wang, C., 2021. Thermal management of Lithium-ion battery pack through the application of flexible form-stable composite phase change materials. *Applied Thermal Engineering* 183, 116151.
- Huo, Y., Rao, Z., 2015. The numerical investigation of nanofluid based cylinder battery thermal management using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91, 374-384.
- Jiang, X., Chen, Y., Meng, X., Cao, W., Liu, C., Huang, Q., Naik, N., Murugadoss, V., Huang, M., Guo, Z., 2022. The impact of electrode with carbon materials on safety performance of lithium-ion batteries: A review. *Carbon*.
- Kalbasi, R., 2021. Introducing a novel heat sink comprising PCM and air - Adapted to electronic device thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 169, 120914.
- Kalbasi, R., Afrand, M., Alsarraf, J., Tran, M.-D., 2019. Studies on optimum fins number in PCM-based heat sinks. *Energy* 171, 1088-1099.
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Biwole, P.H., 2017. Heat transfer study of phase change materials with graphene nano particle for thermal energy storage. *Solar Energy* 146, 453-463.
- Karimi, G., Li, X., 2013. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research* 37(1), 13-24.
- Khateeb, S.A., Amiruddin, S., Farid, M., Selman, J.R., Al-Hallaj, S., 2005. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation. *Journal of power sources* 142(1-2), 345-353.
- Khateeb, S.A., Farid, M.M., Selman, J.R., Al-Hallaj, S., 2004. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter. *Journal of Power Sources* 128(2), 292-307.
- Kirad, K., Chaudhari, M., 2021. Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system. *Journal of Power Sources* 481, 229016.
- Lopes, J.A.P., Soares, F.J., Almeida, P.M.R., 2010. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE* 99(1), 168-183.
- Nilsson, M., 2011. Electric vehicles. *The Phenomenon of Range Anxiety*.
- Orooji, Y., Nezafat, Z., Nasrollahzadeh, M., Shafiei, N., Afsari, M., Pakzad, K., Razmjou, A., 2022. Recent advances in nanomaterial development for lithium ion-sieving technologies. *Desalination* 529, 115624.
- Pesaran, A.A., 2001. Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. *Battery Man* 43(5), 34-49.
- Pordanjani, A.H., Aghakhani, S., Afrand, M., Sharifpur, M., Meyer, J.P., Xu, H., Ali, H.M., Karimi, N., Cheraghian, G., 2021. Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects- a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 128573.
- Pordanjani, A.H., Raisi, A., Ghasemi, B., 2019. Numerical simulation of the magnetic field and Joule heating effects on force convection flow through parallel-plate microchannel in the presence of viscous dissipation effect. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 76(6), 499-516.
- Qian, Z., Li, Y., Rao, Z., 2016. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management* 126, 622-631.
- Sanguesa, J.A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F.J., Marquez-Barja, J.M., 2021. A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities* 4(1), 372-404.
- Shen, Z.-G., Chen, S., Liu, X., Chen, B., 2021. A review on thermal management performance enhancement of phase change materials for vehicle lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148, 111301.
- Shi, Y., Ahmad, S., Liu, H., Lau, K.T., Zhao, J., 2021. Optimization of air-cooling technology for LiFePO₄ battery pack based on deep learning. *Journal of Power Sources* 497, 229894.
- Shojaei, S., Robinson, S., McGordon, A., Marco, J., 2016. Passengers vs. battery: calculation of cooling requirements in a PHEV. *SAE Technical Paper*.

- Singh, L.K., Mishra, G., Sharma, A.K., Gupta, A.K., 2021. A numerical study on thermal management of a lithium-ion battery module via forced-convective air cooling. *International Journal of Refrigeration*.
- Sisk, B., Aliyev, T., Zhang, Z., Jin, Z., Salami, N., Obasih, K., Rick, A., 2015. Integrating thermal and electrochemical modeling of lithium-ion batteries to optimize requirements compliance. SAE Technical Paper.
- Sun, X., Li, Z., Wang, X., Li, C., 2019. Technology development of electric vehicles: A review. *Energies* 13(1), 90.
- Tran, M.-K., Panchal, S., Khang, T.D., Panchal, K., Fraser, R., Fowler, M., 2022. Concept Review of a Cloud-Based Smart Battery Management System for Lithium-Ion Batteries: Feasibility, Logistics, and Functionality. *Batteries* 8(2), 19.
- Wang, T., Tseng, K.J., Zhao, J., Wei, Z., 2014. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy* 134, 229-238.
- Xie, L., Tang, C., Bi, Z., Song, M., Fan, Y., Yan, C., Li, X., Su, F., Zhang, Q., Chen, C., 2021. Hard Carbon Anodes for Next-Generation Li-Ion Batteries: Review and Perspective. *Advanced Energy Materials* 11(38), 2101650.
- Yang, S., Ling, C., Fan, Y., Yang, Y., Tan, X., Dong, H., 2019. A review of lithium-ion battery thermal management system strategies and the evaluate criteria. *International Journal of Electrochemical Science* 14(7), 6077-6107.
- Yao, M., Gan, Y., Liang, J., Dong, D., Ma, L., Liu, J., Luo, Q., Li, Y., 2021. Performance simulation of a heat pipe and refrigerant-based lithium-ion battery thermal management system coupled with electric vehicle air-conditioning. *Applied Thermal Engineering* 191, 116878.
- Zhang, J., Shao, D., Jiang, L., Zhang, G., Wu, H., Day, R., Jiang, W., 2022. Advanced thermal management system driven by phase change materials for power lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159, 112207.
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., Du, Z., 2022. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy* 238, 121652.
- Zhang, Y.S., Courtier, N.E., Zhang, Z., Liu, K., Bailey, J.J., Boyce, A.M., Richardson, G., Shearing, P.R., Kendrick, E., Brett, D.J., 2022. A Review of Lithium-Ion Battery Electrode Drying: Mechanisms and Metrology. *Advanced Energy Materials* 12(2), 2102233.
- Zichen, W., Changqing, D., 2021. A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, 110685.



PREDICTING DIAGNOSIS OF COVID-19 DISEASE WITH ADABOOST AND NAIVE BAYES MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Ahmet ÇELİK*

Kütahya Dumlupınar University, Tavşanlı Vocational School, Department of Computer Technologies, Kütahya, Türkiye

Keywords

*Machine Learning,
Data Mining,
Naive Bayes,
AdaBoost,
Classification,
COVID-19.*

Abstract

Coronavirus disease (COVID-19) has infected millions of people all over the world and caused the death of many people. Identifying people with this disease as soon as possible is an important factor to prevent the disease from spreading. For disease detection, PCR (Polymerase Chain Reaction) tests performed. The results of tests always cannot give 100% accurate. In addition, obtaining information about test results sometimes may take a few days. Regarding the persons who applied to health institutions with suspicion of that illness, the diagnosis of COVID-19 disease takes place with the emergence of different disease symptoms. In this study, diagnostic estimates made for patients in the COVID-19 Surveillance dataset implementing Adaboost and Naive Bayes machine learning (ML) algorithm. It is possible to make predictions about new data by gaining experience from pre-existing data by means of using ML algorithms. In dataset determined within international disease codes for COVID-19 disease diagnosis estimates. Symptoms of patients used as attribute data in the dataset and used in binary format to be suitable for machine learning algorithms. According to the results obtained in this study, the classification forecast made with 85% accuracy with the Naive Bayes algorithm and 100% with the Adaboost algorithm.

COVID-19 HASTALIK TEŞHİSİNİN ADABOOST VE NAİVE BAYES ALGORİTMALARIYLA TAHMİN EDİLMESİ

Anahtar Kelimeler

*Makine Öğrenmesi,
Veri Madenciliği,
Naive Bayes,
AdaBoost,
Sınıflandırma,
COVID-19.*

Öz

Koronavirüs hastalığı (COVID-19), tüm dünyada milyonlarca insana bulaşmış ve birçok insanın ölümüne sebep olmuştur. Bu hastalığı taşıyan kişilerin en kısa sürede tespit edilmesi, hastalığın yayılmasına engel olmaktadır. Hastalık tespiti için PCR (Polymerase Chain Reaction) testleri yapılmaktadır. Bu testleri sonuçları %100 doğrulukta olmamaktadır. Ayrıca test sonuçlarının öğrenilmesi bazı durumlarda birkaç gün zaman alabilmektedir. Hastalık şüphesiyle sağlık kuruluşlarına başvuran kişilerin COVID-19 hastalık teşhisi farklı hastalık belirtilerinin varlığı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, Adaboost ve Naive Bayes denetimli makine öğrenme algoritması kullanılarak COVID-19 Surveillance veri setindeki hastaların COVID-19 teşhis tahminleri gerçekleştirilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak önceden var olan verilerden tecrübe kazanarak yeni veriler hakkında tahminler yapılabilmektedir. Bu çalışmada, COVID-19 hastalık teşhis tahminlerinde, uluslararası hastalık kodlarıyla belirtilen veriler kullanılmıştır. Veri setindeki hastaların gösterdiği belirtiler öznitelik bilgisi olarak kullanılmıştır. Öznitelik verileri makine öğrenme algoritmalarına uygun olması için ikili formatta kullanılmıştır. Bu çalışmada elde sonuçlara göre Naive Bayes algoritmasıyla %85, Adaboost algoritmasıyla %100 doğrulukta sınıflandırma tahmini gerçekleştirilmiştir.

Alıntı / Cite

Çelik, A., (2022). Predicting Diagnosis of COVID-19 Disease with Adaboost and Naive Bayes Machine Learning Algorithms, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1212-1221.

* İlgili yazar / Corresponding author: ahmet.celik@dpu.edu.tr, +90-274-443-6745

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Çelik, 0000-0002-6288-3182	Başvuru Tarihi / Submission Date	31.07.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	11.07.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	24.07.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

There are many types of Coronaviruses around the world with different symptoms. Middle East Respiratory Syndrome (MERS) and Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) are the most common types. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) with different symptoms as a species was first seen in China (Wiguna and Riana, 2020).

This virus is very fast contagious, therefore, so it is extended to many countries around the world and millions of people lost their lives. By PCR (Polymerase Chain Reaction) test, COVID-19 patients are identified. However, getting information about PCR test results may take hours or days. This situation can prolong the treatment process of the patients and the isolation period of the persons at risk of infection. Since millions of people around the world are likely to get this disease, it will be useful to diagnose the disease by a very rapid decision system.

However, depending on the number of patients, a large data stack has been formed. Still, the number of data is gradually increasing (Çelik, 2020). In addition, large amounts of processed or unprocessed data are created by many organizations around the world over the years. These data need to be analyzed quickly. This can be accomplished by data mining methods (Kumar and Singh, 2019). Data Mining can be defined as finding data that has the potential to be useful. Data mining is to reveal the unknown important and effective information from the database for a specific decision-making task. From metadata stored in data storage areas, there is a possibility to find those with interesting features (Chen et al., 2018).

Social media usage data, weather forecast data, internet usage data, cyber security data, electronic shopping data, mobile operator customer data, industry production data, geographic data, mobile operator data, diagnosis and treatment data in the field of health, text content data, image data is in very large amounts. It is very useful to analyze this huge amount of data on the basis of data mining and gain the ability to predict and make decisions about new data by a system using machine learning algorithms.

Wiguna and Riana (2020), in their study, used the C4.5 decision tree algorithm on COVID-19 Surveillance dataset. C4.5 decision tree algorithm is a data mining method using for machine learning. In this study, a system that automatically decides on COVID-19 symptom data has been developed.

Çelik (2020), in his study used the Apriori algorithm to detect COVID-19 disease. Apriori algorithm was used on symptom data shown with ICD (International Classification of Diseases) codes. COVID-19 Surveillance dataset was used as dataset. This dataset contains information on 14 patients showing seven symptoms. In this study, it was observed that the patients with the A01, A02 and A04 symptoms were 100% COVID-19.

Kumar and Singh (2019), in their study, huge data in health services were analyzed with the tools available in the Hadoop system. In this study, by examining the medical database, electronic health records, image-text and clinical decision support system data, predictions have been made with data learning methods.

Randhawa et al. (2018), in their study, detected credit card fraud by using machine learning algorithms in their study. Credit card fraud is a huge problem in financial services. Customers who own a credit card lose billions of dollars each year due to credit card counterfeits. In this study, AdaBoost and majority voting methods were applied separately and hybrid.

Xiao et al. (2019), in their study, used the Adaboost-based method to quickly and accurately estimate joint motion from the surface electromyogram (sEMG). Although different loads on the joint were applied in the study, accurate prediction performance was obtained.

Wang et al. (2019), in their study, based on feature learning, AdaBoost + SVM machine learning algorithms were used together. First, classifiers were taught with Adaboost. Later, these were accepted as features and used on the SVM algorithm. In this study, tests were carried out on four class, ionosphere, chess, monk1 datasets.

Xu and Yuan (2020), in their study, developed an AdaBoost classifier for sonar images with low resolution and noise in the Cifar-10 dataset. Directed gradient (HOG) Histogram is used to perform feature extraction and Support vector machine (SVM) algorithms have been used. Then Adaboost algorithm was used on these properties.

According to the results, approximately 92% was obtained. This result reveals the higher level compared to general methods.

Wu and Zhu (2008), in their study, classified the sample and shape information on the invoice as an attribute using the Bayesian classification method in their study. In this study, 96% success rate was obtained. In addition, manual classification realized in 36 minutes, has been reduced to 2.7 minutes with the method.

Yılmaz and Öztürk (2019), in their study, created a model based on the Bayes algorithm on the Geographical Information System (GIS) data obtained from reference sources in order to create a forest fire risk map. Self-attributes were created by creating variable definitions and ranges of CBS data. In this study, the risk assessment of forest fires creating negative results in many aspects has been applied on a dynamic model.

Olgun and Özdemir (2013), in their study, compared the classification success of Artificial Neural Networks and Bayes machine learning algorithms of Shewhart control graphic patterns based on pattern recognition in their study. For the control chart patterns, normal, repetitive, up trending, down trending, Up Sudden change, Down Sudden change have been used. As a result, it has been revealed that Bayesian pattern recognition has better classification success than artificial neural networks.

In this study, Adaboost and Naive Bayes machine learning algorithms were applied on the data in the COVID-19 Surveillance dataset published in the UCI (University of California, Irvine) machine learning repository. Decision making success rates were tested using seven disease symptoms of 14 patients in this dataset. Data of patients in the same dataset were used to test their success performance. In the results obtained, it has been observed that Adaboost algorithm gave more accurate results. More reliable results will be obtained as the number of sample patients increases.

2. Material and Method

AdaBoost and Naive Bayes algorithms were used to predict PUS (Patient Under Supervision), PIM (Person in Monitoring) and PWS (Person without Symptoms) classification on the COVID-19 Surveillance dataset. Prediction success was measured using the unclassified data of the patients in the dataset. The flow chart of the study is shown on Figure 1. The patient with the PUS Class should be quarantined at home until the PCR test result is available. The patient with the PIM Class should be kept under observation for COVID-19. The patient with PWS Class does not show any signs of disease.

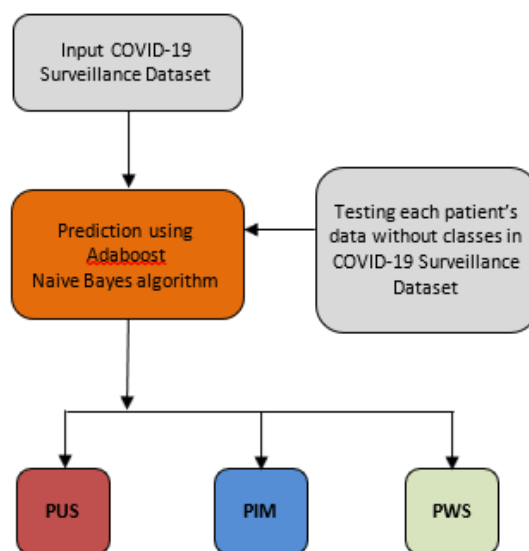


Figure 1. Flow Diagram of The Implemented Model

In the COVID-19 Surveillance dataset, seven disease symptoms are given as attribute information. Disease symptoms are given in ICD (International Classification of Diseases) codes. Symptoms of many diseases have been published with these codes in medical literature and are known all over the world. Latest ICD-11 list was published at 2018 by World Health Organization (WHO) (WHO, 2005). The ICD disease codes within the dataset are shown in the Table 1. The table shows the symptoms and effects of the disease indicated by ICD codes A01-A07.

Table 1. A00-A09 Diseases and Codes (WHO, 2005).

Disease Name	Disease Code
Typhoid and paratyphoid fevers	A01
Other salmonella infections	A02
Shigellosis	A03
Other bacterial intestinal infections	A04
Other bacterial foodborne intoxications	A05
Amoebiasis	A06
Other protozoal intestinal diseases	A07

The COVID-19 Surveillance dataset used in this study was published in the UCI data repository on April 24, 2020. This dataset contains ICD code information for seven disease symptoms that can only be used in the diagnosis of Coronavirus (Dua and Graff, 2019). The content of the COVID-19 Surveillance dataset is shown in the Table 2.

Table 2. COVID-19 Surveillance Dataset Data (Dua and Graff, 2019).

A01,A02,A03,A04,A05,A06,A07	Classes
+,+,+,+,+,-,-	PUS
+,+,-,+,+,-,-	PUS
+,+,+,+,-,-,-	PUS
+,+,-,-,+,-,-	PUS
+,+,-,-,-,-,+	PUS
+,+,+,-,-,-,+	PUS
+,+,-,-,-,-,+	PUS
+,+,+,+,-,-,-	PUS
+,+,-,+,-,-,-	PIM
-,+,-,+,-,-,-	PIM
+,+,-,+,-,-,-	PIM
-,+,-,+,-,-,-	PIM
-,+,-,-,-,-,+	PIM
-,+,-,-,-,-,+	PWS

In the dataset, defined by the ICD codes, if a disease symptom, it is indicated with the "+" symbol, if no disease symptom, it is indicated with the "-" symbol. In the COVID-Surveillance dataset, patients are divided into classes. These classes are PUS (Patient Under Supervision), PIM (Person in Monitoring) and PWS (Person without Symptoms) (Dua and Graff, 2019).

2.1. AdaBoost Algorithm

The AdaBoost (Adaptive Boosting) algorithm was developed by Freund and Schapire in 1996 (Freund and Schapire, 1999). The AdaBoost algorithm is an algorithm that raises the weak classification in a dataset to a strong classification (Wang et al., 2019).

The AdaBoost algorithm was developed as an effective reinforcement algorithm to improve the accuracy of the classification of a "weak" learning algorithm. By doing the learning correctly, this algorithm can classify the examples that are difficult to classify correctly. AdaBoost algorithm can be applied to most classifier learning algorithms. In the AdaBoost algorithm, the sample weight value is realized by using both upward samples and downward samples. It automatically updates the data space for optimum classification. By weighing the samples, adaptation to new samples is achieved with little loss (Sun et al., 2006).

AdaBoost is used with different types of algorithms to increase application performance. The misclassified data and fewer samples are paid more attention to data samples with AdaBoost algorithm. However, it is also sensitive to noise and external sample values. AdaBoost algorithm can improve results from different algorithms as long as the classification is not random (Randhawa, 2018).

In the AdaBoost algorithm, x instances in the dataset using attribute values can be classified into classes. Equation 1 shows these classes.

$$x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \text{ and } y_n \in \{-1, 1\} \quad (1)$$

The class variable y_n takes the values -1 or 1. The variable n indicates the number of data x in the dataset. i is to show metadata. The weight calculation in the dataset is shown in equation 2.

$$w_i = \frac{1}{n} \quad (2)$$

w_i values, indicates the weight of the x_i .

The error rate of misclassified x_i data is shown in equation 3.

$$\epsilon_i = \frac{\sum_{k=1}^e w_k}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

ϵ_i is the error rate value, e is the number of incorrectly classified data and w_k is the weights of the error data. The performance value is calculated using the error rate. Calculation of the performance value is shown in equation 4.

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i}\right) \quad (4)$$

α_i value, shows the performance value of x_i data. Using the performance value, new weight values are calculated. The calculation of the new weight value is shown in equation 5.

$$w_{new_i} = w_i e^{\mp \alpha_i} \quad (5)$$

w_{new_i} is the new calculated weight value of data x_i . After the new weight value found, the weight values should be normalized. The calculation of the new normalized weight values is shown on equation 6.

$$W_{norm_i} = \frac{w_{new_i}}{\sum_{i=1}^n w_{new_i}} \quad (6)$$

W_{norm_i} is the new normalized weight value of data x_i . Classification is carried out using normalized weight values. The classification process is shown in equation 7.

$$C_{x_i} = \arg \max_i (\sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i]) \quad (7)$$

C_{x_i} shows the class of the x_i .

2.2. Naive Bayes Algorithm

Naive Bayes algorithm was developed by British mathematician Thomas Bayes. This method is based on the data probability (Balaban and Kartal, 2018). Naive Bayes algorithm is one of the statistics based algorithms. In this algorithm, by using previously classified data in the dataset, there is a possibility to find out which of the existing classes belongs to the new data (Silahtaroglu, 2016).

Naive Bayes algorithm offers a good solution for binary classification problems. It is widely used in computational and real-time operations. But the attribute species should be well understood (Randhawa, 2018). The Naive Bayes algorithm is very efficient when analyzing large datasets. Bayes classifier takes the probability values of the attribute data into account (Wu and Zhu, 2008).

Bayes algorithm is one of the supervised learning algorithms since the classification objectives are known in advance. It is based on the classification effect of Naive Bayes probability factors. Generally, the probability factor in the Bayesian method has a positive effect on datasets (Orhan and Adem, 2012).

First of all the frequencies of class values are found in Bayes algorithm. Equation 8 shows the calculation of class frequency values.

$$p(c_i) = \frac{c_{i,n}}{n} \quad (8)$$

$p(c_i)$ shows the frequency value of the c_i class, $c_{i,n}$ shows the total number of the c_i class. n , shows the number of x samples in the dataset. After that, the probability of each x_i data is calculated in classes. The probability of belonging x_i to each class shown in equation 9.

$$p(x_i|c_i) = \frac{x_i}{c_{i,n}} \quad (9)$$

$p(x_i|c_i)$ is the frequency of x_i data in the c_i class. $c_{i,n}$ shows the number of instances of the c_i class. The belonging frequency of x_i to all classes is shown in equation 10.

$$p(x_i) = \sum_{i=1}^n p(x_i|c_i) * p(c_i) \quad (10)$$

$p(x_i)$ is the frequency x_i in the dataset. At the last stage, the probability of belonging x_i to classes in the dataset is shown on equation 11.

$$p(c_i|x_i) = \frac{p(x_i|c_i)*p(c_i)}{p(x_i)} \quad (11)$$

$p(c_i|x_i)$, probability of belonging x_i to classes in the dataset. According to obtained result, the x_i data belongs to the class which high probability value.

3. Experimental Results

In the study, firstly, the process of converting the attribute data represented by ICD codes to binary digital type was performed in the COVID-19 Surveillance dataset. AdaBoost and Naive Bayes algorithms need to be implemented using this format. The data converted into binary digital format is shown in the Table 3. The ICD code's disease symptom of each patient is available in the table. A value of "1" indicates that there is disease symptom represented by the ICD code. A value of "0" indicates that there is no disease symptom represented by the ICD code.

Table 3. Binary Format Of Surveillance COVID-19 Data.

Patients	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07
p-1	1	1	1	1	1	0	0
p-2	1	1	0	1	1	0	0
p-3	1	1	1	1	0	1	0
p-4	1	1	0	1	0	1	0
p-5	1	0	0	0	0	0	1
p-6	1	1	1	0	0	0	1
p-7	1	1	0	0	0	0	1
p-8	1	1	1	1	0	0	0
p-9	1	0	0	1	1	0	0
p-10	0	1	0	1	1	0	0
p-11	1	0	0	1	0	1	0
p-12	0	1	0	1	0	1	0
p-13	0	1	0	0	0	0	1
p-14	0	0	0	0	0	0	1

As the first method, the data in the COVID-19 Surveillance dataset was analyzed with the AdaBoost algorithm and PUS, PIM classification forecast (decision) was made for each patient. The classification forecast was made by the AdaBoost algorithm of the patients is shown in Table 4. The classification forecasts made by the AdaBoost algorithm are shown in the AdaBoost (Result) field. Classifications are PUS and PIM. When the patient attributes are analyzed with the AdaBoost algorithm, the probability of belonging to the PIM class is shown in the AdaBoost (PIM) Prediction field. When the patient attributes are analyzed with the AdaBoost algorithm, the probability of belonging to the PUS class is shown in the AdaBoost (PUS) Prediction field. According to the results %92% prediction with accuracy using the AdaBoost algorithm were established on the Surveillance COVID-19 dataset.

Table 4. Prediction And Probability Values Made for Each Patient By AdaBoost Algorithm.

Patients	AdaBoost (Result)	AdaBoost (PIM) Prediction	AdaBoost (PUS) Prediction
p-1	PUS	0.002	0.998
p-2	PUS	0.002	0.998
p-3	PUS	0.002	0.998
p-4	PUS	0.002	0.998
p-5	PIM	0.998	0.002
p-6	PUS	0.002	0.998
p-7	PUS	0.002	0.998
p-8	PUS	0.002	0.998
p-9	PIM	0.998	0.002
p-10	PIM	0.998	0.002
p-11	PIM	0.998	0.002
p-12	PIM	0.998	0.002
p-13	PIM	0.998	0.002

For each patient's class prediction was found probability of the highest 99.8% and the lowest 0.2%. The class whose high probability value is calculated with the AdaBoost algorithm shows the class of the new instance belongs. Figure 2 shows the graph of the classification forecast results in color using AdaBoost. The red column shows the probability of AdaBoost (PIM) and the blue column shows the probability of AdaBoost (PUS). The 5th patient's class was estimated as PIM while he was expected to be PUS. With the AdaBoost algorithm, only one patient's disease diagnosis prediction was made incorrectly.

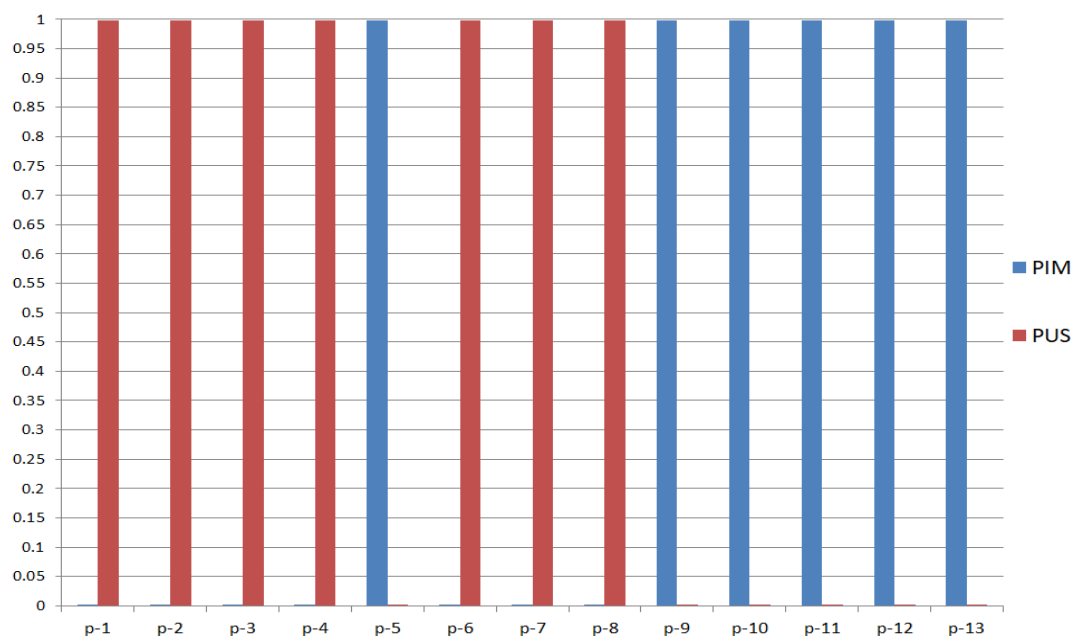


Figure 2. Classification Forecast Performed by AdaBoost Algorithm

As the second method, the data in the COVID-19 Surveillance dataset was analyzed with the Naive Bayes algorithm and PUS, PIM classification forecast (decision) was made for each patient. The classification forecast of the patients was made by Naive Bayes algorithm of is shown in Table 5.

Table 5. Prediction And Probability Values Made for Each Patient By Naive Bayes Algorithm.

Patients	Naive Bayes (Result)	Naive Bayes (PIM) Prediction	Naive Bayes (PUS) Prediction
p-1	PUS	0.232	0.768
p-2	PIM	0.643	0.357
p-3	PUS	0.231	0.769
p-4	PIM	0.643	0.356
p-5	PIM	0.651	0.349
p-6	PUS	0.056	0.944
p-7	PUS	0.262	0.738
p-8	PUS	0.117	0.823
p-9	PUS	0.489	0.511
p-10	PIM	0.829	0.171
p-11	PUS	0.489	0.511
p-12	PIM	0.829	0.171
p-13	PUS	0.305	0.695

The classification forecasts made by the Naive Bayes algorithm are shown in the Naive Bayes (Result) field. Classifications are PUS and PIM When the patient attributes are analyzed with the Naive Bayes algorithm, the probability of belonging to the PIM class is shown in the Naive Bayes (PIM) Prediction field. When the patient attributes are analyzed with the Naive Bayes algorithm, the probability of belonging to the PUS class is shown in the Naive Bayes (PUS) Prediction field.

According to the results obtained, the prediction was made with 54% accuracy with the Naive Bayes algorithm on the Surveillance COVID-19 dataset. Incorrect classification forecast was made for one patient in the PUS class and one in the PIM class. The classification of 2th, 4th, 5th, 9th 11th and 13th patient was realized incorrect prediction. The 2th, 4th and 5th patient's class was estimated as PIM while expected to be PUS. The 9th, 11th and 13th patient's class was estimated as PUS while he was expected to be PIM.

Figure 3 shows the graph of the classification forecast results in color using Naive Bayes. The red column shows the probability of Naive Bayes (PIM) and the blue column shows the probability of Naive Bayes (PUS).

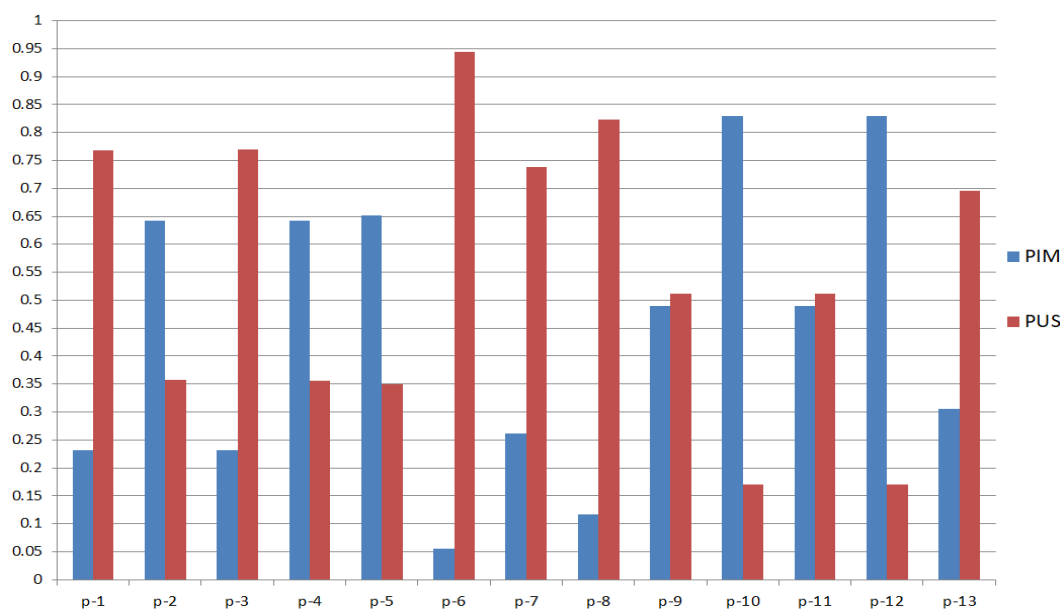


Figure 3. Classification Forecast Performed by Naive Bayes Algorithm

4. Result and Discussion

In this study, classification forecasts of the patients in the COVID-19 Surveillance dataset were made using AdaBoost and Naive Bayes machine learning algorithms on the basis of data mining. In the dataset, fourteen patients had symptoms specified by seven ICD codes. Using these signs, patients can be classified as PUS, PIM, and PWS. With machine learning methods, predictions can be made on new data by gaining experience from the data in the dataset. There are large amounts of digital data in many areas around the world and the numbers continue to increase. Machine learning is carried out with and without supervision. The target points in supervised learning are predetermined, but the target points in unsupervised learning are not pre-determined. AdaBoost and Naive Bayes machine learning algorithms are supervised learning methods. COVID-19 has spread all over the world and millions of people have been infected and died due to this pandemic disease. Detection of this disease is carried out with PCR tests and obtaining information about the test results may take a few days in some cases. Unfortunately, PCR test results of the disease caused by COVID-19 mutation viruses may take longer. In the study, classification forecasts were made separately with AdaBoost and Naive Bayes algorithms using the unclassified data of the patients in the dataset. As a result of the study, the prediction was made with 92% accuracy with the AdaBoost algorithm and with 54% accuracy with the Naive Bayes algorithm. According to the results, AdaBoost machine learning algorithm is more successful than Naive Bayes machine learning algorithm in the COVID-19 Surveillance dataset. This study proved that using machine learning methods in the diagnosis of COVID-19 can be useful and fast.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Balaban, M. E., Kartal, E. (2018). Veri madenciliği ve makine öğrenmesi temel algoritmaları ve R Dili ile Uygulamaları, İkinci Baskı. İstanbul, Türkiye, Çağlayan Kitap & Yayıncılık & Eğitim.
- Chen, Y., Chang, Y., Kan, Y., Chen, R. S., Wu, S. F. (2018). Using Data Mining Technique to Improve Billing System Performance in Semiconductor Industry, 2018 International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT), DeKalb, IL, 23-25 March, 2018.
- Çelik, A. (2020). Using Apriori Data Mining Method in COVID-19 Diagnosis. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 5(3), 121-131.
- Dua, D., Graf, F. C. (2019). UCI Machine Learning Repository, University of California, School of Information and Computer Science, Irvine, USA.
- Freund, Y., Schapire, R. E. (1999). A Decision-Theoretic Generalization of On-line Learning and An Application to Boosting, *Proc. Eur. Conf. Comput. Learn. Theory*, 119-139.

- Kumari, S., Singh, M. (2019). Big Data Analytics for Healthcare Industry: Impact, Applications, and Tools, in Big Data Mining and Analytics, 2(1), 48-57.
- Olgun, M., Özdemir, G. (2013). İstatiksel Özellik Temelli Bayes Sınıflandırıcı Kullanarak Kontrol Grafiklerinde Örüntü Tanıma, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), 303-311.
- Orhan, U., Adem, K. (2012). The Effects of Probability Factors in Naive Bayes Method, 2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Turkey, 29 Nov-01 Dec. 2012.
- Randhawa, K., Loo, C. K., Seera, M., Lim, C. P., Nandi, A. K. (2018). Credit Card Fraud Detection Using AdaBoost and Majority Voting, IEEE Access, 6,14277-14284.
- Silahtaroglu, G. (2016). Veri madenciliği (Kavram ve algoritmaları), Üçüncü Baskı, İstanbul, Türkiye, Papatya Yayıncılık Eğitim.
- Sun, Y., Kamel, M. S., Wang, Y. (2006). Boosting for Learning Multiple Classes with Imbalanced Class Distribution, Sixth International Conference on Data Mining (ICDM'06), Hong Kong, China, 18-22 Dec 2006.
- Wang, F., Li, F., He, F., Wang, R., Yu, W., Nie, F. (2019). Feature Learning View Point of Adaboost and a New Algorithm, IEEE Access, 7, 149890-149899.
- Wiguna, W., Riana, D. (2020). Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 (Covid-19) Surveillance Using C4.5 Algorithm, Journal PILAR Nusa Mandiri, 16, 71-80.
- World Health Organization (WHO). (2005). International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems, 10th Revision (ICD-10 manual), Centers for Disease Control and Prevention, 1: 1-1268.
- Wu, X., Zhu, X. (2008). Mining With Noise Knowledge: Error-Aware Data Mining, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 38(4), 917-932.
- Xiao, F., Wang, Y., He, L., Wang, H., Li, W., Liu, Z. (2019). Motion Estimation From Surface Electromyogram Using Adaboost Regression and Average Feature Values, IEEE Access, 7,13121-13134.
- Xu, H., Yuan, H. (2020). An SVM-Based AdaBoost Cascade Classifier for Sonar Image, IEEE Access, 8: 115857-115864.
- Yılmaz, İ., Öztürk, D. (2019). Mekânsal Planlama ve Karar Problemlerinde CBS ve Bayes Ağlarının Entegrasyonu: Orman Yangın Tehlikesi Örneği, TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye, 23-25 Ekim 2019



THE EFFECTS OF CONSTRUCTION WASTE ON CLIMATE CHANGE: IS A MORE GREEN CONSTRUCTION INDUSTRY POSSIBLE?

Pınar Sezin ÖZTÜRK KARDOĞAN*, Ahmet ERDAĞ

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Ankara, Türkiye

Keywords

*Construction Waste,
Climate Change,
CO₂ Emissions,
Greenhouse Effect.*

Abstract

Due to the increasing population, the rapid consumption of natural resources has revealed the necessity of protecting nature from people. Increasing building stock due to population growth has triggered climate change. The energy and natural resources consumed during production in the construction sector have created important environmental problems such as global warming and climate change in the sector. Greenhouse gas emissions caused by construction materials can be considered as one of the main causes of climate change problems and emphasizes the necessity of considering environmental effects. Greenhouse gas is one of the most important factors affecting the ecological environment and climate change, as it is one of the gases with the highest carbon dioxide emission rate. Concrete and steel used in the construction industry are among the materials that have a negative impact on climate change. This study revealed the effects of waste materials used in the construction industry on the problem of climate change and the importance of promoting the efficient use of energy resources for the management of this problem. In addition, this study emphasized the importance of focusing on sustainable structures in order to leave a cleaner and healthier environment for future generations, and that priority should be given to developing environmentally friendly materials.

İNŞAAT ATIKLARININ İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ: DAHA ÇEVRECİ BİR İNŞAAT SEKTÖRÜ MÜMKÜN MÜ?

Anahtar Kelimeler

*İnşaat Atıkları,
İklim Değişikliği,
CO₂ Emisyonu,
Sera Gazı Etkisi.*

Öz

Artan nüfusa bağlı olarak doğal kaynakların hızlı tüketimi doğayı insanlardan korumak zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Nüfus artışına bağlı artan yapı stoğu iklim değişikliğini tetiklemiştir. Yapı sektöründe üretim esnasında harcanan enerji ve doğal kaynaklar, sektörde küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi önemli çevre sorunları yaratmıştır. İnşaat malzemelerinin ortaya çıkardığı sera gazı emisyonları iklim değişikliği problemlerinin temel nedenlerinden sayılabilmekte ve çevre etkilerini dikkate almamız gerekliliğini vurgulamaktadır. Sera gazı, karbondioksit salınım oranı en yüksek gazlardan biri olması sebebiyle ekolojik çevreye ve iklim değişikliğine etki eden önemli unsurlardandır. İnşaat sektöründe kullanılan beton ve çelik iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkiye sahip malzemelerin başında gelmektedir. Bu çalışma, inşaat sektöründe kullanılan atık malzemelerin iklim değişikliği sorunu üzerindeki etkilerini ve bu sorunun yönetimi için enerji kaynaklarının verimli kullanılmasının yaygınlaştırılmasının önemini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca bu çalışma ile gelecek nesillere daha temiz ve daha sağlıklı bir çevre bırakmak adına sürdürülebilir yapılara odaklanmanın, bunun için de çevre dostu malzemeler geliştirmeye öncelik verilmesi gerektiğinin önemi vurgulanmıştır.

Alıntı / Cite

Öztürk Karadoğan, P.S., Erdağ, A., (2022). The Effects Of Construction Waste On Climate Change: Is A More Green Construction Industry Possible?, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1222-1231.

* İlgili yazar / Corresponding author: sezinozturk@gazi.edu.tr, +90-505-791-8120

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
P.S. Öztürk Kardoğan, 0000-0002-5212-4318	Başvuru Tarihi / Submission Date	15.01.2022
A. Erdağ, 0000-0001-9380-9439	Revizyon Tarihi / Revision Date	09.06.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	30.06.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

Technological developments and industrialization in parallel with rapid population growth have rapidly increased the impact of human beings on the environment all over the world (Gündüzalp and Güven, 2016). While the increase in production activities in this process has enhanced the rate of use and consumption of natural resources depending on the waste released, which has reached a level that threatens both the environment and human health (Kaçtıoğlu and Şengül, 2010).

Population growth and economic developments in the world have occurred the condition of expanding living spaces. Depending on this, urban and industrial areas are expanding and the natural environment is affected by this with the construction of living spaces (Kartal, 2018). Today, increasing construction activities cause high energy and natural resource consumption. Environmental problems arise as a result of the building storage that is occurred by using materials containing a large number of harmful substances. Considering that the urban population will increase in the following years, the concept of the sustainable and environmentally-related building has come into question to reduce negative environmental impacts. In recent years, many types of research on ecological structure production have been carried out and new approaches have been brought to this subject. Accordingly, the main features that we encounter are that the energy consumed during the building production is at a minimum level and meanwhile the waste generation is low, the materials used do not contain harmful properties and contribute to the circulation of natural resources. In this study, the effects of waste materials used in the construction and building sector on climate change and depending on this, the dissemination of the efficient consumption of energy resources is examined. During the production of cement, which is the binder material of concrete used in the construction industry, greenhouse gas is released. Approximately 5-8% of the total CO₂ emissions worldwide occur during cement production at the end of clinker processes (Alsubari et al. 2016, Maraghechi et al., 2017). The CO₂ emission released at the end of these processes raises the importance of waste minimization, which consumes less energy during production and provides the sustainability of the construction site by using recycled construction materials (Teixeira et al., 2016). One of the most suitable processes to reduce the CO₂ footprint of concrete, which is a construction material, is to use the raw materials used in clinker, especially fly ash, blast furnace slag, silica fume, etc. with industrial by-products instead of natural resources, or to substitute recycled materials such as waste glass and plastic (Berndt, 2009, Meyer, 2009).

Climate change which is caused by greenhouse gas emissions that is created by human beings is one of the biggest problems that the world has faced recently. Greenhouse gases are one of the most harmful gases due to the high emission rate of CO₂. In addition to the energy and greenhouse gases that are accumulated in construction materials, a very large amount of environmental waste occurs during the production and consumption of these materials. These emitted gases have a devastating impact on the environment and cause ecological problems such as climate change. In general, while using materials for buildings, the energy to be consumed during the construction of the building should be considered in the material selection as they affect the ecology. Since the overuse of modern building materials causes high carbon emissions, it brings about the ecological balance to deteriorate (Coşkun, 2013). The selection of materials, which provides low energy consumption, reduces the effects of buildings on the environment (Zinzade, 2010).

Sustainability, a term that has been widely used in the construction industry recently, is to meet the needs of human beings by protecting nature, achieving a high level of harmony with nature in a balance. In sustainable building design, all conditions must be taken into account in order to minimize adverse environmental conditions and to obtain a spatially comfortable and high-quality architectural design. The use of daylight quality has positive effects on the concept of sustainability. The efficient use of daylight reduces energy consumption in buildings and contributes to energy savings. As a result, CO₂ absorption, the formation of toxic gases and global warming are reduced (Tatar, 2013). There are some methods for the environmental assessment of the constructed buildings. The Breeam (The Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) certification system, which was first developed in England in 1990, is the first environmental assessment method in the world. The subject of this study and one of Breeam's goals is to reduce the impact of the buildings on the environment in the life cycle (Anbarcı et al., 2012). Supplying raw materials for building materials, their transportation, processing, assembly and processing causes CO₂ production and triggers global warming (Breeam, 1993). Buildings are also responsible for ozone layer depletion and climate change. The most important reason for this is chlorofluorocarbons (CFC) (Dorbek, 2007). For instance, in 1986, buildings, refrigerants used in air-conditioning

systems and foam materials used in insulation accounted for 7.5% of the UK's annual CFC use and this ratio has exceeded 15%, not only because buildings emit more CFCs, but also because of the emergence of new usage areas such as propellants in aerosol sprays (Dorbek, 2007). As a result of all harmful effects, it underlines the effects of waste materials on climate change in the design of buildings and the need for efficient consumption of energy resources. In addition, the energy consumed during the production of building materials, the amount of CO₂ released, and the waste generated should be kept to a minimum.

2. Climate Change

The climate system has naturally changed on all time scales throughout the Earth's approximately 4.5 billion-year history (Türkeş et al., 2000). The problems and damages that are caused by global warming and climate change are the environmental issues at the forefront that threaten the world (Doğan and Tüzener, 2011). The current effects of climate change; will increase agriculture, water resources, sea level, energy, human health and biodiversity. Although climate change has not been experienced all over the world, it will cause successive impacts in terms of economic, social and ecological aspects and will make it necessary to take measures against climate change. At the same time, all of the states in the world must take the necessary precautions by showing a common determination. The main causes of climate change are; the increase in the current temperature on earth as a result of the emission of naturally occurring greenhouse gases to the atmosphere and fossil fuels burned to generate energy from additional greenhouse gases, cutting down the rainforests, improper agricultural and livestock practices, chemical production, and human acquisitions.

As shown in Table 1, global climate change has effects on agriculture, vegetation, forest, water resources, sea level, energy, human health, and biodiversity. It is inevitable that climate change will have some impacts on social and economic life.

Table 1. Potential Impacts of Global Climate Change (Doğan and Tüzüner, 2011)

Sea Level Rise and Coastal Areas	Energy	Human Health	Agriculture	Natural Environment and Species	Water Resources	Forests
Coastal Erosion	Change in Energy Policies	Climate-Related Deaths	Product Losses	Losses in Natural Habitats	Decrease in Water Supply	Forest Composition
Floods and Overflows	Change in Energy Consumption	Epidemics	Irrigation Problems	Decrease in Species Diversity	The decline in Water Quality	Change in the Geographical Distribution of Forests
Costs of Protecting Resident Coastal Communities	Change in Energy Costs	The decline in Air Quality	Change in agricultural fields	-	Competition for Water Resources	The decline in Forest Health and Productivity

2.1 Nature Climate Change

The climate balance in the world has been changing since human beings settled down. As well as climate change in the world can change from natural causes, today's anthropogenic effects also contribute to this (Aksay et al., 2005). External factors, which can cause climate change, mainly include plate movements in the earth's crust, changes in solar activities and astronomical relations between the earth and the sun (Türkeş, 2008). Astronomical relationships include a series of periodic changes and provide important evidence for long-term climate changes. Major astronomical relationships to global climate change include; the "changes in shape (E) of the earth's orbit around the sun (eccentricity more rounded or more elliptical) and changes in the earth's axial tilt (T) and precession (P) (direction of the rotation axis)" (Figure 1) (Türkeş, 2008).

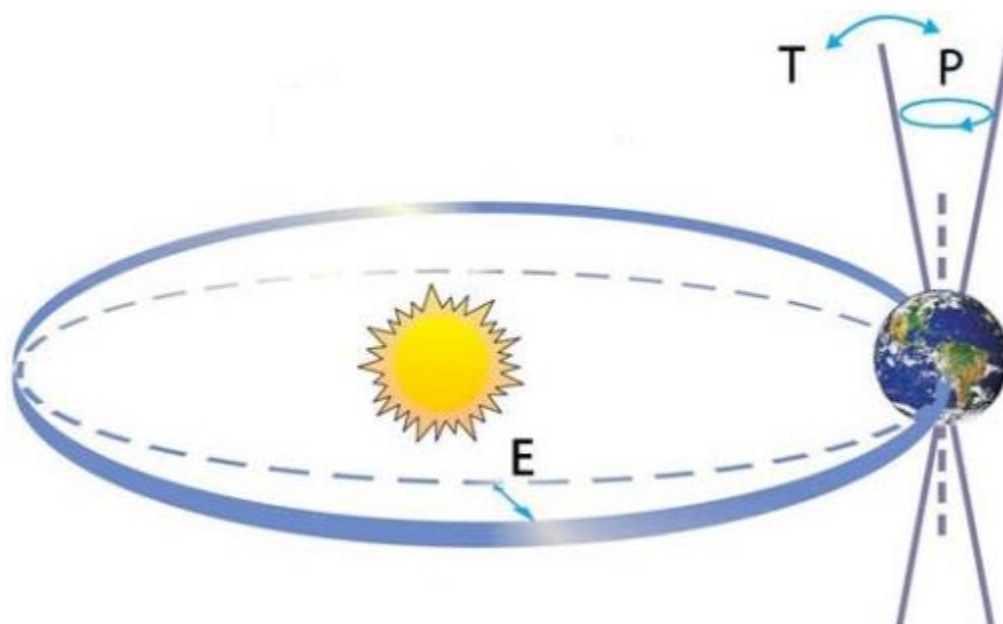


Figure 1. Simplified Roadblocks Of Milankovitch Cycles [2]: (E) Changes in The Shape of The Earth's Orbit, (T) Axial Tilt, and (P) Precession (Türkeş, 2008)

2.2 Human-induced Climate Change

Gases other than industrial gases are found in the atmosphere and account for 1% of it. The percentages of these gases in the atmosphere are sufficient for the formation of the natural greenhouse effect. Thus, our world has a warmer temperature of up to 30°C (UNEP, 2001). Recently, the human-induced formation of greenhouse gases has been the main focus of the global climate change issue. With the increasing population, human activities in the fields of energy, industry, agriculture and transportation increase; thus, greenhouse gas emissions rise. As a result, an increase in world temperature occurs (Figure 2). This increasing temperature also affects climate change. Especially in the 20th century, an increase in greenhouse gas emissions is observed.

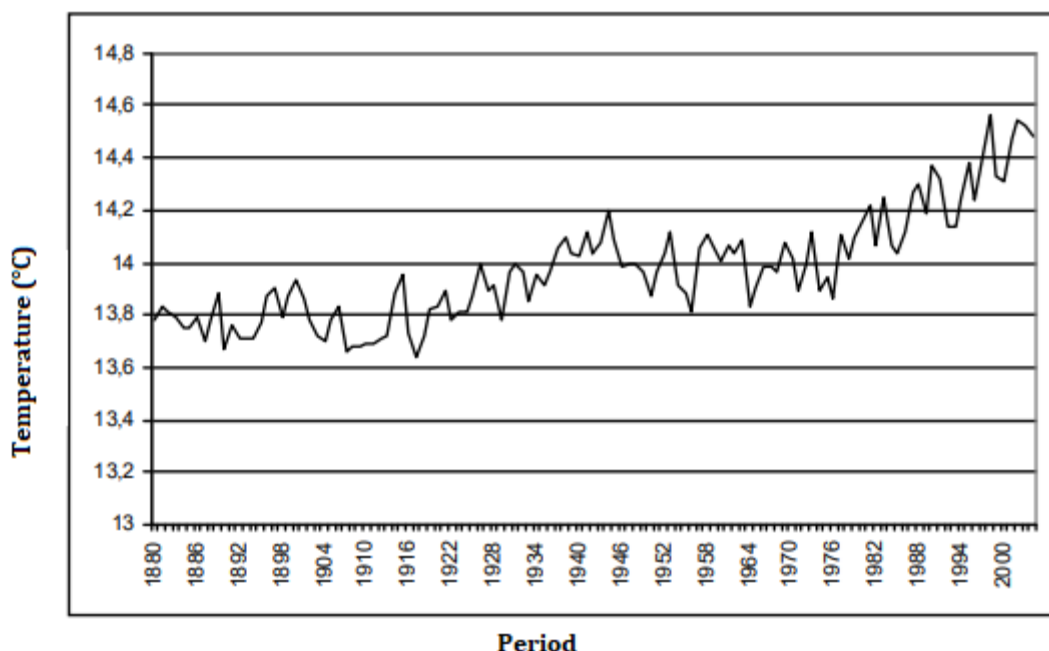


Figure 2. Earth's Surface Temperature (°C) in the Period 1880-2004 (Doğan and Tüzer, 2011)

Human impacts are not only greenhouse gases but also aerosols and volcanic eruptions. These are among the main human factors that can cause climate change though their duration of action varies. Unlike the gases, which come out as a result of the combustion of coal, oil, and organic materials and create a greenhouse effect, aerosols reflect the sunlight that reaches the atmosphere back into space (Doğan and Tüzer, 2011). Aerosols have cooling effects and although their lifespan is shorter than greenhouse gases, their effects are more local. Aerosols cause acid rain

and deterioration in air quality (URL 1: Date accessed: 29.04.2021).

3. Waste

Any substance to be disposed of can be defined as waste (Ağaçayak, 2019). According to the environmental law, it is defined as “Harmful substances thrown or released into the environment as a result of any activity” (Çevre Kanunu, 1983). In other words, according to the United Nations Environment Programme (UNEP), the concept of solid waste is defined as “Substances that the owner does not want, does not need, does not use, and needs to be treated and disposed of” (Öztürk, 2010).

According to the IPCC, wastes are classified as household waste, industrial waste and other wastes (IPCC, 2006). Household, commercial or industrial wastes are expressed as the loss of usefulness after consumption of raw materials, fuel or water, and therefore loss of material value for the person (Read, 1999). Large wastes in urban areas are defined as household waste. Household wastes consist of food wastes, garden and park wastes, cardboard, wood, plastic, metal, glass, and other wastes and most of them are recyclable and reusable materials. The separate collection of all these wastes that will participate in recycling is of great importance for the reduction of greenhouse gas emissions.

3.1 Types of Waste

Solid wastes are divided into seven groups regarding their origin; household solid wastes, industrial wastes, hazardous wastes, special wastes, medical wastes, agricultural and garden wastes, construction and demolition wastes (Gündüzalp and Güven, 2016).

Household Wastes;

These are the wastes that can be transported with the services of municipalities, destroyed in household waste landfills, recovered by separation and incineration. Kitchen garbage, packaging wastes, office wastes can be given as examples (Sayar, 2012).

Hazardous Wastes;

“Substances or preparations that are explosive, oxidizing, highly flammable, irritating, harmful, carcinogenic, corrosive, infective, fertile, mutagenic, which, in contact with air, water or an acid, release toxic or very toxic gases and substances and preparations produced during the disposal of wastes with any of these listed characteristics are ecotoxic wastes” (Atık Yönetimi Genel Esasları Yönetmeliği, 2008).

Industrial Wastes;

These are the wastes that are generated as a result of industrial studies.

Agricultural and Garden Wastes;

These are the wastes that are generated as a result of the processing of animal and herbal products. The solid wastes produced are affected by the social and economic situation of the society, dietary habits, and different conditions such as climate and geography (Palabıyık and Altunbaş, 2004).

Medical Wastes;

According to the Regulation on Control of Medical Wastes No. 27555, it refers to the “*Infectious, pathological and penetrating wastes originating from the units*” (Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 2005).

Construction and Demolition Wastes;

They are the type of waste that is released as a result of the construction and demolition of buildings.

Other than solid wastes, there are also liquid, gas and packaging waste in the world. Blood from hospital waste, washing water used in dental treatment applications, dialysis machine water, cleaning water, sewage water wastes, etc. refer to household wastes; nuclear power plants, industrial plant chimneys, incineration plants, the use of fossil fuels for energy purposes, garbage storage, and composting areas refer to gaseous wastes (Karasu, 2013).

3.2. Construction Wastes

3.2.1 Construction and Demolition Wastes

Construction activities such as buildings, bridges, roads, tunnels, subways and canals affect the environment to a certain extent. When considering a large-scale construction project, it is necessary to prepare an Environmental Impact Assessment (EIA) report that covers all impacts since it will affect the soil, water and air environments before proceeding to the construction phase (Erdin et al., 2004).

Before a construction project is undertaken, all elements that will adversely affect the environment must be eliminated. As soon as the first scoop hits the ground, wastes that need to be disposed of such as excavated ground and construction rubble will be generated. Recycling is seen as a very useful process in the destruction of construction waste and rubble.

In the report prepared by the European Commission in 1999, it is stated that an average of 180 million tons of construction and demolition waste is generated every year for 15 member countries (Ölmez and Yıldız, 2008). 78% of waste is stored and approximately 28% is recycled. The amount of construction and rubble waste that is generated in Germany, England, France, Italy, and Spain from 15 member countries is 80% of the amount of waste that is generated in European Union member countries. The Netherlands, Belgium and Denmark are countries that have achieved great success in the recycling of construction and rubble wastes. As it is demonstrated in Table 2, construction and demolition wastes that are generated after construction activities are divided into 4 categories.

Table 2. Categories of Construction and Demolition Waste (Ölmez and Yıldız, 2008)

Categories	Types of Waste
Road Construction and Maintenance Materials	Asphalt, concrete, cover soil
Excavation Materials	Soil, stone, hardcore
Building Debris Waste	Concrete, mixed rubble, steel, brick, iron, timber
Building Renovation and Work Zone Materials	Wood, roofing material, pipe, carpet, plastic, glass, metal, insulation material,

3.2.2 Wastes Resulting from Natural Disaster

Disasters continue their negative effects on people and the environment from past to present (Güler, 2018). Wastes that result from disasters can be; herbal wastes, soil and rock wastes, household wastes, damaged buildings and infrastructure, recyclable wastes, electronic, white goods wastes and living corpses (Brown et al., 2011). The wastes that are generated as a result of natural disasters are construction and demolition wastes. Asbestos and arsenic-treated woods in waste cause health problems (Dubey et al., 2007). During the post-disaster period, wastes such as food and beverage wastes used medical wastes, and packaging wastes continue to occur (Luther, 2008). A lot of work has been done to reveal the wastes that are released at the end of disasters (Brown et al., 2011). The types of waste that are generated in different disaster situations within the scope of these studies are given in Table 3.

Table 3. Types Of Waste That is Generated In Different Types Of Disasters (FEMA, 2007)

		Types of Waste Generated								
		Herbal waste	Construction/ rubber waste	Personal waste	Hazardous waste	Household hazardous waste	White goods	Solid/ mud	Tools	Rotten waste
Types of Disasters	Hurricane / typhoon	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Tsunami	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Tornado	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Floods	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Earthquakes		*	*		*	*	*		
	Forest fires	*		*		*	*	*		
	Ice storms	*				*				

Disasters will continue to maintain their devastating effects in the process from the past to the present. Due to the collapsed buildings and infrastructure after disasters, a large amount of waste such as concrete, brick and wood emerges.

3.3 Greenhouse Gas Emissions Caused by Construction Wastes and Their Impact on Climate Change

Greenhouse gases are compounds in the atmosphere that have the most heat retention feature and prevent the sun's rays from overheating and cooling the earth. Thanks to the ability of the atmosphere to transmit light and retain heat, the temperatures of the soil and water remain in balance. The world becomes overheated due to the increase in the amount of heat retained in the atmosphere because of the overproduction of greenhouse gases (Kartal, 2018). The gases causing the greenhouse effect in the world are 36-70% water vapour (H₂O), 9-26% carbon dioxide (CO₂), 4-9% methane (CH₄) and 3-7% ozone (O₃). Among these gases, especially CO₂ is released more in industrialized countries and this is also called carbon emission. CO₂ emission is mostly seen as a result of fuel consumption. In addition, carbon emissions increase significantly as a result of increasing industrial activities. Carbon emissions are the most important cause of climate change.

A high amount of carbon emissions occur during the production of cement and steel, which are frequently used building materials in the construction industry. The production of these building materials is carried out at high temperatures and fossil fuels are used for this. With the increasing industrialization and urbanization, the use of these raw materials and depending on the amount of carbon that is released into the air is increasing day by day.

The amount of carbon emissions in various building materials in the construction industry is demonstrated in Table 4. The amount of carbon sequestration seen in the table is a situation-specific to wood material, as it is a situation related to the material's ability to contain carbon (Kartal, 2018). Since the wood from which the wood material is obtained is organic, it has the property of retaining carbon and is the construction material that contributes the least to carbon emissions.

Table 4. Carbon Emission Values of Commonly Used Materials in Construction (Kartal, 2018)

Material types	Carbon footprint amount (CO ₂ eg/kg)	Carbon sequestration amount (CO ₂ g/kg)	Origin of material
Polyurethane	4200	-	Polymer
Stainless steel	3778	-	Metal
Polystyrene	3300	-	Polymer
Glass wool	3148	-	Glass
Aluminium plaque	2980	-	Metal
Aluminium profile	2264	-	Metal
Polyethylene	2130	-	Polymer
Plasterboard	1967	-	Natural stone
Float glass	1230	-	Glass
Copper pipe	981	-	Metal
Copper plate	973	-	Metal
Plywood	718	1188	Wooden
HDF	661	1436	Wooden
MDF	652	1417	Wooden
Ceramic tile	613	-	Soil
Autoclaved aerated concrete	442	-	Cement, mortar, concrete
Fiberboard	425	1531	Wooden
Hardboard	409	1564	Wooden
Plaster	243	-	Natural stone
Lightweight concrete	240	-	Cement, mortar, concrete
OSB	208	1692	Wooden
Dried wood (leafy tree)	167	1636	Wooden
Wood fibre/ Fibre sized wood	152	1638	Wooden
Precast concrete	121	-	Cement, mortar, concrete
Dried wood (coniferous tree)	119	1637	Wooden
Laminated wood	109	1730	Wooden
Freshly cut wood	49	1182	Wooden
Hardcore	14	-	Natural stone
Gravel	3	-	Natural stone
Gypsum	3	-	Natural stone
Sand	2	-	Natural stone

It is seen that the carbon emission of metal, glass and polymer-containing materials is quite high while the carbon emission of terracotta, autoclaved aerated concrete, processed natural stone and composite wood materials is at a moderate level.

4. The Importance of Sustainability and Waste Management In The Construction Sector A More Environmental Approach

The construction sector holds many sectors in its own market and benefits from this sector from the construction to the end of the construction process in the construction sector (Pamuk and Kuruoğlu, 2016). While words such as clean and green are not used together with the construction industry, it has now become possible with the developing technology and environmentally friendly designs.

The increase in the damage of the construction sector to human health and the environment day by day, as a result of this, the sustainability of the sector and its environmentalist approach have also been brought up. It is known that buildings consume 30% of material resources and 40% of energy resources in the construction sector, and 35% of the CO₂ emissions that cause global warming and climate change originate from the construction sector and it has been emphasized that new practices should be mentioned to reduce the rates of construction waste (Çekirge and Çubukçuoğlu, 2017).

In the future, it will gain importance for the construction industry to design structures that will increase energy efficiency and reduce CO₂ emissions. Many laws have been made to increase energy efficiency and reduce CO₂ emissions in European Union countries, England and China (Candemir et al., 2012). For instance, the "Climate Change Act" in the UK aims to reduce CO₂ emissions in buildings by 26% until 2020 and by 80% in 2050 (Candemir et al., 2012). In the light of these aims, it is mentioned that the buildings to be built in the world must be built on the basis of zero-carbon.

5. Conclusion and Suggestions

In recent years, when natural resources have been rapidly depleted, the increase in population and industrial activities has increased the amount of energy used. This situation has brought up taking precautions to protect the environment as a result of the deterioration of the ecosystem balance. Energy efficiency has been brought up using materials that are less harmful to nature and the balanced consumption of natural resources.

The increase in energy consumption, the increase in the greenhouse effect with the use of some materials in the construction field, and the increase in carbon emissions depending on this brought up the constructions to be done according to some environmental criteria on the agenda. There are some certificate systems (Leed and Bream) that are used by many countries in this field. These certificate systems have some main criteria and include topics such as sustainable land, usage of water and material resources, energy and atmosphere use, and indoor air quality.

Thus, by giving importance to the concept of energy conservation of the building in the construction sector, the energy performance, carbon emission values and reusability or recycling properties of materials gain importance.

It is observed that greenhouse gases, which are generated as a result of construction activities, have a negative impact on climate change. Depending on this, it is underlined that energy ought to be used effectively and carbon emissions should be kept at a minimum level. It is known that glass, metal and polymer-based materials have quite deep impacts on the environment. Although the embedded energies of polymer-based materials are low, the fact that they have high carbon emissions, create hazardous wastes when they are used and disposed of.

It is required to take necessary precautions to use energy effectively in the production of materials that are used in the construction industry (especially in cement production), to reduce consumption and to reduce their effects on climate change, and improvement activities should be traceable and sustainable.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Ağaçayak, T., 2019. Türkiye’de Atık, Atıksu Ve Hava Kalitesi Yönetiminde İklim Değişikliği Kapsamlı Yerel Çalışmalar. İklim Değişikliği Eğitim Modülleri Serisi 13.
- Aksay, C. S., Ketenoglu, O., Latif, K., 2005. Küresel Isınma ve İklim Değişikliği. Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 1(25), 29-42.
- Alsubari, B., Shafiqh, P., Jumaat, M. Z., 2016. Utilization of High-Volume Treated Palm Oil Fuel Ash to Produce Sustainable Self-Compacting Concrete. Journal of Cleaner Production, 137, 982-996.
- Anbarcı, M., Giran, Ö., Demir, İ. H., 2012. Uluslararası Yeşil Bina Sertifika Sistemleri İle Türkiye’deki Bina Enerji Verimliliği Uygulaması. Engineering Sciences, 7(1), 368-383.
- Berndt, M. L., 2009. Properties of Sustainable Concrete Containing Fly Ash, Slag and Recycled Concrete Aggregate. Construction and Building Materials, 23(7), 2606-2613.
- Breem/New Offices Version 1/93, 1993. An Environmental Assessment for New Office Designs. Building Research Establishment. 46, 123-132.
- Brown C., Milke M., Seville E., 2011. Disaster Waste Management: A review article. Waste Management, 31, 1085-1098.
- Candemir, B., Beyhan, B., Karaata, S., 2012. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik: Yeşil Binalar ve Nanoteknoloji Stratejileri. İMSAD ve TÜSİAD Yayınları, s. 36.
- Çekirge, G. Çubukçuoğlu, B., 2017. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Atık Yönetiminin Önemi: Vaka Çalışması Örneğiyle. Conference: 7. İnşaat Yönetimi Kongresi.
- Coşkun, M. E., 2013. Türk Evlerinde Yapı Malzemeleri ve Yapım Teknikleri. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Mimarlık Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Doğan, S., Tüzer, M., 2011. Küresel İklim Değişikliği ve Potansiyel Etkileri. CÜ İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi, 12(1), 21-34.
- Dubey B., Solo-Gabriele H.M., Townsend T.G., 2007. Quantities of arsenic-treated wood in demolition debris generated by Hurricane Katrina. Environmental Science Technology. 41, 1533-1536.
- Erdin, E., Alten, A., Tunali, T., 2004. İnşaat Atıklarının Değerlendirilmesi. 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu.
- FEMA, 2007. Public Assistance Debris Management Guide, Federal Emergency Management Agency (FEMA). Washington, https://www.fema.gov/medialibrarydata/2013072618225045418/fema_325_debris_management_guide_2007.07.25.pdf, (Date accessed: 30.05.2021).
- Güler, Ü. A., 2018. Sürdürülebilir Afet Yönetiminde Atık Yönetimi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4(2), 236-246.
- Gündüzalp, A. A., Güven, S., 2016. Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği. Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi, 9.
- Kaçtıoğlu, S., Şengül, Ü., 2010. Erzurum Kenti Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü İçin Tersine Lojistik Ağı Tasarımı ve Bir Karma Tam Sayılı Programlama Modeli. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 24(1), 89-112.
- Karasu, A., 2013. Çevresel Atıklar ve Nedenleri, Çevresel Atıkların Geri Dönüştürülmesi ve Yenilenebilir Enerji Olanaklarının Araştırılması. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya A.B.D. Yüksek Lisans Tezi. Bilecik.
- Kartal, M., 2018. Yapıda Sık Kullanılan Malzemelerin Ekolojik Olarak Değerlendirilmesi. Işık Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İç Mimarlık Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Maraghechi, H., Salwocki, S., Rajabipour, F., 2017. Utilisation of Alkali Activated Glass Powder in Binary Mixtures with Portland Cement, Slag, Fly Ash and Hydrated Lime. Materials and Structures, 50(1), 1-14.
- Meyer, C., 2009. The Greening of the Concrete Industry. Cement and Concrete Composites, 31(8), 601-605.
- Ölmez, E., Yıldız, Ş., 2008. İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Yönetimi ve Planlanan İstanbul Modeli. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları, 8, 02-06.
- Özkaya, S. Y., 2013. İklim Değişikliği ve Etik Prensipler. Uluslararası Ekonomik Sorunlar.
- Öztürk, İ., 2010. Katı Atık Yönetim ve AB Uygulamaları. İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi 2.
- Palabıyık, H., Altunbaş, D., 2004. Kentsel Katı Atıklar ve Yönetimi. Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar: Ekolojik, Ekonomik, Politik ve Yönetimsel Perspektifler, 103-124. Beta, İstanbul.
- Pamuk, R., Kuruoğlu, M., 2016. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Bina İnşaatlarında Evrensel Uygulama Örnekleri. Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1).
- Read, A. D., 1999. A Weekly Doorstep Recycling Collection, I Had No Idea We Could: Overcoming The Local Barriers to Participation. Resources, Conservation and Recycling, 26(3-4), 217-249.
- Sayar, Ş., 2012. Sakarya İli Entegre Atık Yönetimi ve Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Tatar, E., 2013. Sürdürülebilir Mimarlık Kapsamında Çalışma Mekanlarında Gün Işığı Kullanımı İçin Bir Öneri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(1), 147-162.
- Teixeira, E. R., Mateus, R., Camoes, A. F., Bragança, L., Branco, F. G., 2016. Comparative Environmental Life-Cycle Analysis of Concretes Using Biomass and Coal Fly Ashes as Partial Cement Replacement Material. Journal of Cleaner Production, 112, 2221-2230.
- Türkeş, M., 2008. Küresel İklim Değişikliği Nedir? Temel Kavramlar, Nedenleri, Gözlenen ve Öngörülen Değişiklikler. İklim Değişikliği ve Çevre, 1(1), 26-37.
- Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G., 2000. Küresel İklim Değişikliği ve Olası Etkileri. Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası), 7-24.
- URL: <https://www.abbilgi.eu/tr/iklim-degisikligiyle-birlikte-mucadele-edelim.html> (Date accessed: 29.04.2021).
- URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/18132.pdf>. (Date accessed: 29.04.2021).
- URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/07/20050722-16.htm> (Date accessed: 29.04.2021).
- URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/07/20080705-7.htm>. (Date accessed: 29.04.2021).
- URL: IPCC, (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipccngip.iges.or.jp/public/2006gl/> (Date accessed: 20.05.2021)

- URL: Luther L., 2008, Disaster debris removal after Hurricane Katrina: status and associated issues. Congressional Research Service, <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL33477.pdf>, (Date accessed: 30.05.2021).
- URL: UNEP, 2001. Climate Change Information Kit. <http://unfccc.int/resource/iuckit/cckit2001en.pdf> (Date accessed: 29.04.2021).
- Zinzade, D., 2010. Yüksek Yapı Tasarımında Sürdürülebilirlik Boyutunun İrdelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.



ELEKTRİKLİ ARAÇ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM SİSTEMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE ŞARJ İSTASYONU ALTYAPISININ TAYİN EDİLMESİ

Dilan YILDIZHAN^{1*}, Ayşe Kübra ERENOĞLU², Ozan ERDİNÇ¹

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Elektrikli Araç,
Dağıtım Sistemi,
Şarj İstasyonu,
Transformatör,
Yük Akışı.*

Öz

Günümüzde hızla artan nüfusun paralelinde yaşamsal ihtiyaçlara bağlı tüketimler için ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ve sanayileşme ile enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. İlgili enerji ihtiyacı daha çok konvansiyonel kaynaklardan karşılanmakta ancak bu durum çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Fosil yakıtların en çok tüketildiği ve doğal olarak karbon emisyonuna neden olan alanlardan biri olan ulaşım sektöründe ise ciddi değişimler meydana gelmektedir. Özellikle fosil kaynaklı araçlar yerini Elektrikli Araçlara (EA) bırakmakta ve birçok marka EA modelleri geliştirmeye yönelik önemli adımlar atmaktadır. Ancak EA'ların üretim ve kullanımının artması enerjiye olan ihtiyacı da katlamaktadır. Aynı zamanda bu araçların şarj ihtiyaçları için kurulması gereken şarj istasyonu sayısı ve yatırım gerektiren altyapı hizmetlerinin planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de hizmet veren bir dağıtım sistemi operatörlüğünde işletilen ve EA şarj istasyonu kurulması planlanan otopark alanları için DIGSILENT PowerFactory V15.1 programında detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Türkiye'de hizmet veren bir otopark işletmecisi ile ortak çalışılacak alanlarda altyapı hizmetlerinin aksamaması ve olası güç sistemi arızalarının önüne geçebilmek amacıyla güç akışı analiz sonuçları paylaşılmıştır. Hatlardan akan aktif, reaktif güçler ve transformatör yüklenmelerine göre öneriler sunulmuştur.

THE EFFECTS OF ELECTRIC VEHICLE INTEGRATION ON THE DISTRIBUTION SYSTEM AND DETERMINATION OF CHARGING STATION INFRASTRUCTURE

Keywords

*Electric Vehicle,
Distribution System,
Charging Station,
Transformer,
Load Flow.*

Abstract

Today, the need for energy is increasing day by day with the technological developments and industrialization that have emerged in order to keep up with the consumption related to the vital needs that increase in parallel with the rapidly increasing population. This emerging energy need is mostly provided by non-renewable resources and also causes environmental pollution. Serious changes are occurring in the transportation sector, which is one of the areas where fossil fuels are consumed the most and naturally causes carbon emissions. In particular, fossil-based vehicles are replaced by Electric Vehicles (EVs), and many brands are taking important steps to develop EV models. However, the increase in the production and use of EVs also increases the need for energy. At the same time, it makes it necessary to plan the number of charging stations and infrastructure services that require investment for the charging needs of these vehicles. In this study, detailed analyzes were carried out in the DIGSILENT PowerFactory V15.1 program for the parking areas operated by a distribution system operator in Turkey and where an EV charging station is planned to be installed. Power flow analysis results were shared in order to prevent disruption of infrastructure services and possible power system failures in areas to be worked in partnership with a parking lot operator serving in Turkey. Suggestions are presented according to the active and reactive powers flowing from the lines and transformer loads.

* İlgili yazar / Corresponding author: dilanyildizhan@gmail.com, 0507-192-33-01

Alıntı / Cite

Yıldızhan, D., Erenoğlu, A.K., Erdiñç, O., (2022). Elektrikli Araç Entegrasyonunun Dağıtım Sistemine Etkilerinin İncelenmesi ve Şarj İstasyonu Altyapısının Tayin Edilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1232-1242.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

D. Yıldızhan, 0000-0002-2686-3440
A.K. Erenoğlu, 0000-0002-9578-6194
O. Erdiñç, 0000-0003-0635-9033

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.05.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	30.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.07.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Nüfus artışı ile fosil yakıtların bilinçsizce kullanımı küresel ısınma, iklim değişikliği gibi birçok sorunu ortaya çıkarmıştır. Karbon emisyonu da ilgili olumsuz sonuçlardan biri olmakla beraber atmosfere yayınlan CO2 miktarı olarak tanımlanabilir. Bu gazlar güneşten gelen ışınların yansımalarını önleyerek yer yüzünün sıcaklığının artmasına yani ısınmaya sebep olmaktadır.

Dünyada hali hazırda enerji ihtiyacının %83'si fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (BP Statiscal,2021). Bu oran ilk olarak sanayi devrimden sonra artışa geçmiştir. Sanayi devriminden önce 280 milyonda bir (ppm) olarak ölçülen karbon salınımı 2013 yılında 400 ppm değerinde ölçülmüştür. Bu da 263 yıllık bir süreçte karbon emisyonu artışının %43 bandında olduğunu göstermiştir (Kibert, 2016).

Karbon emisyonu ve etkilerini azaltmak amacıyla 2019 yılında Avrupa Birliği Komisyonu Yeşil Mutabakat protokolü hazırlamış ve gerekli regülasyonlar ile yönetmelikleri içeren ilk paketini de onaya sunmuştur. Bu paket 2030 yılına kadar karbon emisyonunu %55 oranında azaltmayı hedeflemektedir (European Green Deal,2019). Bu yaptırımların sonucu ve getirilen karbon salınımı sınırlamaları ile birçok sektör bu tedbirlerden ciddi oranda etkilenecektir.

Etkilenecek sektörlerin başında gelen ulaşım sisteminde en radikal dönüşüm fosil yakıtlı araçların yerini EA'ların almasıdır. Fakat bu entegrasyon sadece ulaşım sistemini etkilemekle kalmaz aynı zamanda güç sistem altyapısının hazır olmasını zorunlu kılar. 2035 yılına kadar yakıtlı araçlardan kaynaklı karbon emisyonunun sifıra ulaştırılması hedeflenmektedir (European Comission, 2019). Hedefi gerçekleştirebilmek için ise hem küre ölçeğinde hem de ülkemizde piyasaya EA modeli sunma ve altyapı geliştirme faaliyetlerine ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Sadece EA'ların üretilmesi değil sürdürülebilir bir işletim için planlama, devreye alma, şarj istasyonu kurulumları, konum analizleri ve konvansiyonel güç sistemine olan etkiler de detaylı olarak incelenmelidir.

Avrupa için durum değerlendirildiğinde, EA satışları 2021'de yaklaşık %70 artarak 2,3 milyona ulaştı ve bunların yaklaşık yarısı şarj edilebilir hibrit araçlardır. Yıllık büyüme, satışların iki kattan fazla arttığı 2020'dekinden daha yavaş olsa da pandemiden henüz kurtulamayan genel bir Avrupa otomotiv pazarının zemininde gerçekleşti. 2021'deki toplam otomobil satışları, 2019'dakinden %25 daha düşük gerçekleşti. Avrupa'da 2019-2020 yıllarındaki EA satışlarındaki artış, kısmen yeni karbon emisyon standartlarından kaynaklanmıştır (International Energy Agency, 2022). Ülkemizde ise bu oranlar giderek artış göstermekte teşvikler ve yatırımlar ile pazar payının önemli bir seviyeye ulaşacağı öngörülmektedir. Türkiye'de 2013 yılından 2022 yılına kadar satılan EA'ların toplam sayısı 5004 olmakla beraber sadece 2021 yılında satılan EA miktarı 2020 yılında satılan EA miktarından yaklaşık %237 daha fazladır (Enerji Atlası, 2022). Diğer ülkelere nazaran araç talebinin yükselişi yeterli oranda belirgin olmasa da Türkiye'de yerel elektrikli araç üretim kapasitesinin yaratılması zaten var olan sanayi temelini etkileyebilir (Arnold ve Provan, 2019).

31 Mayıs 2018 yılında kurulan Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu tarafından üretilecek EA'ların 2022 yılı içerisinde kullanıma sunulması hedeflenmektedir (Sanal Savunma TOGG, 2022). Aralık 2019 yılında ilk EA prototipi kamuoyuna tanıtılmıştır. Ülkemizin attığı bu adımlar EA üretiminde küre ölçeğinde bir paydaş olmasını amaçladığını ortaya koymaktadır. Diğer ciddi bir yatırım olarak da Koç Holding'in Volkswagen AG ile yaptığı 1,4 milyar Euro bedelindeki elektrikli ticari araç üretimi anlaşmasıdır (Koç Medya, 2021).

Ülkemizdeki tüm bu gelişmeler ve öte yandan artan nüfus da göz önünde bulundurulduğunda EA'ların sayılarının gün geçtikçe artacağı aşıkardır. İlgili talebi karşılamak amacıyla yaygınlaşacak şarj istasyonları hizmet veren dağıtım şirketlerinin alt yapılarını ciddi derecede etkileyecektir. Özellikle son zamanlarda site gibi yaşam alanlarının yoğunlaşması, diğer bir taraftan artan kentleşme ve nüfusla birlikte büyük kapasiteli otoparkların genişlemesiyle karşı karşıyayız. Bahsedilen alanlardaki EA girişimi, şebekeden talep edilen birim alan başına düşen gücü yükselterek dağıtım sisteminin olumsuz etkilenmesine sebebiyet verebilir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Alanla ilgili literatür irdelendiğinde EA fosil yakıtların tükenmesi ve çevresel baskı nedeniyle hızla geliştirilmektedir. Ancak esnek bir kaynak olarak EA şarjı belirsizliklerle doludur ve şebekeye geniş ölçekli entegrasyonu ile büyük bir dağıtık üretim sistemi gibi çalışabilir. Bu durumun dağıtım sisteminin güvenilir çalışmasını zorlaştırdığı ve güvenilirlik seviyesinin artırılması için sistemin doğrusal olmayan kısmının doğrusallaştırılması gerektiği iki dereceden koni esnekliği tekniği kullanılarak benimsenmiştir (Xue vd., 2022). Başka bir çalışmada ise EA şarjlarının dağıtım şebekesi güvenilirliği, gerilim düşümü, güç kaybı gibi etkilerinin getirdiği maliyetler temel alınarak EA şarjlarının optimal konumda olması gerektiği önerilmiş ve bu optimizasyonu sağlayabilmek için yapılan çalışmada evrimsel hesaplama metodu benimsenmiştir (Ahmaad vd., 2022). Bir çalışmada ise EA'ların günlük yük eğrisi üzerinde mevsimlerin etkilerini hesaba katmış ve düşünülenin aksine EA şarjının şebeke entegrasyonuna getirdiği zorluğun kış aylarındansa yaz aylarında daha fazla olduğunu sunmuştur (Nafi vd., 2022). EA'ların yoğun olduğu ilgili bölgelerde eş zamanlı çok sayıda EA şarjı ile şarj noktalarının ve transformatörlerin aşırı yüklenip yanması veya açması, gerilim düşümlerinin artması ve harmoniklerin oluşumu kaçınılmaz görünmektedir (Ucer vd., 2018). EA şarjları ile birlikte oluşacak olan yük talebinde güç sisteminin dengesi de etkilenecektir bu sebeple şebeke hattının bir bütün olarak çalıştığı göz ardı edilmemelidir (Das vd., 2020). Şarj istasyonlarının şebeke sistemine etkilerini azaltabilmek için şebeke sisteminin esnek çalışabilir hale gelmesi ve yük aktarımlarının yapılması gerektiği önerilmiştir (Liu vd., 2021). EA sayılarının artması ve piyasada rekabet edebilmeleri için dağıtım şebekesine entegrasyonundaki sorunları çözüme ulaştırmaları gerekmektedir (Araujo vd., 2021). Yine EA'ların şarjı, oluşacak aşırı harmoniklerle güç sisteminde potansiyel bir sorun teşkil eder (Staats vd., 1997). Aşırı harmonik akım bozulmasına sahip şarj sistemleri, ikincil dağıtım hattı ve transformatör değerinin düşmesine veya hizmet kalitesi sorunlarına neden olabilir (Bass vd., 2001).

Doğal olarak, dağıtım sistem operatörü hizmet sahasındaki koordinasyonsuz EA şarjının önüne geçebilmek ve potansiyel EA girişiminden sistem varlıklarını koruyabilmek için analizler gerçekleştirmelidir. Özellikle sistemin talebi kaldırabilme gücü ve gerilim düşümü gibi hesaplamalara göre elektriksel sistem varlıklarının belirlenen kriterleri aşmadan çalışabilmesine devam edebilmesi önem arz etmektedir. Düzgün bir sistem işletimi ancak analizler ve soruna yönelik stratejilerin geliştirilmesi ile sağlanabilir. Literatürde bazı çalışmalarda da görüleceği üzere şarj istasyonları üzerinden yapılan optimizasyon çalışmalarının dağıtım sisteminin daha güvenli, istikrarlı ve ekonomik çalışmasında önemli bir role sahip olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2019).

EA şarj ve deşarjını düzenleyen hem planlanma hem de işletimsel açıdan durumu ele alan birçok çalışma olduğu görülmüştür. Bir çalışmada EA'ların esnek yük olarak kabul edilmesi ve güç yönetimine katılımında şarj istasyonu üzerinden enerjinin ayarlanarak aracın şarj olabildiğini önerilmiştir (Diaz vd., 2018). Şarj istasyonlarının dağıtım sisteminde bulunan transformatör ömrüne etkisini inceleyebilmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda ise, transformatör ömrü ile şarj istasyonundan çekilen akımın toplam harmonik distorsiyonu ikinci dereceden bir bağıntıyla ortaya konmuş ve transformatör ömrünün azalmaması için toplam harmonik distorsiyon değerinin %25-30 bandında sınırlandırılması gerektiği ifade edilmiştir (Gomez ve Morcos, 2003; Xu vd., 2014; Lucas vd., 2015). Ayrıca toplam harmonik distorsiyon değerinin düşmesi için yapılan farklı bir analizde LCL(Endüktans-Kondansatör-Endüktans) filtre önerilmiş ve oransal olarak %30'dan fazla harmonik düşüşü görülebilmektedir (Güven ve Akbaşak, 2021). Başka bir çalışmada ise EA şarjının dağıtım sistemine etkilerinden olan güç faktörünün düşmesi ve akım harmoniklerinin oluşması kontrol edilebilir olmasına rağmen enerji verimliliğini artırırken olumsuz bir etki olarak maliyetleri arttıracığı ve sistemin daha da karmaşık hale gelmesi ile dağıtım sisteminin stabil kalabilmesi için çözüm olarak bir aktif güç sınırlandırılması getirilmesi gerektiği bu sınırı sağlayamayan EA şarj istasyonlarının ise kabul edilemez olması önerilmiştir (Berisha vd., 1996). Dağıtım sisteminde transformatör ömrü üzerine yapılan bir çalışmada ise EA şarj istasyonlarının transformatörler üzerinde yarattığı aşırı yüklenme ve yüklenme sonucu transformatörlerin termal ısılarının artmasının transformatör ömürlerini olumsuz etkileyeceği bu yüzden yüksek yalıtımlı dağıtım transformatörlerinin geleneksel dağıtım transformatörlerinin yerini alması önerilmiştir (Qian vd., 2021). Değişimin ve ilgili stratejilerin sadece dağıtım sistem tarafında yapılması yeterli olmayacaktır aynı şekilde EA şarj istasyonlarının seçimi konusunda da çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada EA şarj istasyonları türleri karşılaştırılmış ve dağıtım sistemine olan etkileri üzerinden PWM şarj istasyonun EA şarj istasyonları çalışmalarında sıklıkla tercih edilmesi gerektiği önerilmiştir (Bently vd., 2010).

- Yapılan bu çalışmada ise dağıtım sistem operatöründen alınan gerçek veriler ışığında ihtiyaca binaen kurulması planlanan şarj istasyonlarının güç sistemine etkileri detaylı analizler ışığında irdelenmiştir.
- Sistem operatörünün işletim sahasında bulunan ve şarj istasyonu altyapısı kurulabilecek belli noktaların şebeke varlıkları üzerinde neden olabileceği potansiyel değişimler tablo ve grafiklerle detaylandırılmıştır.
- Otopark işletmecisinden alınan gerçek araç verileri işlenerek farklı durum analizleri gerçekleştirilmiş ve geleceğe yönelik tavsiyeler sistem operatörü perspektifinden sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan dağıtım sisteminin tanıtılması, DigSILENT PowerFactory V15.1 ortamında gerçekleştirilen test ve analizlerin sonuçları ise 3. Bölümde anlatılmıştır. Elde edilen kapsamlı sonuçlar 4. Bölümde detaylı bir şekilde irdelenmiş ve sunulmuştur.

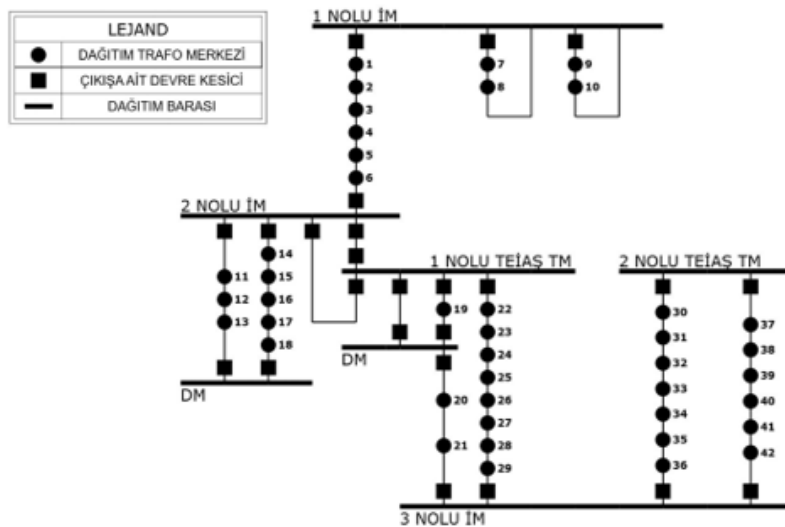
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada incelenen dağıtım sistemi, bölge özelliklerine ve yapısına göre değişmekle birlikte çoğunlukla dengeli yüklerin olduğu ring şebeke yapısına sahiptir. Ring şebeke yapısının sistem operatörüne sağladığı esneklikler arasında arızaların giderilme süresi ve arızadan etkilenen abone sayısının azalması yer almaktadır. Arıza noktasının tespit edilmesinden sonra arızalı envanterin ayrılıp abonelerin başka bir merkez üzerinden beslenmesi manevra talimatlarına göre yapılmaktadır. Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenen yönetmeliklere göre dağıtım sistem operatörlerinin tedarik sürekliliği performans göstergeleri bulunmaktadır. Bu performans göstergelerinden bir tanesi ortalama kesinti süresi göstergesi performans puanı (SAIDI) bir diğeri ise ortalama kesinti sıklığı göstergesi performans puanı (SAIFI) olarak belirlenmiştir (EPDK Kalite Faktörü, 2021).

Türkiye’de bulunan dağıtım sistem operatörlerinin arıza sayısının ve süresinin iyileştirilmesi kapsamında dikkat ettiği özelliklerden bir tanesi de uygun transformator seçimleridir. Genellikle yağlı ve kuru tip transformatorler tercih edilmektedir. Dağıtım sistem operatörüne ait çalışma yapılan bölgede çoğunlukla kuru tip transformatorler kullanılmaktadır. Kuru tip transformatorler yağlı tip transformatorlerle karşılaştırıldığında kısa devre önleme kabiliyeti, ısı dayanımı, mekanik ve elektriksel mukavemet gibi birçok özellik bakımından daha üstün performansa sahiptir. Bu performans üstünlükleri ile kurulum kolaylığı bakımından daha yaygın kullanılmaktadır (Ding ve Ning, 2012). Tüm bunların yanı sıra kuru tip transformatorlerin ısıl geçirgenliği yağlı tip transformatorlerden daha düşük olması sebebiyle transformator ömrünü ve performansını olumsuz olarak etkiler (Shaker, 2011; Rahimpour ve Azizian, 2007).

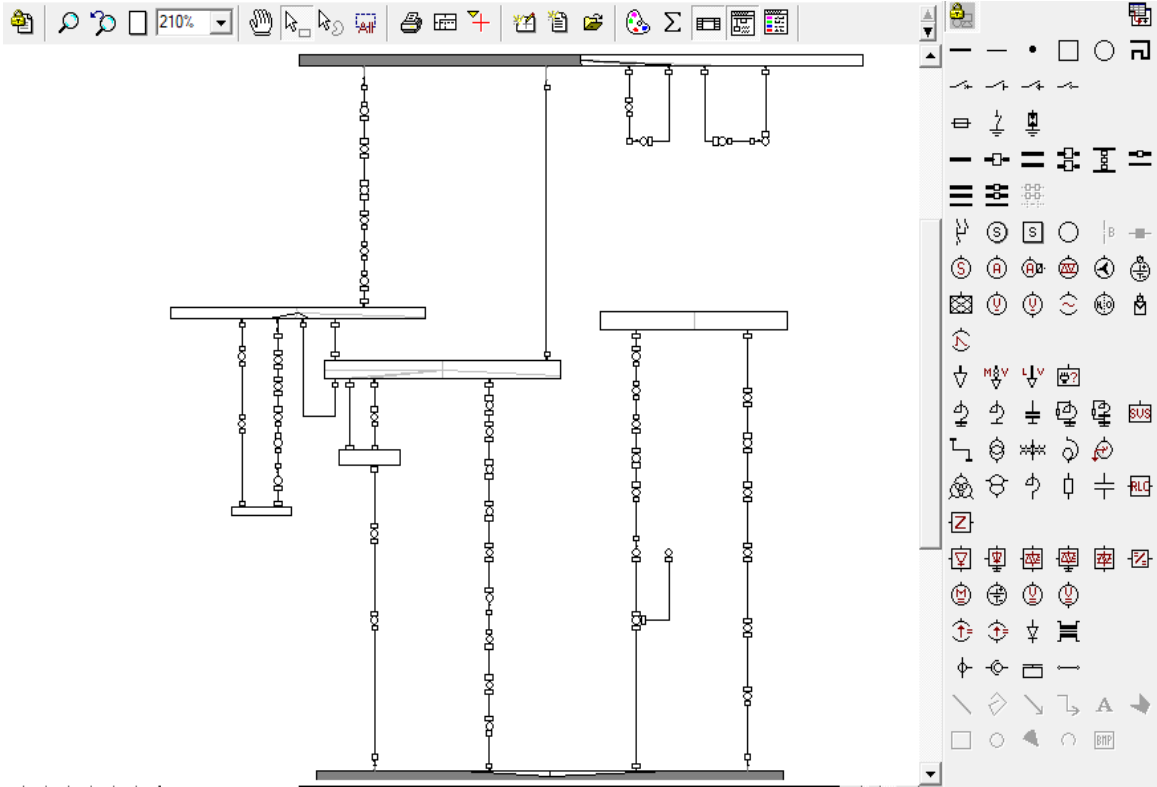
Bu çalışmada dikkate alınan dağıtım sisteminin ilgili bölgesine ait 34,5kV tarafı tek hat verisi Şekil 1’deki gibidir. Burada iletim sistemi yani TEİAŞ bağlantı noktaları görülmektedir. İndirici merkezler ile 34,5 kV seviyesindeki gerilim 10 kV seviyelerine getirilmektedir. Çalışma bölgesinde ilgili TEİAŞ merkezlerinden beslenen 42 adet transformator merkezi görülmektedir. Bu merkezlerde gerektiğinde manevra yapılarak besleme yönü değiştirilmektedir. 1 Nolu İndirici Merkezde toplamda 10 adet dağıtım transformator merkezi, 2 Nolu İndirici Merkezde 8 adet ve sırasıyla 1 Nolu TEİAŞ Transformator Merkezi ve 2 Nolu TEİAŞ Transformator Merkezinde ise 11 ve 13 adet dağıtım transformatorü çıkışları alınmıştır.

Bölge tek hattı ve transformator verileri DigSILENT PowerFactory V15.1 ortamında işlenmiş ve test edilmiştir. Kararlı hal, dinamik ve geçici hal modellemeler yapabilmek için uygun bir çalışma ortamı sunan ilgili program, elektrik güç sistemlerinde analizler yapmak amacıyla kullanılan bir mühendislik yazılımıdır. Elektrik güç sistemleri üzerinde yapılması zor ve karmaşık olan birçok analizi gerçekleştirmeye olanak sağlar. Yük akışı analizi, gerilim düşümü analizi, kısa devre analizi, kararlılık analizi, harmonik hesaplamaları, mesafe ve aşırı akım zaman koruma, optimal yük akışı ve güvenilirlik analizlerini yapabilmektedir. Bu çalışmada ise detaylı güç akışı analizleri ilgili programın arka planında çalışan Newton-Raphson yaklaşımıyla sağlanmıştır.



Şekil 1. Çalışma Bölgesindeki Dağıtım Merkezleri ve İletim Sistemi Bağlantılarına Ait Tek Hat Gösterimi (Single Line Display Of Distribution Centers and Transmission System Connections In The Study Area)

PowerFactory V15.1 ortamına aktarılmış olan dağıtım sisteminin ara yüzü Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Ekranın sağ kısmında yer alan editör bölgesinde transformatörler, bağlantı elemanları gibi elektrik devre componentleri yer almaktadır. Akım, gerilim ölçümleri de buradaki yapılar kullanılarak sağlanabilmektedir.



Şekil 2. Çalışma Bölgesine Ait Tek Hat Diyagramının DigSILENT PowerFactory ortamında Modellenmesi (Transfer Of The Review To The DigSILENT PowerFactory V15.1 Program)

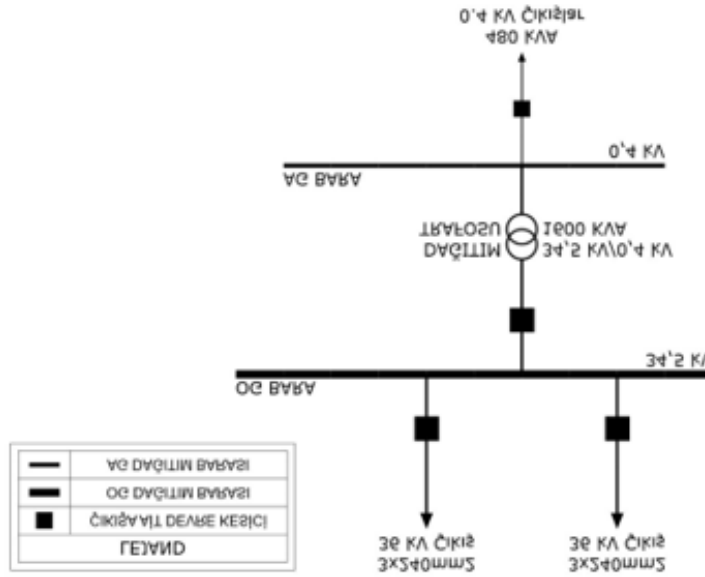
Şekil 1’de tek hat gösterimi verilen sistemin DigSILENT ortamında detaylı modellenmesi sağlanmıştır. Transformatör merkezleri gerçek veriler ışığında programa aktarılmıştır. İlerideki bölümlerde kapsamlı olarak veri girişleri ve elemanların özellikleri tartışılacaktır.



Şekil 3. Çalışma Bölgesinde Bulunan 34,5/0,4 kV Gerilime Sahip Transformatörün DigSILENT PowerFactory Programında Veri Girişinin Yapılması (Transfer Of Transformer Parameters To The DigSILENT PowerFactory)

Çalışılan bölgedeki sistem varlıklarına ait elektriksel parametreler Şekil 3'te gösterildiği gibi benzetim ortamına aktarılabilir. Burada örnek olarak çalışma bölgesindeki 35 kV primer gerilimi ve 8000 kVA görünür güce sahip transformatörün özellikleri tanımlanmıştır. 50 Hz şebeke frekansında çalışan bu üç fazlı transformatörün kısa devre anındaki gerilim değişimi değerlerine de ilgili şekilden ulaşılabilmektedir. Veri girişi ve/veya değişikliğinin yapılabileceği bu ara yüz ile farklı durum analizleri gerçekleştirilebilir. Dağıtım sistem operatörünün yönettiği tüm alanda veya istenildiği takdirde seçilen belirli bir bölümde de yük akışı analizi yapılabilir.

Bu bilimsel çalışmada, Türkiye'nin en yoğun semtlerinden biri dikkate alınmış ve sonuçlar detaylandırılmıştır. Şekil 4'te EA bağlantısının yapılacağı transformatör merkezine ait dağıtım sistem modeli görselleştirilmiştir. EA bağlantısı gerçekleştirilmeden önce ilgili çalışma bölgesindeki güç akışı analiz sonuçları OG barası, AG barası ve transformatör için alınmıştır. İlgili transformatör merkezinden beslenen mevcut yük 792 kW aktif güç, 112,85 kVar reaktif güç ve 0,99 güç faktörüne sahiptir. EA bağlantısının yapılacağı 0,4 kV AG barada aktif ve reaktif güç herhangi başka bir yük olmadığından dolayı mevcut yükün değerleri ile aynıdır. Yapılan yük akışında AG barada %2,2, OG barada ise %1,5 gerilim düşümü ölçülmüştür.



Şekil 4. EA Bağlantısının Gerçekleştirileceği Dağıtım Merkezinin Tek Hat Gösterimi (Single Line Diagram of The Distribution System for EV Connection)

Şebeke modelinde EA bağlantısının yapılacağı YXYX isimli transformatörün akış sonucu mevcut elektriksel değerleri Tablo 1'de ifade edildiği gibidir. 1600 kVA görünür güce sahip ilgili transformatörün yüzde gerilim düşümü ve kısa devre gerilim değerleri sırasıyla 3,94 ve 6 olarak verilmiştir.

Tablo 1. EA Bağlantısının Gerçekleştirileceği Transformatörün Elektriksel Özellikleri (Electrical Characteristics Of The Transformer For EV Connection)

PARAMETRELER	TRANSFORMATÖR YXYX
GÖRÜNÜR GÜÇ	1600 KVA
FREKANS	50 Hz
GÜÇ FAKTÖRÜ	0,98
GERİLİM SEVİYESİ	34.5/0.4 kV
GERİLİM DÜŞÜMÜ	%3,94
KISA DEVRE UK	6

Çalışma bölgesindeki YXYX numaralı transformatör merkezinden beslenmesi beklenen ilgili otoparkın özellikleri Tablo 2'de ifade edildiği gibidir. Hali hazırda bu otopark, 790 araç kapasiteli, sözleşme gücü 620 kW, 24 saat hizmet veren ve turistik bölge olduğundan nüfus olarak yoğun bir otopark tipidir. Doğal olarak araç sirkülasyonunun yüksek olduğu bu otopark için yapılan analizler benzeri yapıdaki diğer otoparklara uygulanabilir haldedir.

Tablo 2. Çalışmada Dikkate Alınan Otoparkın Genel Özellikleri (General Features Of The Parking Area Considered In This Study)

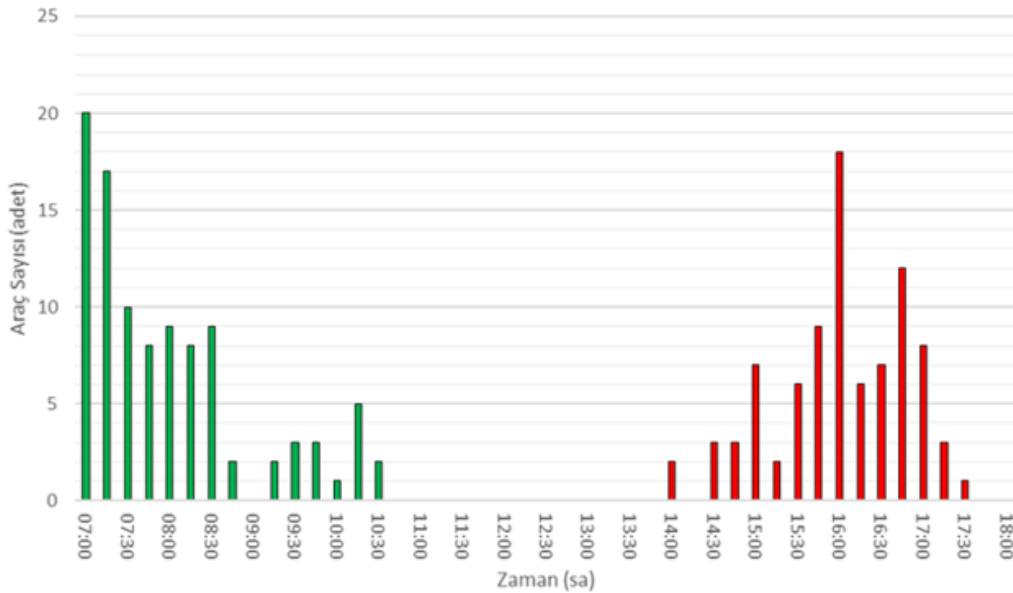
XY Otopark	
ARAÇ KAPASİTESİ	790
SÖZLEŞME GÜCÜ	620 kW
OTOPARK TİPİ	Açık
ÇALIŞMA SAATLERİ	24 Saat

Otopark işletmecisinin araç kapasitesine ve sistem operatörünün müsaade ettiği sözleşme gücüne göre 20 adet AC şarj istasyonu kurulumu yapabileceği öngörülmüştür. İlgili şarj istasyonunun özellikleri Tablo 3'te verilmiş olup burada 22 kW güçle araçların şarj edilebilmesi mümkündür. Nominal gerilim değeri 400 V mertebesinde olan bu şarj istasyonunda 2 adet soket bulunmaktadır. Maksimum besleme akımı ise 32 A mertebesindedir. Çalışmanın yapılacağı sisteme ise bu şarj istasyonlarından kurulduğu varsayılmıştır.

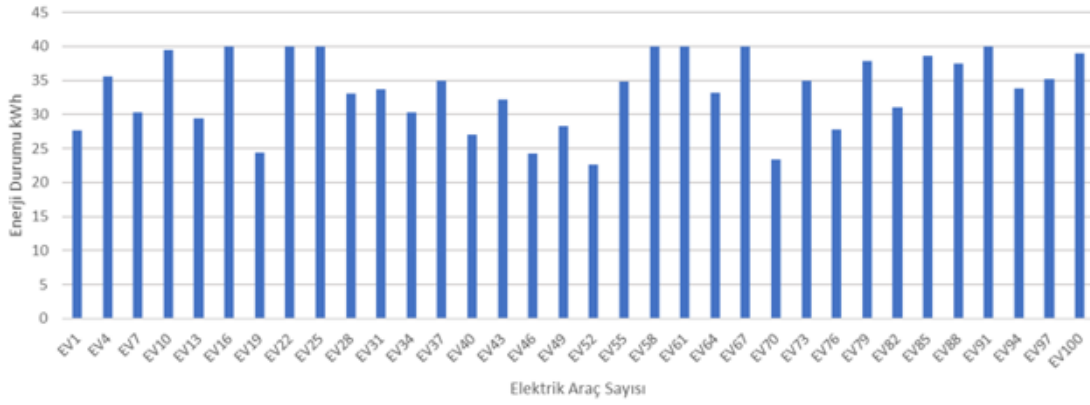
Tablo 3. Çalışmada Dikkate Alınan Şarj İstasyonuna Ait Özellikler (Features Of The Charging Station Considered In This Study)

SERİ	EVLINK
ÜRÜN ADI	EVlink Parking
MONTAJ TİPİ	Dikili
NOMİNAL GERİLİM	230 V AC 50/60 Hz Kontrol Devresi 380..415 V AC 50/60 Hz Güç Devresi
SOKET SAYISI	2
MAKSİMUM BESLEME AKIMI	32 A
MAKSİMUM GÜÇ	22 kW

Farklı bir bölgede bulunan otopark işletmecisinden alınan gerçek araç verileri işlenmiştir. 100 tane EA'nın otoparka geliş ve gidiş zamanının dağılımı Şekil 5'deki gibidir. İlgili şekilde görüldüğü üzere araçlar saat 07:00'dan itibaren otoparka giriş yapmaktadır. Yoğunluklu olarak günün ilk saatlerinde otoparka varan araçların otoparktan ayrılışı ise saat 14:00'da başlayabilmektedir. Özellikle akşam saatlerinde yani 16:00-17:00 aralığında araç gidişlerinin artış gösterdiği söylenebilir. EA'ların güç sistemine etkisi irdelenirken mobileden kaynaklı belirsizliklerin dikkate alınması önem arz etmektedir.

**Şekil 5.** Çalışmada Dikkate Alınan EA'ların Otopark Alanına Geliş Gidiş Saatleri (Arrival And Departure Times Of EVs To The Parking Area)

Araçların şarj olmaya başlamadan önce yani otoparka vardıklarındaki enerji durumları ise Şekil 6'da görselleştirilmiştir. En düşük enerji durumu seviyesi 22 kWh, en yüksek enerji durumu ise 40 kWh'tir. Araçların gidiş-geliş zamanlarındaki belirsizliğin yanı sıra EA şarj istasyonundan talep edilecek gücün de belirsizliği böylelikle çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. 100 adet aracın hepsinin verileri yerine seçilen bazı araçlar detaylandırılmıştır.



Şekil 6. Çalışmada Dikkate Alınan EA'ların Başlangıçtaki Enerji Durumu (Initial State Of Energy EVs)

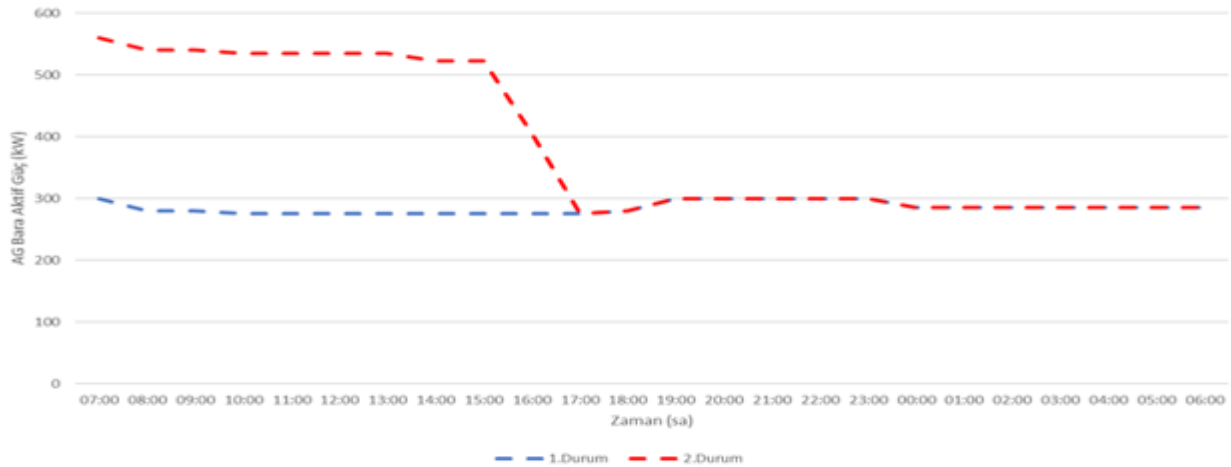
Dikkate alınan EA'ların teknik özelliklerinin Tablo 4'deki gibi olduğu ve aynı özellikteki araçların otoparkta şarj olduğu varsayılmıştır. Maksimum enerji durumunun 50 kWh, minimum enerji durumunun 10 kWh olduğu bu araçlar 6 kW güçle şarj/deşarj edilebilmektedir. Aracın verimi ise 0,95 olarak işlenmiştir. Ayrıca park alanından ayrılacak aracın en az %85 seviyesinde enerjiye ulaşması kısıt olarak eklenmiştir.

Tablo 4. Çalışmada Dikkate Alınan EA'ların Teknik Özellikleri (Technical Specification Of EVs Considered In This Study)

EA (1-100)	
MAKSİMUM ENERJİ DURUMU	50
MİNİMUM ENERJİ DURUMU	10
ŞARJ GÜCÜ	6 kW
ŞARJ VERİMİ	0,95

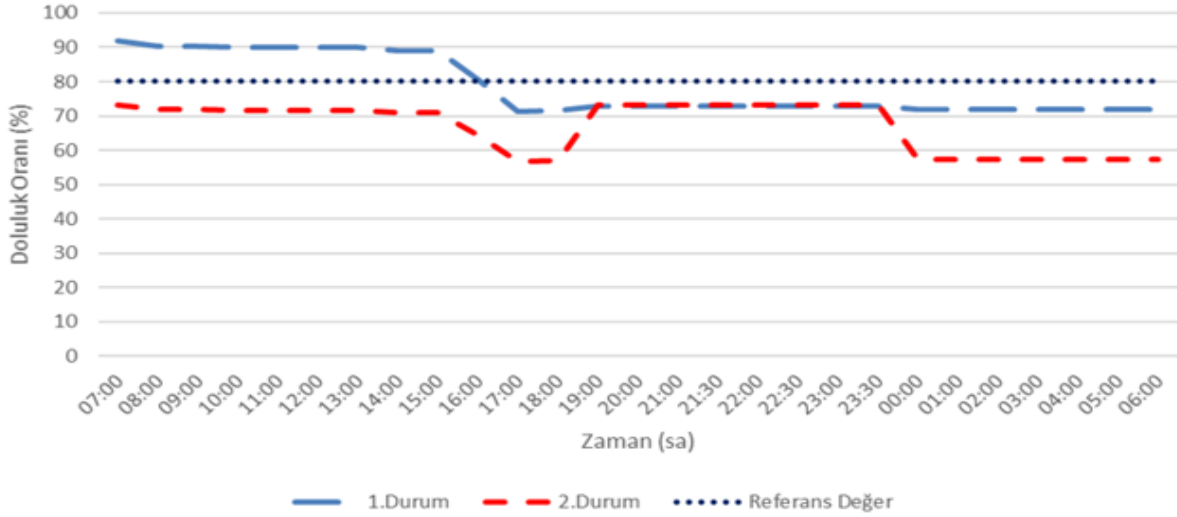
4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Dağıtım sisteminin AG barasından bağlanması düşünülen otopark alanının 100 tane EA'yı şarj etmesi ve belirlenen %85 sınırında enerji durumuna ulaştırması durumunda araçların dağıtım sistemine olan etkileri bu bölümde detaylandırılacaktır. Benzetim çalışması 24 saatlik bir zamanda ve 15 dakikalık zaman aralığında elde edilmiştir. EA bağlantısının yapılmadığı ilk durum analizinde ilgili otopark alanının ve mevcut AG yükün AG baradan çekilen aktif güç Şekil 7'de 1.durum olarak, EA bağlantısı yapıldığında AG baradan çekilen aktif güç ise 2.durumda yük akışı analizi sonucunda karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İkinci durumda EA bağlantısı ile birlikte yükün yoğun saatlerde neredeyse iki katına çıktığı görülebilmektedir. Çünkü bu saatlerde otoparka gelen ve dolayısıyla şarj istasyonundan talep edilen güçte ciddi artış yaşanmaktadır. Neredeyse iki katına çıkan talebin merkezden beslenmesi güç sistem varlıkları üzerinde olumsuz bir etkiye neden olabilir. Bu etkiyi dikkate alacak şekilde planlamanın yapılması ve böylece yaşanma ve diğer arızaların önüne geçilmesi hedeflenmelidir. Saat 07:00'da başlayan araç şarjı saat 17:00'a kadar sürmekte ve sonrasında iki durum analizinin sonuçları aynı noktada kesilmektedir.



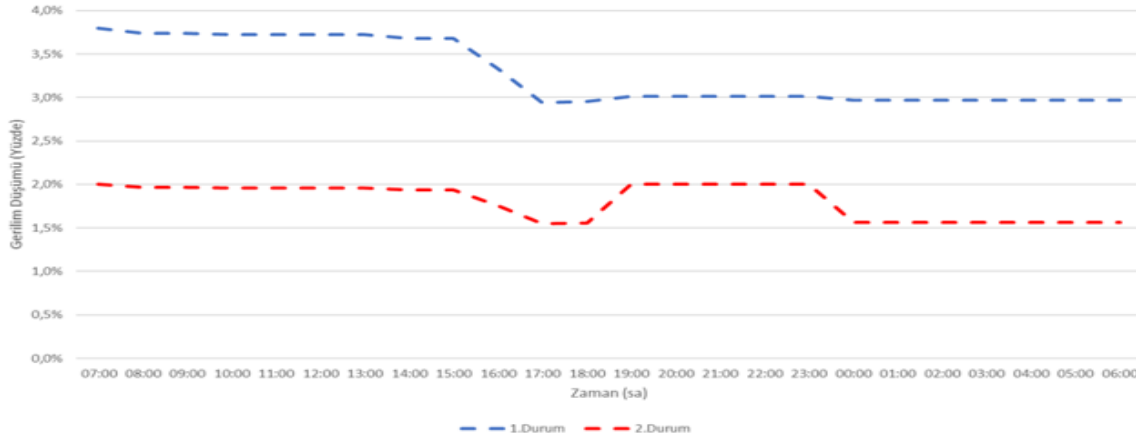
Şekil 7. EA Bağlantısı Yapılmadan Önce ve Sonra AG Barasının Aktif Güç Analizi (LV Bus Active Power Analysis Before And After EVs Connection)

Dağıtım sisteminde transformatörlerin % 80'den daha fazla yüklenmesi istenmediği için sınır değeri %80 olarak belirlenerek mevcut transformatör gücü üzerinden yüklenme oranları yük akışı analizi sonucunda belirlenmiştir. Şekil 8'de 1.Durumda bir günlük benzetim sonucunda transformatörün yüklenmesi ve %80'lik band gösterilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere özellikle sabah saatlerinde, transformatörün yüklenmesinin %80 değerinin üzerinde ya da çok yakınında olduğu gözlenmiştir. Çünkü belirtilen saat aralığında araçlar otoparka giriş yapmakta ve çıkış saatine kadar şarj edilmektedir. Doğal olarak şarj işleminin gerçekleştiği zamanlarda aşırı yüklenmeler ve pik talep oluşumu meydana gelmiştir. Sistemi bu şekilde işletmek transformatörün aşırı yükten açmasına ve dağıtım sistem operatörlerinin uygulamakla yükümlü olduğu Kalite Faktörü Yönetmeliği Uygulaması Usul ve Esaslarına göre tedarik sürekliliğini sağlayamamasına sebep olacaktır. İkinci durum analizinde ise transformatörün gücünün yükseltilmesi ve böylece talebin karşılanması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, mevcut transformatör gücünün 1,25 katı olacak şekilde 2000 KVA görünür güç değerine sahip transformatör analizlerde dikkate alınmıştır. DİGSILENT PowerFactory V15.1 ortamında elde edilen günlük transformatör yüklenmesi ve %80'lik band Şekil 8'deki 2.durum gibi elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 8. Mevcut Transformatör Gücü Doluluk Oranı ile 1,25 Katı Transformatör Gücü Doluluk Oranı Karşılaştırması (Comparison Of Current Transformer Power Occupancy Rate With 1.25 Times Transformer Occupancy Rate)

EA'ların dağıtım sistemine etkilerinden biri olan gerilim düşümüne ait analiz sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. 1.durum analizinde mevcut transformatör gücü ile EA bağlantısının yapıldığında transformatörün AG barasında meydana gelen gerilim düşümü, 2.durum analizinde ise mevcut transformatör gücünün 1,25 katı ile meydana gelen gerilim düşümü karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Gerilim düşümü bir şebekede kayıpları ifade edebilir ayrıca cihaz hasarlarına sebebiyet verebilir bu bakımdan dağıtım sistem operatörleri tarafından AG barada gerilim düşümünün her zaman %3'ten düşük olması istenir. Mevcut yükte EA bağlantısı ile gerilim düşümü oldukça yükselmiş ve bu da hem işletilen şebekede kayıplara hem de son kullanıcı olan tüketicinin cihazlarında hasarlara neden olacaktır. Transformatör gücünün yükselmesi ile AG baradaki gerilim düşümü %3 seviyesinden aşağı düşmektedir ve daha sağlıklı bir şebeke için imkân tanımaktadır.



Şekil 9. AG Barada Mevcut Transformatör Gücü Gerilim Düşümü İle 1,25 Katı Transformatör Gücü Gerilim Düşümü Karşılaştırması (Comparison Of Current Transformer Power Voltage Drop And 1.25 Times Transformer Power Voltage Drop In LV Bus)

Sonuçlar irdelendiğinde, transformatör gücünün 2000 kVA değerine çıkartılması ile transformatör yüklenme oranları ve gerilim düşümü ciddi oranda azalmış ve günlük çalışma periyodunda bu değer %80'in ve %3'ün altında seyretmiştir. İki durum analizi kıyaslandığında yüksek güçlü transformatörün ilgili otopark işletmecisi için tercih edilmesi gerektiği ifade edilebilir. Öte taraftan, düşük güçlü transformatör gücünün dikkate alındığı durumda şarj istasyonunun 24 saat boyunca talebinin 120 kW bandında olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, seçilen şarj istasyonu ortalama bir istasyon olup daha hızlı ve güçlü DC şarj istasyonları kullanıldığında yüksek güçlü transformatörün dahi yeterli olmayacağı aşıkardır. Ayrıca çalışılan bölgenin nüfusunun dinamik ve artma eğiliminde olduğu göz önünde bulundurulursa sadece şarj istasyonlarının ya da araç sayısının %5 arttığı bir senaryoda yine yüksek güçlü transformatörün gücünün talebi kaldırmaya yeterli olmayacağı öngörülmektedir. Yani kısa vadede çözüm sunan transformatör gücünün artırılması seçeneği ilerleyen zamanlarda yetersiz kalacak ve dağıtım sistem operatörlerinin farklı stratejiler geliştirmesinin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapılan detaylı analizler sonucunda EA'ların hatlardaki ve transformatörlerdeki yüklenmelerin ciddi oranda arttığı ve sınırların üzerine çıktığı gösterilmiştir.100 aracın otopark bölgesine geldiği durumda bağlı olan transformatör merkezinin 1,25 katına çıkarıldığı hali karşılaştırılmıştır ve düzgün işletim için transformatör gücünün 1,25 katına çıkarılması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. İlk senaryoda yani transformatör gücünün 1600 kVA olduğu durumda en yüksek transformatör yüklenmesinin sabah saatlerinde %91,93 seviyesinde olduğu yani dağıtım sistem operatörünün belirlediği %80 dolulukla çalışma bandını geçtiği görülmüştür aynı zamanda en yüksek gerilim düşümünün %3,75 seviyesinde olduğu ve operatörün belirlediği maksimum %3 gerilim düşümünü de aştığı görülmüştür. Aynı parametreler transformatör gücünün 2000 kVA olduğu durumda ölçüldüğünde en yüksek transformatör yüklenmesinin sabah saatlerinde %73,16 seviyesinde, gerilim düşümünün ise en yüksek %2 seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu sayede transformatör gücünün artırılması ile yaşlanma maliyetlerinin azalacağı ön görülmüş. Hem artan nüfustan hem de EA'ların sayısının gün geçtikçe aratacağı bunun gibi analiz çalışmalarının da artması gerektiği sonucunu doğurmaktadır. Bu konuda dağıtım şebekeleri bir plan yapmalıdır. Bu çalışmalardan en kolay transformatör gücünün artırılması gibi görünse de bu çözümde ilerleyen zamanlarda maalesef yeterli olmayacaktır. Çalışmanın incelendiği otopark işletmecisi gibi toplu elektrik şarj istasyonu kurulacak bölgelere ait bir transformatör tesis edilebilir ancak bu da çalışmanın yapıldığı bölge gibi alanın yeterli olmadığı sıkışık ve kalabalık semtlerde transformatör tesisi için uygun alanın bulunması konusunda zorluk çıkaracaktır. Dağıtım sistem operatörleri çözüm önerisi olarak tesis edeceği merkezin konumu ve alanını, anlaşma yapacağı otopark sahiplerinin bulmasını veya kendi alanlarından bir kısmını ayırmasını isteyerek ilerletebilir. Tüm bu sonuçlar ışığında EA popülasyonunun artmasında birinci dereceden etkilenecek olan dağıtım sistem operatörlerinin geleceğe yönelik planlar ve analizler yapmasını kaçınılmaz kılacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahmad F., Iqbal A., Ashraf I., Marzband M., Khan I., 2022. Placement of Electric Vehicle Fast Charging Stations using Grey Wolf Optimization in Electrical Distribution Network. 2022 IEEE International Conference on PowerElectronics, Smart Grid, and Renewable Energy.
- Araujo A., Araujo D., Vasconcelos A., Rosas P., Medeiros L., Conceicao J., 2021. A Proposal for Technical and Economic Sizing of Energy Storage System and PV for EV Charger Stations with Reduced Impacts on the Distribution Network. CIRED 2021 Conference.
- Arnold, M., Provan, S., 2019. German industrial output fall exacerbates fears of recession. Financial Times.
- Bass, R., Harley, R., Lambert, F., Rajasekaran, V., & Pierce, J., 2001. Residential harmonic loads and EV charging. In: Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Volume 3, 803-808.
- Bentley E. C.; Suwanapingkarl P.; Weerasinghe S.; Jiang T.; Putrus G. A.; Johnston D.,2010. The interactive effects of multiple EV chargers within a distribution network.
- Berisha, S., Karady, G., Ahmad, R., Hobbs, R. and Karner, D., 1996.Current Harmonics Generated by Electric Vehicle Battery Chargers. Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, New Delhi, 8-11 January 1996, 584-589.
- BP Statistical Review of World Energy, 2021.
- Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S., & Tan, C. W. (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid Integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, Article 109618. <https://doi:10.1016/j.rser.2019.109618>
- Diaz, C., Ruiz, F., & Patino, D., 2018. Smart Charge of an Electric Vehicles Station: A Model Predictive Control Approach. In: Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 54-59

- Enerji Atlası, 2022. Türkiye'deki Elektrikli Otomobil Sayıları (<https://www.enerjiatlası.com/haber/turkiye-deki-elektrikli-otomobil-sayısı>)
- EPDK, Kalite Faktörü Uygulaması, 2021. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-283/kalite-faktoru-uygulamasina-iliskin-usul-ve-esas>
- European Commission, 2019. Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal [Online].
- European Green Deal, 2019. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf.
- EPDK, Kalite Faktörü Uygulaması, 2021. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-283/kalite-faktoru-uygulamasina-iliskin-usul-ve-esas>
- Gómez, J. Carlos, Morcos, Medhat M., 2013. Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems 2013. IEEE.
- Güven A.F, Akbaşak S.B., 2021. Elektrikli Araçlarda DA hızlı Şarj Ünitelerinin Şebeke Altyapısına Etkilerinin İncelenmesi. International Energy Agency, 2022. Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales, Leonardo Paoli, Clean Energy Technologies analyst Timur Gül, Head of the Energy Technology Policy Division Commentary.
- Koç Medya, 2021. <https://www.koc.com.tr/medya-merkezi/haberler/2021/turkiyenin-en-buyuk-yatirimi-yine-ford-otosandan>.
- Liu Yanping, Li Xin, Liang Yi, Shunqi Zeng, 2021. Assessment of Impacts on Integration of Disorderly EV Charging Load to Flexible Distribution Network. 2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering.
- Lucas Alexandre, Fausto Bonavitacola, Evangelos Kotsakis, Gianluca Fulli, 2015. Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging, Electric Power Systems Research, Volume 127, 2015, Pages 13-21.
- Nafi Mahmud I., Tabassum S., Hassan Rafid Q., Abid F., 2022. Effect of Electric Vehicle Fast Charging Station on Residential Distribution Network in Bangladesh. IEEE 2021 2021 5th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) Military Institute of Science and Technology (MIST), Dhaka-1216, Bangladesh
- Rahimpour E., Azizian D., 2006. Analysis of temperature distribution in castresin dry-type transformers, Electr Eng (2007), pp.301-309, April 2006.
- Sanal Savunma TOGG, 2022. <https://www.sanalsavunma.com/togg-2022-yili-sonunda-seri-uretim/>
- Sen Qian;Xiaojing Zhang;Chuan Chen;Hongkang Wang;Jinghong Guo;Yang Xu., 2021. Ageing Evaluation of the Distribution Transformer under Varying Load due to Electric Vehicle Charging.
- Shaker 隼 Yomna O., 2011. Sensitivity Study of Transient Temperature of Cast-Resin Dry Type Transformer. Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on, 15-17 Nov. 2011.
- Staats, P. T., Grady, W. M., Arapostathis, A., & Thallam, R. S., 1997. A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers. IEEE Transactions on Power Delivery, 12(3), 1258-1266.
- Ucer, E., Kisacikoglu, M. C., & Cafer Gurbuz, A. (2018). Learning EV Integration Impact on a Low Voltage Distribution Grid. In: Proceedings of the 2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5. doi:10.1109/PESGM.2018.8586208
- Wang Lu;Wan Youhong;Weitao Cao;Chunxia Fan, 2019. Chinese Automation Congress (CAC). Optimizing Strategy of Spatial Orderly Charging for EVs Based on Complex Network Theory.
- Xu Y., Chen Z., Peng F. and Beshir M., 2014. Harmonic analysis of electric vehicle loadings on distribution system. 2014 IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2014, pp. 145-150.
- Xue Ping;Xiang Yue, Shafie-khah Miadreza, Zhou Run, 2022. Robust Joint Planning of Electric Vehicle Charging Infrastructures and Distribution Networks. IEEE Conference Paper.
- Xueqian Ding;Wang Ning, 2012. Analysis of the Dry-type Transformer Temperature Field Based on Fluid-solid Coupling. Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control.



CONCEPTUAL DESIGN OF A TRANSPORT MACHINE FOR CONVEYING BALL-LIKE MATERIAL

Zeynep PARLAR*

Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Turkey

Keywords

*Systematic Design,
Continuous Transport,
Ball-Like Material,
Requirements List.*

Abstract

Conveying of granular material in the manufacturing process is quite common. The transport system design directly affected by the properties of the material and the transport conditions. Grainy materials can be transported not only by mechanical methods such as belt, screw, bucket and so on but also by pneumatic and hydraulic systems. It is a general requirement for the conveying equipment to allow both horizontal and vertical conveying to be able to transport the material with minimum energy cost. The main goal of this work is to design a special machine which transports ball-like materials from one source to another. The well-known systematic design approach is used to reach the optimum design satisfying design constraints. This design process includes clarify the task (problem definition), conceptual design (establish solution principles), embodiment design (achieve concept variants and selection) and detail design of selected variant. In present study, by following systematic design approach, a transport machine with a rotary plate was designed.

KÜRESEL FORMDA MALZEME TAŞIYAN BİR TRANSPORT MAKİNASININ KAVRAMSAL TASARIMI

Anahtar Kelimeler

*Sistematik Konstrüksiyon,
Sürekli Transport,
Küresel Malzemeler,
İstekler Listesi.*

Öz

İmalat sürecinde granül malzemenin taşınması oldukça yaygındır. Taşıma sistemi tasarımı, malzemenin özelliklerinden ve malzemenin taşıma koşullarından doğrudan etkilenir. Granül haldeki malzemeler sadece kayış, vida, kova vb. mekanik yöntemlerle değil, pnömatik ve hidrolik sistemlerle de taşınabilmektedir. Malzemenin minimum enerji maliyeti ile taşınabilmesi için taşıma sisteminin hem yatay hem de dikey taşımaya izin vermesi genel bir gerekliliktir. Bu çalışmanın temel amacı, bilye benzeri küresel formdaki malzemeleri bir haznedeki alarak belirli uzaklıktaki diğer bir hazneye taşıyan özel bir makine tasarlamaktır. Bu amaçla sistematik konstrüksiyon yaklaşımı kullanılarak farklı konsept çözümler araştırılmıştır. Sistematik konstrüksiyon yaklaşımı, tasarım kısıtlamalarını karşılayarak en uygun tasarıma ulaşmakta kullanılan en iyi yöntemdir. Bu tasarım süreci, ödevin açıklık kazanması (problem tanımı), kavramsal tasarımı (çözüm ilkelerini oluşturma), çözüm önerilerinin oluşturulması (alternatif tasarımlar ve seçimi) ve seçilen alternatifin detaylı tasarımını içerir. Sunulan çalışmada, sistematik konstrüksiyon süreci izlenerek dokuz farklı çözüm oluşturulmuş, fayda değer analizi sonucunda ödevi en iyi şekilde yerine getiren döner plakalı özel bir taşıma makinesi tasarlanmıştır.

Alıntı / Cite

Parlar, Z., (2022). Conceptual Design Of A Transport Machine For Conveying Ball-Like Material, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1243-1250.

* İlgili yazar / Corresponding author: parlarze@itu.edu.tr, +90-212-293-1300

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Z. Parlar, 0000-0003-0010-8866	Başvuru Tarihi / Submission Date	07.04.2022
	Revizyon Tarihi / Revision Date	17.06.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	06.07.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

Automation of many processes in various industrial fields such as, military, food and beverage, electronics, manufacturing, materials handling etc. is very common in today's industry. Correspondingly, transport of a product or semi-product from on site to another with reliable and quick way gains importance. In the case of a liquid or a gas, it is possible to use piping systems to transport these fluids to where these are required. But in the case of solid granular materials having certain geometry and dimensions, the task is not as easy as it looks.

The review of industrial application reveals that the need for transportation of ball-like materials from sport goods to food is very common. For example, in the case of tennis or golf balls, the ball-like materials should be transported not only in sports activities, but also in production process (Langer et al., 2007; Sawallich, 1998). Furthermore, in food and beverage industry, products are packed after many processes from harvesting to final market. At the same time, sizes and rigidity of each food can be different. These food products either can be directly sorted to various sizes or can be transported to produce fruit juice etc. (Carroll, 1984; Altman et al., 1978). Another application in machine industry is the manufacturing and mounting of balls of rolling element bearing (Chang, 2006; Tsuchimochi et al., 2015; Wijngaarden, 2004). As mentioned above, since the physical properties and manufacturing need of materials change depending on specific application, a transportation solution is required in order to move ball-like semi-products from one station to another.

In this paper, it is aimed to design a new transport machine to be used in the conveying of spherical semi-products using a systematic design approach. In order to reach all possible solutions, the given task should be defined very well. For this reason, the design requirements of the given task were determined and the physical principles that could be used to developing various solutions are listed. Then, three different concept design solutions were obtained. After that, the selection process of optimum design based on technical and economical evaluation was carried out. In conclusion, detailed design of optimum solution is presented.

2. Systematic Design Approach

The Industrial Revolution in the 19th century caused the acceleration of mechanization. As a result, sufficient strength, sufficient hardness, low wear and friction, ease of use, ease of manufacture and assembly began to gain importance in machine design (Redtenbacher; 1859). The optimum design solution that meets these demands can only be obtained by methodical approach. The idea of systematic design first put forward in early 1900's (Erkens, 1928), and the efforts for implementing this idea to design activities gained importance after World War II. (Kesselring, 1942; Tschochner, 1954; Niemann, 1975; Matousek, 1957; Leyer, 1963; Pahl et al., 2007; Kroes, 2002; Haik et al., 2011). Nowadays It is widely used in industrial applications as an innovative design approach (Parlar et al., 2017; Börüklü et al., 2017; Börüklü et al., 2018; Bozdemir et al., 2001; Şekerciöglü, 2019). The systematic design approach is a very effective method to embody the design and production process. It provides both original and reusable solutions with a step-by-step study. In this way, solution principles are embodied step-by-step by separating the technical system into as simple sub-systems as possible, making it possible to achieve and optimize the solution with a smaller amount of effort in the early stages of the design.

There are several suggested systems which vary in detail but are basically similar (Pahl et al., 2007; Koller, 1979; Roth, 1982; Anon., 1987). The basic process consists of four steps. In the first step, the task is defined. In conceptual design, a function structure is obtained and solution principles are searched according to the requirements list. Afterwards, preliminary layout is performed and evaluated based on technical and economic criteria during embodiment design stage. Finally, detail design is completed with detail drawings and production documents.

3. Task Clarification

In the systematic design approach, the problem is discussed in its most general form. Thus, it allows to obtain solution methods more easily by looking at the problem from a wider perspective. In this study, the problem is defined as follows "Ball-like material will be transported from source container which is full of these elements to an empty container which is at least 500 mm far away from the source".

According to G. Pahl and W. Beitz (Pahl et al., 2007), in order to reach the most appropriate solution, the requirements list should be first prepared that clearly sets out the design expectations. When preparing the requirements list, the all demands from costumers should be taken into account. Dimensions, geometric forms and related standards should be clearly defined. It is obvious that these requirements are necessary for the conceptual design process. These requirements can be flexed or modified as needed during the later stages of the design. Emerging requirements should be defined either as demands that must be taken into consideration for all circumstances or wishes that can be fulfilled to the extent permitted by the technological and economic conditions. Requirement list of the problem is given in Table 1.

Table 1. Requirements List

Demands	
1	Materials to be transported are ball-like parts having maximum 10 mm in diameter
2	Ball-like materials will be placed on a standard container.
3	Ball-like materials can be captured from the container in all possible ways.
4	Depth of the container is maximum 200 mm.
5	Ball-like materials will be transported to target container at least 500 mm far away from the source container.
6	During the transport ball-like materials should be sorted regarding their sizes
7	There is no material restriction for ball-like elements.
8	There should be no discontinuity during transportation.
9	The total cost of the system should be lower than 10 000 \$
Wishes	
1	Remote control may be applied to system
2	Mobility of the system is desirable.
3	Automatic stop for empty container may be considered.

4. Conceptual Design

The systematic design approach is always based on a gradual progression from the abstract to the concrete in line with a goal. For this reason, the requirements list consisting should be reduced to the level defined as "basic principle" or "basic function" by abstracting as much as possible without losing its essence. The term *function* can be used to describe the intended input/output relationship of a system. Thus, the function becomes a concise form of the task, independent of any specific solution. If the overall task has been clearly defined then it is possible to specify the *overall function*. In this study, the overall function is *transportation ball-like material one source to another*.

The overall function is still in its most abstract and complex form. In order to achieve a more non-figurative structure, the first step to be put forward is to define the overall function by dividing it into sub-functions. Therefore, at this stage, it can be said that the design activity is at the intellectual level. It is tried to reach a solution step by step by separating the technical system into simple subsystems as much as possible. It is possible to continue this analysis step by step and go down to the simplest sub-functions, which are no longer practical to simplify. According to overall function, ball-like material should be captured firstly and the source should be fed with the material continuously. After that, the material should be conveyed, sorted and then left to the targeted point. Figure 1 shows the functional structure of given task. As shown, Energy (electrical and/or mechanical), and Material enter the system and emerge as material as a result of the overall function. For this specific task outlined above, sub functions are determined as capturing, conveying, sorting and discharging. Each sub-function is related to each other depending on the basic function. Thus, a large number of variants can be obtained by combining the solutions that implement each sub-function in different ways.

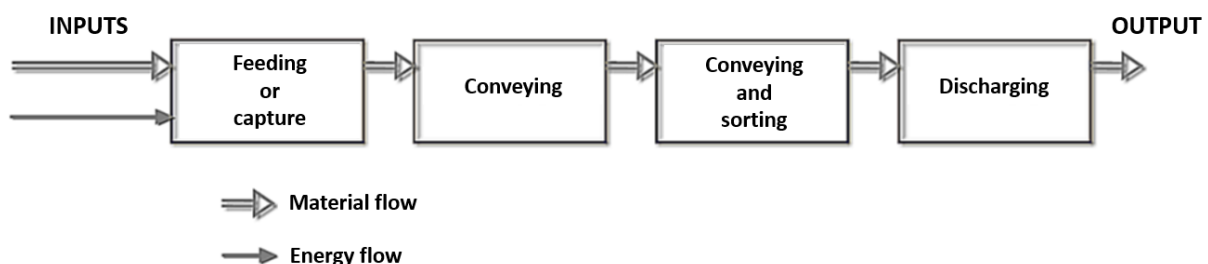


Figure1. Functional Structure

For ball-like material transport task, the solutions satisfying feeding or capturing elements sub function can be as follows: mechanical picker for capturing materials, rotary vane, rotary table, Coulomb friction or pressurized air.

Similarly, working principles used for conveying are transport screw, belt, rotary table, friction, hydraulic or pneumatic. Discharging sub function can be satisfied with gravity in the simplest way (Gavin et al., 2013).

Solutions that will fulfill the overall function can only be achieved by combining the working principles into a working structure. That is, the system must be synthesized. In Table 2, the conceptual variants (V) arranged for working principles for fulfilling each sub-function are shown. As a result of the combinations of solutions satisfying all sub-functions yields 9 different conceptual variations. At this stage, it will be more realistic to continue design with a much limited variations instead of all 9 different solutions. For this purpose, using a binary evaluation chart can be useful. This method can be used for *rough comparison of solution variants* evaluation. It can be used where "objective" parameters can be expressed with a certain accuracy and can be assigned precise values. The alternative is a rather rough evaluation based on the selection of the best solution for the given variant, where certain evaluation criteria are applied to two variants at the same time. The scores are entered into a so-called *dominance matrix*. Accordingly, the alternative that better meets the "objective" parameters than the other is evaluated with one and the other with zero. It is possible to create a ranking from the sum of the values taken by each variant. Applying binary evaluation method as shown in Table 3 yields 3 different solutions which give likelihood of success. The promising solutions are V5, V6 and V7.

Table 2. Possible Combination of Working Principles to Achieve Concept Variants




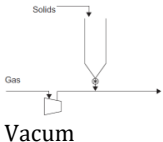


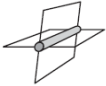



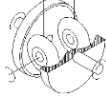


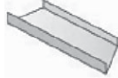


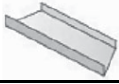
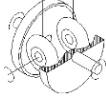
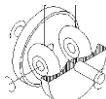

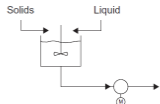
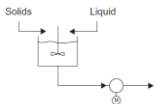
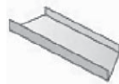
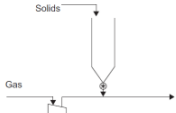
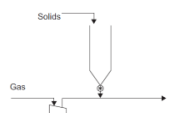
Concept Variants	Feeder	Conveyer	discharger
V1			
V2	 Vacum		
V3			
V4			Conversion energy (potential to kinetic)
V5			
V6			
V7			
V8			
V9	 Blowing	 Blowing	energy conversion (fluid to kinetic)

Table 3. Binary Evaluation of Solution Variants

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
V1	-	1	1	1	1	1	1	1	1
V2	0	-	1	1	1	1	1	1	1
V3	0	0	-	1	1	1	1	0	0
V4	0	0	0	-	1	1	1	0	0
V5	0	0	0	0	-	1	0	0	0
V6	0	0	0	0	0	-	0	0	0
V7	0	0	0	0	1	1	-	0	0
V8	0	0	1	1	1	1	1	-	1
V9	0	0	1	1	1	1	1	0	-
TOTAL	0	1	4	5	7	8	6	2	3

5. Embodiment Design

At this stage, it is possible to draw selected alternatives with simple drawings that explain the working principle. These are conceptual sketches and do not include details. Sketches are used as the first presentation of the target design. These sketches should also provide information on details that may be needed later. The assembly of mechanisms that perform sub-functions will provide a visual conceptualization of alternatives and be presented to the customer. The conceptual sketches of the satisfied solutions are shown at Figure 2. As shown in the Figure, capturing and conveying functions are achieved by using transport screw, rotary table and coulomb friction in conceptual variants.

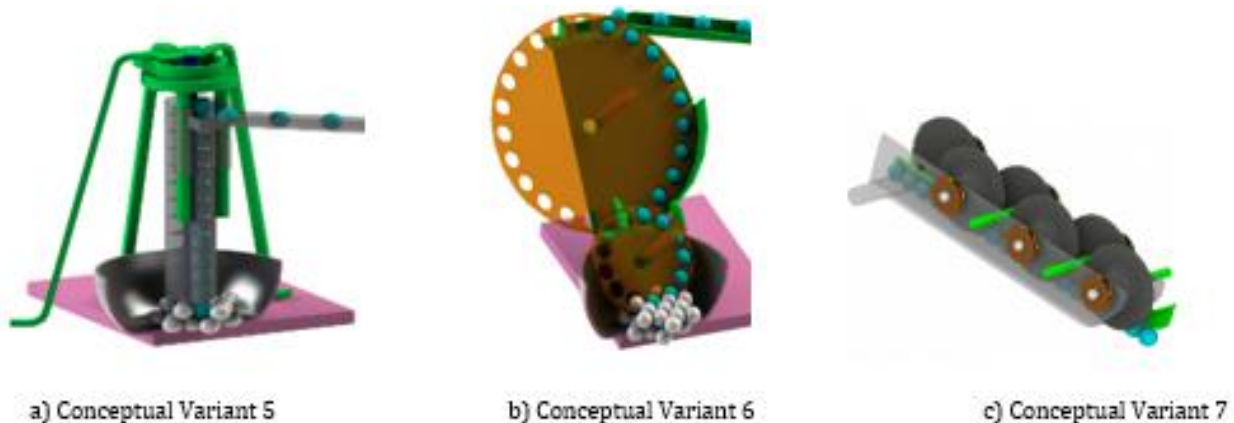


Figure 2. Conceptual Sketches of Ball-Like Material Conveying

5.1 Evaluate Against Technical And Economical Criteria

Evaluation means to determine the usefulness or strength of the alternative solutions for a particular objective. A comparative evaluation will be made by considering how well the three different solutions obtained as a result of the functional synthesis carried out respond to the determined objectives. The result in evaluating a solution is not absolute. However, a comparison can be made in terms of whether it satisfies the requirement list. Accordingly, it is a rating made in the form of a comparison between an imaginary ideal solution and a conceptual design while making an evaluation.

The fundamental issues to be compared between the conceptual variants are listed as follows:

- Simplicity
- Energy efficiency
- Function reliability
- Ease of manufacturing
- Cost

It can be difficult to determine actual cost figures during the conceptual design phase. For this reason, it is often not possible to establish an *economic rating* R_{eco} on production costs. However, the technical and economic aspects can be more or less qualitatively defined. Technical and economical evaluation of the remaining conceptual variants are given in Table 4 and Table 5, respectively. According to VDI 2225, each objective is scored between 0 and 4 (Anon.,1987). Zero indicates that the solution is insufficient to meet the desired objective, and 4 indicates that it meets the objective in the best way. The absolute value scale makes it very easy to tell whether a particular variant is relatively close or far from the theoretical ideal. It is therefore generally more suitable for comparison.

Accordingly, score is assigned to the variant taking into account each objective. The degree of appreciation is determined by dividing the total score of the variant by the ideal score.

Table 4. Technical Evaluation of The Remaining Principle Solution Variants

Technical Criteria	Variants		
	V 5	V 6	V 7
Simple operation	4	4	4
Functional reliability	4	4	2
Ease of manufacturing	2	3	3
Simplicity	3	4	2
Energy efficiency	2	3	2
Total	15	18	13
$R_{tech}=Total/20$	0,75	0,9	0,65

Table 5. Economical Evaluation of The Remaining Principle Solution Variants

Economical Criteria	Variants		
	V 5	V 6	V 7
Low material cost	3	4	2
Low assembly cost	4	3	2
Possibility of manufacturing in own workshop	4	4	4
Low machining cost	2	3	3
Total	13	14	11
$R_{eco}=Total/16$	0,81	0,88	0,7

The straight line method based on the arithmetic mean - $R=(R_{tech}+R_{eco})/2$ - can be used to determine which of the variant evaluated technically and economically is closer to the ideal one. The conceptual variant 6 is the best alternative for the ball-like material conveying with a weighted rating of 89%. If the solution variant is rated below 60%, it is not eligible for further development. The variant with a rating above 80% can usually be moved into the detail design phase without further development.

6. Detail Design

The detailed design process covers all the steps from the shaping of all the parts that make up the machine to the material selection, from the manufacturing method to the cost. In this study, the three-dimensional model of the transport machine created with the Solid Works software as shown in Figure 3. The motor drives both the capturing and the conveying plate synchronously with the aid of a belt-pulley in a 1:2 velocity ratio. The motor rotates at 1000 rpm. A timer belt is used to ensure synchronization. The direction of the rotary tables is counterclockwise as shown in the Figure 3. It is considered that the rotary tables will be manufactured from metal sheet. The thickness of the plates was taken as 4 mm. The slot diameter is 10 mm as specified in the requirement list. There are 12 slots in the capturing plate, 24 slots in the conveying plate. Container depth is specified as max 200 mm in the requirement list. Therefore, the diameter where the slots are placed on the capturing plate is determined as 180 mm. As the rotary table passes through the source container to collect ball-like materials, ball-like materials are placed in the slots on it. Since the balls with a diameter larger than 10 mm cannot be placed in the slots, the balls of the desired size will move forward with the rotation of the capturing plate and then reach the conveying plate. A fixed plate is placed behind the rotary tables and its width is taken as the radius of the rotary tables. The positions of the plates and the working principle of it are shown in more clearly in Figure 2b. There is a 1 mm gap between this plate and the rotary table. In this way, the captured ball is transported upwards with the rotary table such as bucket elevators without squeezing or falling. From here, ball-like materials are left on the ramp. The ramp is designed as an 11 mm wide groove to sorting ball-like material. So the balls will be rolled with the help of gravity and transported to the empty container at a distance of 500 mm. Thus, ball-like materials sorted according to their sizes are transported to the desired point quickly, precisely and safely as described in the task. At the same time, the obtained design has been allowed the material to be transported in both horizontal and vertical directions.

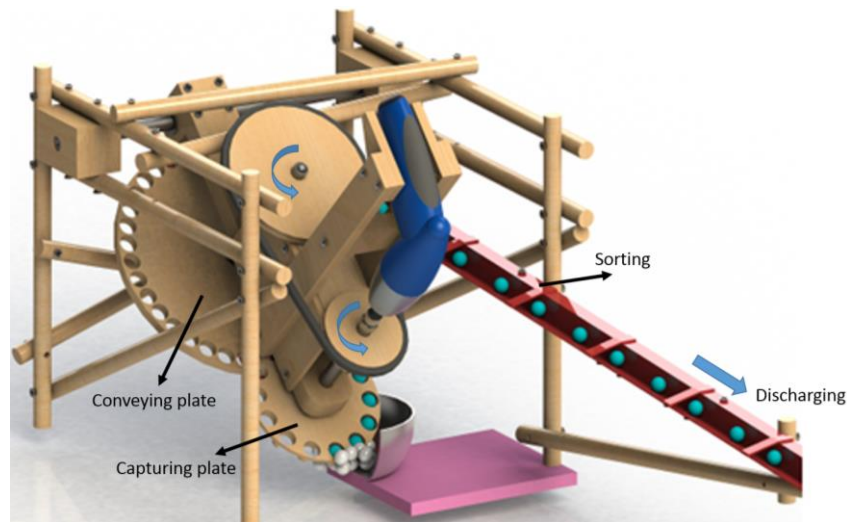


Figure 3. The Three-Dimensional Model of The Device

7. Conclusion

The systematic design phases that presented by Gerhard Pahl and Wolfgang Beitz were applied to create new conceptual designs for a completely new problems (Pahl et al., 2007). The problem and limitation were defined. The requirements list was prepared to show the expectations from the design. Function structures containing the working principle of the device was created and the conceptual variants were revealed using the certain methods. In this way, nine different solution suggestions were obtained. In order to reduce the number of solution suggestions, the pairwise comparison method, which is a rough evaluation, was applied to these nine solution variants. Thus, the number of alternative concept designs has been reduced to three. Evaluation objectives were created by considering the requirement list and most appropriate conceptual design was selected depending on the technical-economical evaluation. The detail design of the device was developed. The procedure for the systematic design approach was strictly followed and this effort yielded completely original solutions some of which are practically applicable. It is shown that the systematic design approach provides the reach all possible alternative solutions to a well-defined problem quickly and easily. Therefore, it can be said that it is very effective in identifying, solving and developing products, especially in the preliminary design process.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Anonymous, 1987. (VDI 87) N.N. Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products, VDI Guidelines, Beuth Verlag, Berlin.
- Altman, J.E., Altman E., 1978. Fruit feeder. US Patent 4069909 A.
- Bozdemir, M., Toktaş, İ., 2001. Mekanik Sistemlerin Kavramsal Tasarımına Sistematik Bir Yaklaşım. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (2), 165-171.
- Börklü, H.R., Helvacilar, E., Özdemir, V., 2017. Conceptual Design of a New Buoy. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 4(4), 125-143.
- Börklü, H., Top, N., 2018. Sistematik Tasarım Yaklaşımı İle Yeni Bir Zeytin Hasat Makinesi Tasarımı. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6 (4) , 659-664. DOI: 10.21923/jesd.423380
- Carroll, W.L., 1984. Juicer for separating pulp and juice from fruit. US Patent 4470424 A.
- Chang, K.J., 2006. Ball bearing actuation mechanism. US Patent 7025258 B.
- Erkens, A., 1928. Beiträge zur Konstruktionserziehung. VDI-Z. 72, (pp.17-21).
- Gavin, T., Ray, S., 2013. Specification and Design of Solids-Handling Equipment. Chemical Engineering Design, Chapter 18, Elsevier Ltd. Second Edition, DOI: 10.1016/B978-0-08-096659-5.00018-3
- Haik, Y., Shahin, T., 2011. Engineering Design Process. Cengage Learning, USA.
- Kesselring, F., 1942. Diestarke Konstruktion. VDI-Z. 86, (pp.321-330, 749-752).
- Koller, R. 1979. Konstruktionslehre für den Maschinen Geräte und Apparatebau, Springer Verlag, Berlin
- Kroes, P., 2002. Design methodology and the nature of technical artefacts. Design Studies, 23, 287-302 PII: S0142-694X(01)00039-4 287
- Langer, D.S., Stump, J., 2007. Table Tennis Ball Delivery Device. US Patent 7213724.
- Leyer, A., 1963-1971. Maschinenkonstruktionslehre. Hefte 1-6 technica-Reihe. Birkhäuser, Basel.
- Matousek, R., 1957. Konstruktionslehre des allgemeinen Maschinenbaus. Springer, Berlin.

- Niemann, G., 1975. Maschinenelemente, Bd. 1. Springer, Berlin.
- Pahl, G.,Beitz, W., 2007. Konstruktionslehre: Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung. Methodenund Anwendung. , Springer Verlag, Berlin.
- Parlar, Z., Soybora, E.K., Burhan, M.S., Davaslıgil, S., 2017. Sistematik Konstrüksiyon ve Tasarım Odaklı Düşünme Yaklaşımı ile Yaratıcı Kavramsal Tasarım Süreci: Küçük Ev Aleti Tasarımı. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (5),1100-1109, DOI: 10.16984/saufenbilder.307260
- Redtenbacher F., 1859. Prinzipien der mechanik und des maschinenbaus. Bremen University Press, Germany
- Roth, K. 1982. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Systematisierung und Zweckmassige Aufbereitung Technischen Sachverhalte fer das Methodische Konstruieren, Springer Verlag, Berlin.
- Sawallisch, O.A., 1998. Golf ball elevator. US Patent 5758992.
- Şekercioğlu, T., 2019. Kavramsal Tasarım Aşamalarında Bakımın Yeri veÖnemi. Mühendis ve Makina, 60(694), 67-76.
- Tschochner, H., 1954. Konstruierenund Gestalten. Essen, Girardet.
- Tsuchimochi, K., Goto, K., Shirakawa, J., 2015. Part feeder and part supply method. US Patent 20140294518 A.
- Wijngaarden, E., 2004. Apparatus for delivering substantially spherical products into a substantially container. US Patent 6726002 B2.



A THEORETICAL INVESTIGATION ON TRAINING OF PIPE-LIKE NEURAL NETWORK BENCHMARK ARCHITECTURES AND PERFORMANCE COMPARISONS OF POPULAR TRAINING ALGORITHMS

Ozlem Imik SIMSEK*, Baris Baykant ALAGOZ

Inonu University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Malatya, Turkey

Keywords

*Artificial Neural Networks,
Network Architectures,
Training Performance,
Backpropagation
Algorithms,
Metaheuristic Training.*

Abstract

Architectures of neural networks affect the training performance of artificial neural networks. For more consistent performance evaluation of training algorithms, hard-to-train benchmarking architectures should be used. This study introduces a benchmark neural network architecture, which is called pipe-like architecture, and presents training performance analyses for popular Neural Network Backpropagation Algorithms (NNBA) and well-known Metaheuristic Search Algorithms (MSA). The pipe-like neural architectures essentially resemble an elongated fraction of a deep neural network and form a narrowed long bottleneck for the learning process. Therefore, they can significantly complicate the training process by causing the gradient vanishing problems and large training delays in backward propagation of parameter updates throughout the elongated pipe-like network. The training difficulties of pipe-like architectures are theoretically demonstrated in this study by considering the upper bound of weight updates according to an aggregated one-neuron learning channels conjecture. These analyses also contribute to Baldi et al.'s learning channel theorem of neural networks in a practical aspect. The training experiments for popular NNBA and MSA algorithms were conducted on the pipe-like benchmark architecture by using a biological dataset. Moreover, a Normalized Overall Performance Scoring (NOPS) was performed for the criterion-based assessment of overall performance of training algorithms.

BORU-BENZERİ YAPAY SİNİR AĞI KARŞILAŞTIRMA MİMARİLERİNİN EĞİTİMİ HAKKINDA BİR TEORİK ARAŞTIRMA VE POPULAR EĞİTİM ALGORİTMALARIN PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMALARI

Anahtar Kelimeler

*Yapay Sinir Ağları,
Ağ Mimarileri,
Eğitim Performansı,
Geriye yayılım Algoritmaları,
Metasezgisel Eğitim.*

Öz

Sinir ağlarının mimarileri, yapay sinir ağlarının eğitim performansını etkiler. Eğitim algoritmalarının daha tutarlı performans değerlendirmesi için eğitimi zor kıyaslama mimarileri kullanılmalıdır. Bu çalışma, boru-benzeri mimari olarak adlandırılan bir referans sinir ağı mimarisini tanıtmakta ve popüler Sinir Ağı Geriye yayılım Algoritmaları (SAGA) ve iyi bilinen Metasezgisel Arama Algoritmalarının (MAA) eğitim performansını analizlerini sunmaktadır. Boru-benzeri sinir mimarileri, temelde bir derin sinir ağının uzunlaşmasına bir kesitini temsil eder ve öğrenme süreci için bir daraltılmış uzun darboğaz oluşturur. Bu nedenle, uzun boru-benzeri ağ boyunca parametre güncellemelerinin geriye doğru yayılmasında gradyan kaybolma problemleri ve büyük eğitim gecikmelerine neden olarak eğitim sürecini önemli ölçüde zorlaştırır. Bu çalışmada boru-benzeri mimarilerin eğitim zorlukları birleştirilmiş tek-nöron öğrenme kanalları konjektörüne göre ağırlık güncellemelerinin üst sınırı dikkate alınarak teorik olarak gösterilmiştir. Bu analizler aynı zamanda Baldi ve arkadaşlarının sinir ağlarının öğrenme kanalı teoremine pratik açıdan da katkıda bulunmaktadır. Popüler NNBA ve MSA algoritmalarının eğitim deneyleri, bir biyolojik veri seti kullanılarak boru benzeri kıyaslama mimarisinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, eğitim

algoritmalarının genel performansının ölçüt tabanlı değerlendirilmesi için Normalleştirilmiş Genel Performans Puanlaması (NGPP) uygulanmıştır.

Alıntı / Cite

Simsek, O.I., Alagoz, B.B., (2022). A Theoretical Investigation on Training of Pipe-Like Neural Network Benchmark Architectures and Performance Comparisons of Popular Training Algorithms, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 10(4), 1251-1271.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
O. Imik Simsek, 0000-0002-4192-0255	Başvuru Tarihi / Submission Date	17.04.2022
B.B. Alagoz, 0000-0001-5238-6433	Revizyon Tarihi / Revision Date	15.07.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	15.07.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

Neural networks have been gaining growing popularity in many fields of engineering and applied science for almost two decades. Their architectures and computation schemes have been progressively developed since the first appearance of the fundamental neural network models (Kim,2017). Today, the learning power of deep neural networks is harnessed for processing much bigger data stacks, and theoretical works and research competitions for deeper neural networks are continuing to boost learning capability of the deep neural networks (Coleman et al., 2017; Schmidhuber, 2015; Shrestha and Mahmood, 2019; Deng and Yu, 2013; Winkler and Le, 2017; Mhaskar et al., 2016).

Architectures of neural networks and the training algorithms have been occasionally progressed. The gradient vanishing problem was a major problem when adding more hidden layers to neural networks to reach much deeper networks (Kim, 2017). As the hidden layer count has increased, gradient vanishing problems have emerged, slowed down the training, reduced efficiency of backpropagation algorithms throughout deep layers, and the practical benefits in use of deeper layers began to disappear. Since around 2000, researches have come up with several solutions for the training problems of deep hidden layers; for instance use of more relevant activation functions (RELU and variants)(Kim, 2017; Oostwal et al., 2019), pre-training approaches (Hinton and Salakhutdinov, 2006), better random initial scaling (Glorot and Bengio, 2010), employment of better optimization methods (Martens, 2010), selection of more suitable neural network architectures (Shrestha and Mahmood, 2019; Bahrami et al., 2019; Arifovic and Gençay, 2001) and improved initialization techniques such as the orthogonal initialization and the random walk initialization (Sussillo and Abbott, 2014).

Besides the implementation of gradient based optimization methods in neural network training, there have been attempts to use metaheuristic optimization algorithms in the training process of neural networks. The metaheuristic optimization can provide a gradient-free search option and this becomes advantageous when searching the optimal points in low-gradient parametric search spaces (Martens, 2010). Metaheuristic methods employ a set and trial search strategy to seek optimal values of parameters in the complicated optimization problems (Arifovic and Gençay, 2001; Sussillo and Abbott, 2014). Due to these advantageous, there are several research works that have addressed the training of feedforward neural networks by using popular metaheuristics(Sexton and Gupta, 2000; Che et al., 2011; Gudise and Venayagamoorthy, 2003; Ince et al., 2010; Mosavi et al., 2016) and results were compared with the backpropagation method in the shallow feedforward neural network training problems: Sexton et al. showed that genetic algorithm could be effectively used for training of shallow neural networks for chaotic time series data and reported a superior training performance of genetic algorithm over the backpropagation methods (Sexton and Gupta, 2000). In a similar study, Che et al. concluded that the backpropagation algorithm can be preferred since it provides faster training of neural networks than the genetic algorithm; however it can suffer from the gradient vanishing problem where the genetic algorithm does not suffer (Che et al., 2011). Gudise et al. compared the neural network training performance of particle swarm optimization with performance of a backpropagation algorithm and reported that particle swarm optimization algorithm can faster converge to optimal weights than the backpropagation algorithm (Gudise and Venayagamoorthy, 2003). These contradicting reports on training performances of backpropagation and metaheuristic methods indicate the need for well-designed, standardized test and evaluation procedures.

* İlgili yazar / Corresponding author: oimiksimsek@gmail.com, +90-530-416-8860

Later, performances of several contemporary metaheuristic algorithms were compared for the training of neural networks (Mosavi et al., 2016; Ghasemiyeh et al., 2017). Besides the training process of the neural network, metaheuristic optimization has also been performed for optimization of the network architectures to reach an improved training performance (Arifovic and Gençay, 2001). Although there are many efforts that compare performances of the learning methods (Sewak et al., 2018; Caruana and Niculescu-Mizil, 2006; Bala et al., 1992) and training algorithms (Bahrami et al., 2019; Zhao et al., 2010; Rusiecki, 2012; Karim et al., 2018; Can et al., 2019; Awolusi et al., 2019; Thakkar et al., 2020) in specific application domains, application-specific results obtained for arbitrary network architectures may not be relevant and consistent to have a common view on the training performances of the algorithms. For this reason, there is a demand for standard neural network training benchmark architectures, which are deliberately designed for hard-to-train tests to uncover advantages and/or shortcoming of the training algorithms (Zhu et al., 2018; Fong et al., 2018). Such application-independent benchmarking is particularly useful to pinpoint major drawbacks of existing popular training algorithms and helpful to indicate new research directions for the ongoing research efforts.

This study investigates training performances of 9 widely used backpropagation training algorithms (e.g. LM, BFG, CGB etc.), which are implications of the gradient based optimization approaches, and 3 popular metaheuristic search methods (GA, PSO GWO) in the training problem of pipe-like deep neural network benchmark architectures. The pipe-like architecture of deep neural networks complicates the training process due to forming a long and narrowed learning bottleneck via an elongated feedforward path of neurons. In the experimental work, the body fat percentage estimation dataset, which may express bio-complexity of human metabolism, is used in training of this architecture with different pipe lengths (hidden layer counts). For the overall performance assessment of the training methods in pipe-like neural network architecture, a NOPS scheme is employed and the overall training performance and performance criterion-based selection of the training algorithms are shown. The addressed problems, novelties and main contributions of this study can be summarized as:

(i) A pipe-like neural network benchmark architecture, which is called pipe-like neural network benchmark architecture, is introduced. The pipe-like neural network benchmark architecture forms an extended bottleneck for the learning process. The training difficulties of this hard-to-train benchmark architecture are theoretically analyzed in the aspect of Baldi et al.'s learning channel theorem of neural networks. This effort contributes to using practical implications of the learning channel theorem for investigating training problems in deep neural networks.

(ii) A theorem to consider upper bounds of the training performance for gradient-based training algorithms is suggested. This theorem implements sensitivity derivative analysis on the pipe-like deep neural learning channel and it conjectures essential mechanisms that lead to gradient vanishing problems in deep neural networks. Suggestions of this theorem were observed in the experimental study and used to explain essential reasons for training performance degradations of gradient-based training in our experimental test.

(iii) To the best of our knowledge, this is the first experimental study that tests training performances of 9 popular NNBA algorithms and 3 fundamental MSA algorithms on the elongated pipe-like benchmark architectures from shallow one to deeper networks. The training performances of these algorithms are reported without any application-specific bias. The experimental results revealed performance drawbacks of these training algorithms and results indicated a requirement of designing new deep learning dedicated optimization algorithms, which are particularly specialized for training of deep neural network algorithms.

(iv) To enable performance criterion-based selection of the training algorithms, a NOPS scheme is illustrated. By allowing importance weighting of the performance criterion, NOPS can contribute to the solution of automated training algorithm evaluation and selection problems.

2. Preliminaries And Theoretical Background

This section provides preliminary knowledge on NNBA and MSA training algorithms that are tested in experimental study. Then, training difficulties of the pipe-like neural network benchmark architecture are theoretically analyzed by suggesting a theorem for upper bounds of training performance of this benchmark architecture. This theoretical background establishes a theoretical foundation to demonstrate suitability of the pipe-like neural network benchmark architecture for testing of training algorithm performances.

2.1. Backpropagation Training Algorithms

Training of an artificial neural network mathematically refers to finding optimal values of weight coefficients in order to minimize a predefined loss function. The loss functions are mathematical expressions that are used to evaluate the quality of the learning activity on the net. This optimization problem complicates as the number of layers in a neural network increases because of the increased function compositions to represent the network function (functional complexity of the network function) and growing weight and bias coefficient numbers to be optimized (high dimensionality of the optimization problem). To deal with complications associated with the training of multilayer feedforward neural network architectures, a “backpropagation” algorithm was proposed to cope with functional complexity of multilayer networks (Kim, 2017; Goodfellow et al., 2016). Then, the backpropagation has become the most fundamental training algorithm, and it has found a wide application area for the training of multilayer neural networks. It involves two essential stages (Kim, 2017): firstly, the input data propagates towards the output layer of neural networks; this stage is forward propagation of information, afterward, the error information, which is calculated at the output of the neural network, propagates back into the input layer of the neural network. This is the process of the backward propagation of the error information, where the term “backpropagation” comes from. Several training algorithms have been proposed to improve performance of the backpropagation training approach (Hagan et al., 1996; Cömert and Kocamaz, 2017; Hagan and Menhaj, 1994; Dennis and Schnabel, 1996; Mosavi et al., 2016; Pan et al., 2013). Table 1 shows a list of up-to-date backpropagation training algorithms that have been preferred in the training of multilayer feedforward neural networks in the current study. Training performance of backpropagation algorithms decrease when the hidden layer number of the feedforward neural networks increases because of the gradient vanishing problems: The decrease in gradient magnitudes can severely deteriorate the backward error propagation toward input layers, the weight updates slows down, and the training in deep layers begins to cease, practically. Therefore, consistent training performance analysis of algorithms should be carried out for deep and complicated neural network configurations.

Table 1. The NNBA Types, Which Are Tested in This Study, and Their Abbreviations

Training Algorithms	Abbreviations	Related Works
Levenberg-Marquardt backpropagation	LM	(Hagan et al., 1996; Hagan and Menhaj, 1994; Powell, 1977)
Quasi-Newton backpropagation with Broyden, Fletcher, Goldfarb, and Shanno (BFGS) update	BFG	(Dennis and Schnabel, 1996)
Conjugate gradient backpropagation with Powell-Beale restarts	CGB	(Powell, 1977; Beale, 1972)
Conjugate gradient backpropagation with Polak-Ribière updates	CGP	(Hagan et al., 1996; Scales, 1985 ; Fletcher, 1964)
Conjugate gradient backpropagation with Fletcher-Powell updates	CGF	(Hagan et al., 1996; Scales, 1985; Fletcher, 1964)
Variable learning rate gradient descent	GDX	(Vogl et al., 1988)
One-step secant backpropagation	OSS	(Battiti, 1992)
Resilient backpropagation	RP	(Riedmiller and Braun, 1993)
Scaled conjugate gradient backpropagation	SCG	(Moller, 1993)

2.2. Metaheuristic Training for Artificial Neural Networks

Metaheuristic optimization methods are easy-to-use, optimal solution seeking tools that have been widely implemented in engineering problems. They have been particularly used when the optimization problem is too complex to be solved numerically or analytically (Wong and Ming, 2019). These methods employ a set and trial search strategy that can provide a straightforward solution for empirical, complicated, even not-well structured optimization problems. This introduces an important advantage that makes them preferable in real-world engineering application works. However, they have some disadvantages such as concerns about the dependability of solutions, inefficiency of these methods while searching in high dimensional search spaces etc.

The candidate solution selection strategies of metaheuristic algorithms are very substantial for convergence performance of metaheuristic optimization, and they establish major discrimination points between metaheuristic optimization techniques. Some major problems, which were observed in use of the metaheuristic methods, can be summarized as (Gogna and Tayal, 2013; Chopard and Tomassini, 2018; Hinton, Salakhutdinov, 2006; Igel, 2014):

(i) Contemporary metaheuristic optimization methods cannot convey definite information whether or not the solution is globally optimal (Gogna and Tayal, 2013). However, the quality of solutions can be evaluated with the value of objective functions in applications (Parejo et al., 2012; Gunantara et al., 2019).

(ii) Metaheuristic optimization is commonly effective in the low dimensional search spaces. An increase in the dimension of search spaces, that is, more parameters to optimize, severely reduces the converge performance in the metaheuristic searching because of the exponential growth in the exploration fields for the set and trial searching of search agents. When the number of parameters, namely the dimension of the problem, increases, the computation time of the algorithms severely arises (Chopard and Tomassini, 2018; Parejo et al., 2012).

(iii) Many metaheuristic methods need the finite search spaces that are confined by the predefined search ranges of the optimized parameters. This may become an important shortcoming that can reduce practical efficiency of metaheuristic methods because it is not always an easy problem to determine predefined search ranges of parameters, which can include the global minimum or maximum. Therefore, improper configuration of parameter search regions can limit performance of metaheuristic search (Chopard and Tomassini, 2018; Birattari and Kacprzyk, 2009).

(iv) Metaheuristics methods commonly utilize random number generation in the search processes to differentiate search paths. However, this brings a problem of unrepeatability of the solutions even though the computers can generate pseudo-random numbers. The reliable results require a statistical evaluation of the repeated optimization tasks. However, the rerunning of the algorithms many times can considerably increase the computational burden (Gogna and Tayal, 2013; Parejo et al., 2012).

When the depth of a multi-layer feedforward neural network increases, training of the neural network introduces difficulties associated with gradient magnitudes for gradient-based optimization techniques. Therefore, there exist several efforts to implement gradient-free metaheuristic optimization as a substitute for backpropagation methods (Sexton and Gupta, 2000; Che et al., 2011; Gudise and Venayagamoorthy, 2003; Ince et al., 2010; Mosavi et al., 2016). Since a majority of metaheuristic methods perform gradient-free optimization algorithms, they are expected to present advantages over the gradient-based optimization algorithms when gradient calculations are problematic or ineffective. For the training of the multilayer feedforward networks, three widely preferred popular metaheuristic optimization methods in the literature are listed in Table 2 (Che et al., 2011; Ince et al., 2010; Mosavi et al., 2016). These methods are commonly used to minimize the sum of square error loss function of neural networks, which is written by

$$\min E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k e_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (f_i(w, x_j) - y_i)^2 \quad (1)$$

where, $f_i(w, x_j)$ represents i^{th} output function of the neural network for the input vector x_j . Training set is formed by the input-output data pairs $(x_j, y_1, y_2, \dots, y_k)$. The weight vector w represents a collection of the weight coefficients of neural networks, which are optimized during the training of the network via a metaheuristic method. (Bias coefficients are computationally assumed as an input with a weight value of 1). Number of parameters to optimize, n layer neural network can be written by

$$D = \sum_{h=1}^n (k_{(h-1)}k_h + k_h), \text{ where } k_h \text{ is the number of neurons in the hidden layer } h \text{ and } k_0 \text{ is the number}$$

of inputs in a neural network. Parameter number D determines the dimension of the search space. The search space expands a D dimensional hypercube by the term $[w_l, w_u]^D$, where $[w_l, w_u]$ is the upper and lower boundaries of weight coefficient search ranges. Due to the exponential growth of the search space volume, the metaheuristic algorithms in Table 2 have been utilized in the training of shallow neural networks (Che et al., 2011; Ince et al., 2010; Mosavi et al., 2016). It will be useful to test these methods in training of the pipe-like architecture of deep neural networks to better observe the inherent shortcomings of the metaheuristic training approach.

Table 2. The MSA Types, Which Are Tested in This Study, and Their Abbreviations

Metaheuristic Search Algorithms	Abbreviations	Related Works
Genetic Algorithm	GA	(Sexton and Gupta, 2000; Che et al., 2011; Melanie, 1996 ; Michalewicz, 1992
Particle Swarm Optimization	PSO	(Gudise and Venayagamoorthy, 2003 ; Ince et al., 2010 ; Zeugmann et al., 2011)
Gray Wolf Optimization	GWO	(Mosavi et al., 2016 ;Mirjalili and Mirjalili S., 2014 ;Faris et al., 2018)

2.3. A Theoretical Background on Pipe-like Architecture Deep Neural Network

Architecture types of neural networks affect the learning skills, and the proper selection of network architecture is a very important stage for the training performance (Ince et al., 2010; Hornik, 1991). Fundamentally, feedforward neural network architectures are divided into two main categories: These are the single layer neural networks in Figure 1 and the multi-layer neural networks in Figure 1. Later, multi-layer feedforward neural networks were grouped into two major subcategories that are the shallow neural networks and the deep neural networks. Theoretical discussions on the architecture or the configuration of artificial neural networks are continuing on the bases of universal approximation theorems (Schmidhuber, 2015 ; Winkler and Le, 2017; Hornik, 1991; Csaji, 2001; Kratsios and Bilkoptov, 2020).

Conceptually, increasing the tunable parameter numbers (layers, weights, bias, generic activation function) can enhance fitting capability to data because it increases complexity in the compositional function representation of neural network and accordingly allows representation of more composite function models by using the deep neural network function $f_i(w, x_j)$. Thus, deep neural networks present potential of better approximating to higher complexity compositional function models that cannot be well approximated by a shallow neural network (Mhaskar et al., 2016). On the other hand, in addition to enhancing approximation capability, increasing the depth of feedforward network was observed to enable more abstraction of the learned knowledge in the deeper layers similar to the biological neural network can do, for instance the convolution neural network can detect more complex features (irregular shape) in deep layers by using more primitive features (e.g. edges, curves) that are detected in the shallow layers (Deng and Yu, 2013). However, the overfitting problem, which causes a reduction in the generalization property in learning, emerges in deep neural networks because too many tunable parameters highly increase the approximation capability of neural network function to each data point in the training set. Overfitted models cause serious performance degradations in data applications in the cases of noisy data or insufficient data in training sets. Therefore, a proper generalization is preferable in data applications to obtain satisfactory practical performance.

In order to compare training performances of the training methods, hard-to-train neural network architectures are more suitable to reveal the performance shortcomings and superiorities. In this manner, authors used a pipe-like architecture deep neural network in the performance tests. The width of layers was set to 5 neurons and the length of the neural network was increased up to 20 layers by adding a hidden layer at each test. Figure 2 shows a depiction of the trained 5 neurons wide and 20 layers long pipe-like benchmark architecture. This generic pipe-like structure enables testing several pipe architecture versions from the shallow one to the deep networks by adjusting the hidden layer counts.

The communication and signaling phenomenon between neurons indicate the communication nature of the neural networks (Tagluk and Isik, 2019). A neural network resembles an information-adaptive narrowband communication channel with a learning property between the input layer and the output layer of the neural network. Previously, Baldi et al. have suggested the existence of a physical learning channel to convey information via the weights of the network (Isik and Sadowski, 2016) and they investigated the capacity of learning algorithms by considering the error gradients per weight. Thus, Baldi et al. conjectured a foundation for the learning channel theorem of neural networks. The current study contributes to the learning channel theorem of neural networks in a practical aspect by considering distribution of weight update magnitudes throughout a pipe-like deep neural network. Figure 2 depicts a one-neuron wide, pipe-like network fraction (at middle schematic) that is composed of the hidden neuron model (at bottom schematic). Let's investigate the weight update magnitudes for this network to show hard-to-train nature of pipe-like benchmark networks:

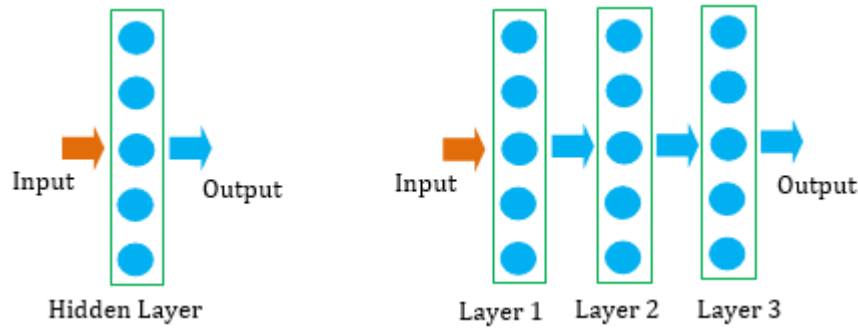


Figure 1. A Representation Of A Single Layer Neural Network With 5 Neurons (On The Left-Hand Side) And A Multi Layer Neural Network With Three 3 Hidden Layer Of The 5 Neurons (On The Right-Hand Side)

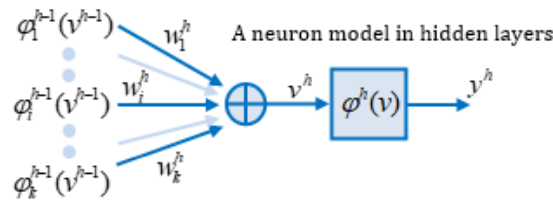
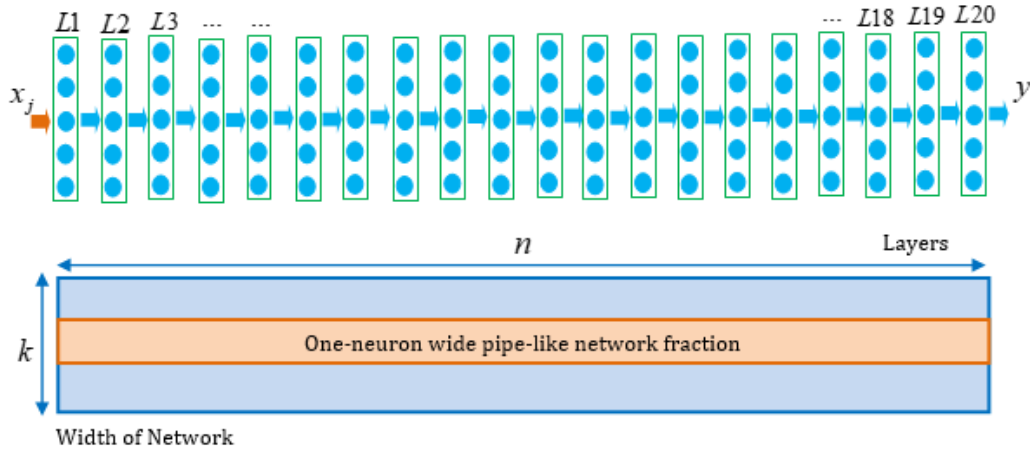


Figure 2. A Block Diagram Of A 5 Neuron Wide And 20 Layer Long Pipe Architecture Neural Network (Top Schema), A Depiction Of One-Neuron Wide Pipe-Like Network Segment (Middle Schema), One Neuron In The Hidden Layer (Bottom Schema)

Essentially, the pipe-like architecture results in a long bottleneck for the training process because a pipe-like architecture forms a narrowed and elongated network for forward and backward propagation of neural information and it exhibits two major training drawbacks for gradient based training algorithms that are the propagation delay problems related to narrowing of network and gradient vanishing problems related to elongation of network. To analyze these properties associated with the network architecture, let's denote the output function of the layer h in the neural network by the function $f^h(w^h, x_j^h)$, where the superscript h is the layer index. When the layer number increases by adding more layers, the resulting output function of a deep neural network with n layers can be commonly expressed by using function compositions as (Mhaskar et al., 2016; Isik and Sadowski, 2016; Strang, 2018)

$$y = f^n(w^n, f^{n-1}(w^{n-1}, f^{n-2}(w^{n-2}, \dots, f^2(w^2, f^1(w^1, x_j^1)) \dots))) \tag{2}$$

where the superscript n is the depth of this function composition.

By considering activation function and the weighted sum of neuron inputs in the form of $y^h = f^h(w^h, x^h) = \varphi^h(\sum w_i^h \cdot \varphi_i^{h-1}) = \varphi^h(w^h \varphi^{h-1})$ (Isik and Sadowski, 2016; Mhaskar et al., 2016), the output of whole neural network is considered in the form of

$$y = \varphi^n \left(\sum w^n \varphi^{n-1} \left(\sum w^{n-1} \varphi^{n-2} \left(\sum w^{n-2} \dots \varphi^2 \left(\sum w^2 \varphi^1 \left(\sum w^1 x_j \right) \dots \right) \right) \right) \right) \quad (3)$$

This equation suggests a composite learning function family of the weight coefficient vector w^h . The $\varphi^h(\cdot)$ stands for the activation in the layer h . The weighted sum of neuron inputs in the layer h can be represented by the weighted sum of previous layer outputs $v^h = \sum w_i^h \cdot \varphi_i^{h-1}$. For every optimal determination of the weight coefficient set of $w^* = \{w^1, w^2, w^3, \dots, w^h\}$ at a minima of the loss function, the results yield a learned function $y_j = f(w^*, x_j)$ for an input vector x_j from the training set. The pipe-like architecture mainly narrows the width of the network, and this decreases the number of the weighted sum terms in the output function of the network. Consequently, this decreases the complexity of the composite learning function family that is represented by the Equation (3). Accordingly, a reduction in the complexity of the composite learning function tree decreases the representative nature of the output function. This is a factor that complicates the training tasks of a pipe-like architecture for all training algorithms.

The gradient-based algorithms use delta rule for the weight updates,

$$w^h \leftarrow w^h + \Delta w^h \quad (4)$$

where Δw^h is the weight update (Kim, 2017; Isik and Sadowski, 2016). The weight updates Δw^h are commonly performed in directions where the loss function decreases. Therefore, sensitivity function $\frac{\partial E}{\partial w^h}$

is widely used for the weight update $\Delta w^h = -\eta \frac{\partial E}{\partial w^h}$ in order to detect the descent directions of the loss

function, where $\eta > 0$ is the learning rate that is commonly used to regulate converge rate of gradient-

based optimization techniques. The magnitude of the weight updates $|\Delta w^h| = \eta \left| \frac{\partial E}{\partial w^h} \right|$ is an indicator to

evaluate penetration of learning through the network. To consider training difficulties of pipe-like neural network architecture for gradient-based backpropagation training algorithms, it is useful to investigate an upper boundary of sensitivity function magnitude in the network.

Theorem 1 (An upper bound for sensitivity derivatives in pipe-like neural network models):

In cases of k numbers of the neuron in the each layer and gradient-based training algorithms, an upper bound for sensitivity derivatives at the first layer neurons can be expressed as

$$\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \leq \sum_i^k \left| \frac{\partial E}{\partial \varphi_i^n} \right| \left\| \frac{\partial \varphi_i^n}{\partial v^n} \right\| \|w^n\| \left\| \frac{\partial \varphi_i^{n-1}}{\partial v^{n-1}} \right\| \|w^{n-1}\| \dots \|w^3\| \left\| \frac{\partial \varphi_i^2}{\partial v^2} \right\| \|w^2\| \left\| \frac{\partial \varphi_i^1}{\partial v^1} \right\| |x_j| \quad (5)$$

Proof: To calculate sensitivity derivative $\frac{\partial E}{\partial w^h}$ through the layers, a chain rule of derivative operators is

implemented to cope with the composite function form of the neural network output function. When the chain rule of derivative operator is used for the one-neuron wide and n layer pipe-like architecture, the sensitivity derivative can be written by

$$\Delta w^1 = -\eta \frac{\partial E}{\partial w^1} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \varphi^n} \frac{\partial \varphi^n}{\partial v^n} \frac{\partial v^n}{\partial \varphi^{n-1}} \frac{\partial \varphi^{n-1}}{\partial v^{n-1}} \frac{\partial v^{n-1}}{\partial \varphi^{n-2}} \dots \frac{\partial v^3}{\partial \varphi^2} \frac{\partial \varphi^2}{\partial v^2} \frac{\partial v^2}{\partial \varphi^1} \frac{\partial \varphi^1}{\partial v^1} \frac{\partial v^1}{\partial w^1} \quad (6)$$

for an update of weights in the first hidden layer (Roodschild et al., 2020). Here, by considering at the hidden layers $\frac{\partial v^h}{\partial \varphi^{h-1}} = w^h$ and the first hidden layer $\frac{\partial v^1}{\partial w^1} = x_j$, the magnitude of sensitivity at the first hidden layer is expressed by the weight update magnitude as

$$\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| = \left| \frac{\partial E}{\partial \varphi^n} \right| \left| \frac{\partial \varphi^n}{\partial v^n} \right| w^n \left| \frac{\partial \varphi^{n-1}}{\partial v^{n-1}} \right| w^{n-1} \dots w^3 \left| \frac{\partial \varphi^2}{\partial v^2} \right| w^2 \left| \frac{\partial \varphi^1}{\partial v^1} \right| x_j \quad (7)$$

For k numbers of the neuron in the each layer (i.e., the learning channel width of k -neurons), one can aggregate contributions of all one-neuron path segments (See middle schema in Figure 2) in order to state an upper boundary for the sensitivity function magnitudes:

$$\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \leq \sum_i^k \left| \frac{\partial E}{\partial \varphi_i^n} \right| \left| \frac{\partial \varphi_i^n}{\partial v^n} \right| w^n \left| \frac{\partial \varphi_i^{n-1}}{\partial v^{n-1}} \right| w^{n-1} \dots w^3 \left| \frac{\partial \varphi_i^2}{\partial v^2} \right| w^2 \left| \frac{\partial \varphi_i^1}{\partial v^1} \right| x_j$$

Some Remarks and A Numerical Example:

By using Equation (5), an upper boundary for the weight updates at the first layer neurons can be obtained

$$|\Delta w^1| = \eta \left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \leq \eta \sum_i^k \left| \frac{\partial E}{\partial \varphi_i^n} \right| \left| \frac{\partial \varphi_i^n}{\partial v^n} \right| w^n \left| \frac{\partial \varphi_i^{n-1}}{\partial v^{n-1}} \right| w^{n-1} \dots w^3 \left| \frac{\partial \varphi_i^2}{\partial v^2} \right| w^2 \left| \frac{\partial \varphi_i^1}{\partial v^1} \right| x_j \quad (8)$$

This boundary reveals a restrictive factors for the learning activity of the pipe-like neural networks: The learning tendency of the network at each training epoch depends on the magnitude of activation function derivatives $\left| \frac{\partial \varphi^h}{\partial v^h} \right|$, the magnitude of weight coefficients $|w^h|$, the learning rate η and the depth of the network (n). For the worst-case analysis, each partial derivative term of activation functions can be assumed $\left| \frac{\partial \varphi^h}{\partial v^h} \right| < 1$ and the weight magnitudes are considered $\left| \frac{\partial v^h}{\partial \varphi^{h-1}} \right| = |w^h| < 1$, these conditions cause the whole chain rule approximating to zero, $\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \rightarrow 0$, as the number of hidden layer (n) increases because of the subsequent multiplication of $\left| \frac{\partial \varphi^h}{\partial v^h} \right| < 1$ and $|w^h| < 1$ terms. This effect results in the weight updates also converging to zero, $|\Delta w^1| \rightarrow 0$, and it can severely slow down the training process.

According to Theorem 1, the deep pipe-like network encounters two major training complications for NNBA methods: (i) gradient vanishing problem ($\frac{\partial E}{\partial w^1} \rightarrow 0$) because of the multiplication of terms with

$\left| \frac{\partial \varphi^h}{\partial v^h} \right| < 1$ and $|w^h| < 1$ as the hidden layer number increases, and (ii) slowing down the training process

though the pipe-like networks as neuron counts k (the channel width) decreases in the narrowed layers. For a numerical illustration of the gradient vanishing problem in the pipe-like neural networks, it is useful to consider upper bounds of sensitivity derivatives at the first hidden layer for a fundamental activation function. For illustration purpose, a pipe-like neural network with the sigmoid activation function ($\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}}$) is investigated based on the inequality (5). The unit weight coefficients $|w^i| = 1$ and the

unit input $|x_j| = 1$ are assumed in order to compensate for effects of weight and input parameters. Thus, one can consider only effects of the activation function selection on the training process. Let us consider sigmoid activation functions, it is obvious that $\left| \frac{\partial \phi^h}{\partial v^h} \right| \leq 0.25$. For an upper boundary analysis, the maximum value $\left| \frac{\partial \phi^h}{\partial v^h} \right| = 0.25$ can be used in inequality (5). Figure 3 shows change of logarithmic scaled sensitivity function amplitude $\left(\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \right)$ at the first layer neurons while increasing hidden layer numbers up to 20 layers. The upper bound of the sensitivity derivative up to 20 hidden layer network is about $\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \leq 9.09 \cdot 10^{-13}$, which also implies that the weight updating $|\Delta w^1| \leq \eta 9.09 \cdot 10^{-13}$ is at a negligible level at the first layer. This problem suppresses backward propagation of error signals through deep neural networks. This result indicates a severe gradient vanishing problem with almost cessation of the training process under the presumed conditions. However, according to this conjecture, one can suggest that the learning rate η , can be adaptively used to amplify the sensitivity function amplitudes to deal with this issue.

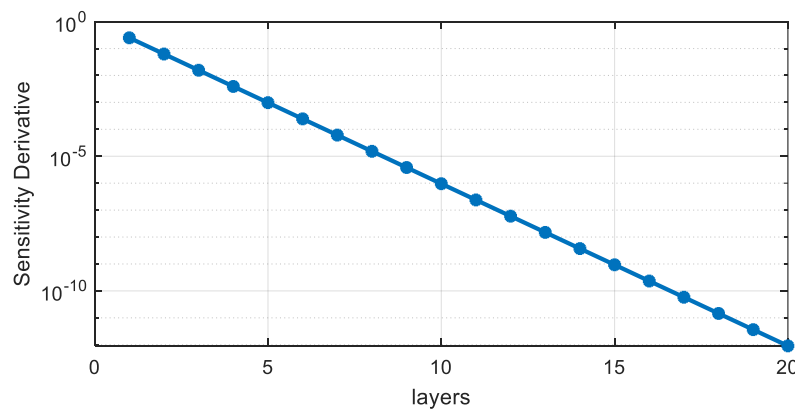


Figure 3. The Level Of Sensitivity Function In Logarithmic Scale At The First Hidden Layer $\left(\left| \frac{\partial E}{\partial w^1} \right| \right)$ For Sigmoid Activation Functions

3. An Experimental Study

This section reports experimental results for training performance of 9 popular NNBA algorithms and 3 fundamental MSA algorithms on the elongated pipe-like benchmark architectures. The advantages and disadvantages of the tested training algorithms are revealed in training of this benchmark architecture.

3.1. A Comparison of Training Algorithms from Shallow to Deep Training

Artificial neural networks have been widely used for the black-box modeling of the physical and biological systems and they have been implemented in the model-based prediction problems (Chen et al., 2020; Zhao et al., 2020). Due to higher level of complexity and chaotic dynamics, biological system modeling benefits from highly nonlinear function approximation skills of the artificial neural networks. To conduct the training experiments, the body fat rate estimation problem is solved by using body fat data from Matlab. This dataset is composed of 13 anatomical measurements of the human body as input data, and the neural network is trained to predict body fat percentages based on these anatomical features (Zamri et al., 2018). This dataset involves highly nonlinear relations and noisy data, which make it preferable for training algorithm tests.

Figure 4 shows the average MSE performance of NNBA training tests. Figure 5 and Figure 6 illustrate the maximum MSE and the minimum MSE performances of NNBA training processes for 10 repeated tests. A large increase in layer counts cannot consistently improve MSE performance because of emergence of the

gradient vanishing and saturation problems as suggested in remarks of theorem 1. In overall, one can observe that the BFG, LM, CGB and RP backpropagation algorithms provide an improved average MSE performance when training the neural network architectures from 1 layer to 10 layers. However, for 10 repeated tests, the minimum MSE performances are produced by the LM algorithm for all configurations in Figure 6. These results indicate the potential of the LM algorithm to reach the lowest MSE when training of the neural networks is repeated adequately.

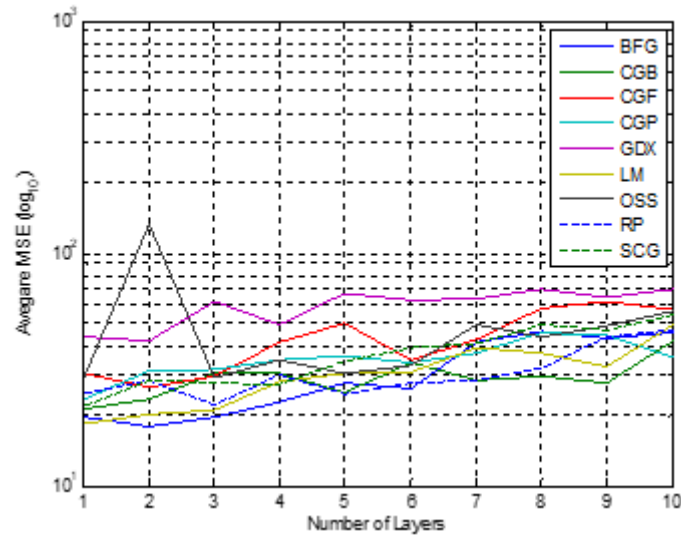


Figure 4. Average MSE Performances of The NNBA Trainings

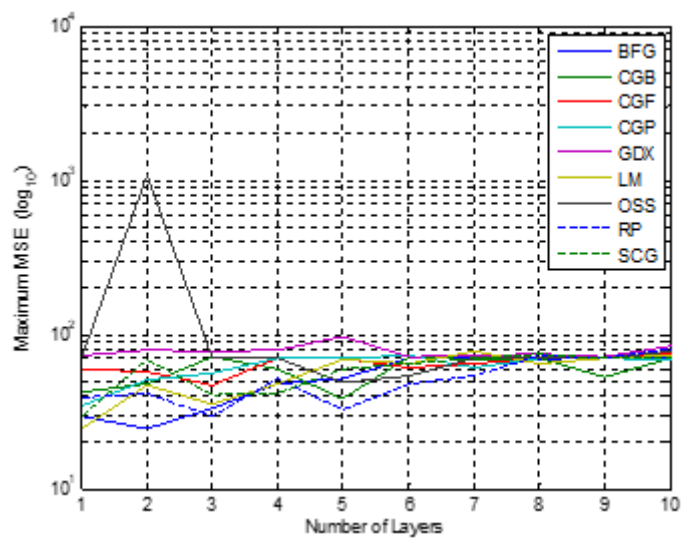


Figure 5. Maximum MSE Performances of The NNBA Trainings

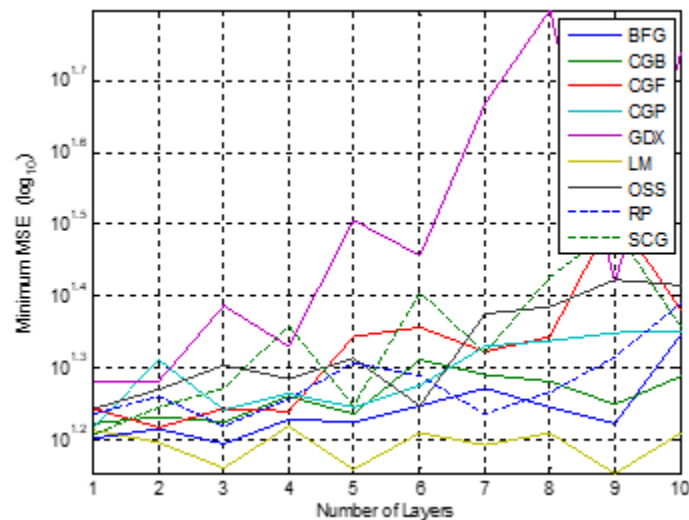


Figure 6. Minimum of MSE performances of the NNBA trainings

Figure 7 shows the average MSE performance of the training tests by using MSAs. Figure 8 and 9 illustrate the maximum MSE and the minimum MSE performances for 10 repeated training tests of each neural network configuration. Increasing the hidden layer number to 2 layers or more severely deteriorated the tested MSE performances because MSAs need much more computation time in searching optimal points as the dimension of search spaces increases. The dimension of search space ($D = \sum_{h=1}^n (k_{(h-1)}k_h + k_h)$) grows

fast with the layer number n in neural networks. Another factor that affects the performance of MSAs is the geometry of search spaces. Loss functions of shallow networks introduce rather multimodal search spaces and a higher exploration skill becomes an advantage to find better solutions, and this effect can increase average performance of search agents in multimodal search spaces. As the number of hidden layers increases in neural networks, the convexity of their search space increases because more hidden layers increase depth and optimization parameters, and accordingly approximation performance of the composite neural network function.

Figure 7 and 8 reveal that the GA can provide better average MSE and maximum MSE performances up to 8 hidden layer networks. A main reason for this result is that the GA is more explorative than swarm-based search algorithms (GWO, PSO) because of randomly applied genetic processes such as random mutation and crossover. These processes occasionally lead to random spreading of population into the search space at each generation, and such dispersion of individuals makes it more probable to find better solutions in multi-modal search space of shallow networks. On the other hand, GWO and PSO algorithms perform more exploitative search because search agents (individuals) of the swarm tend to move towards the best individual. Therefore, minimum MSE performance of GWO and PSO begins to improve after 8 hidden layers in Figure 9 as a result of the increase in convexity of the search space. Due to enhanced exploitation capability of GWO, the GWO algorithm can provide the lowest minimum MSE values when the training is repeated adequately. These results reveal that the GWO algorithm can be advantageous to obtain a minimum MSE in the case that the training of the deep neural networks is repeated.

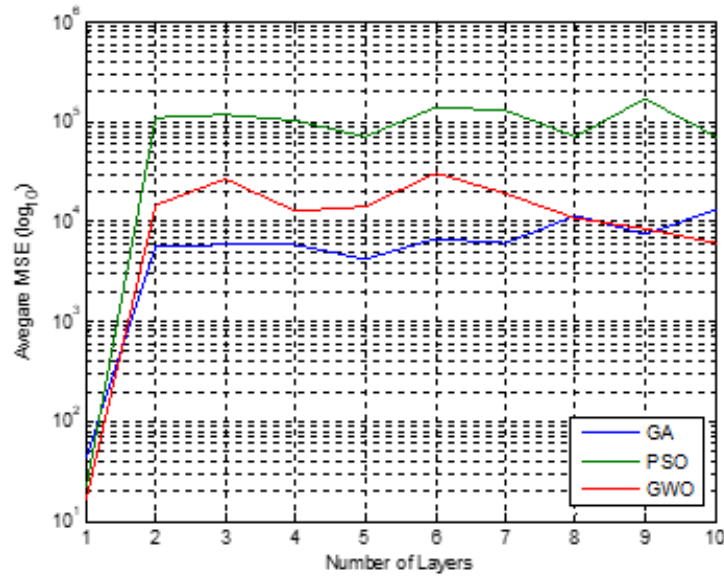


Figure 7. Average MSE Performances of The MSAs

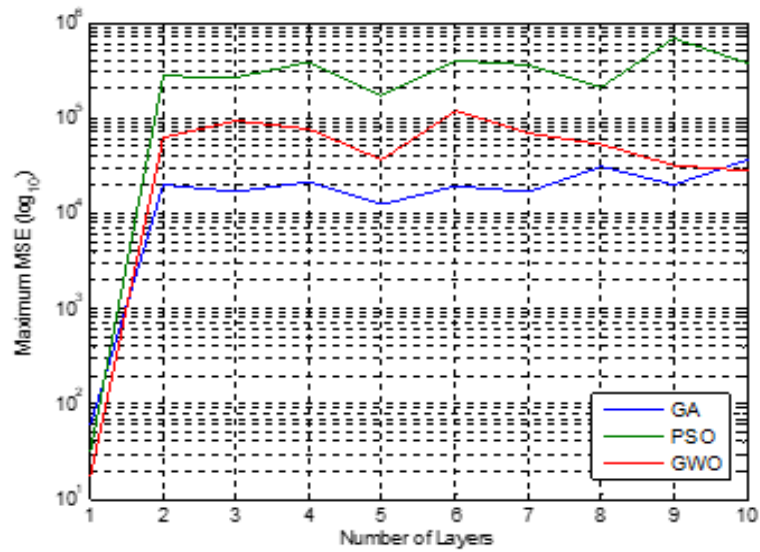


Figure 8. Maximum MSE Performances of The MSAs

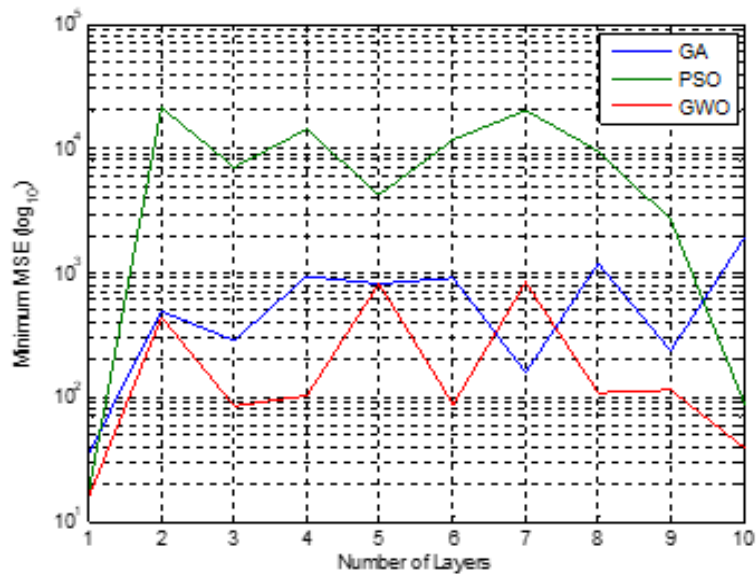


Figure 9. Minimum MSE Performances of The MSAs

The computation time per weight parameter is useful to consider the computation load of an optimization method in the training process. It expresses the average of training time that a training algorithm is used to perform a weight update. It eliminates effects of network depth on training time measurements of algorithms. It is computed by dividing the total computation time (T_c) by the number of weight parameters (N_w) as T_c / N_w . Figure 10 shows the average computation times per weight in the training processes of NNBA. The figure reveals that the BFG training method consumes considerably more time during the training process. Figure 11 shows the average computation times per weight in MSAs during the training process. The figure reveals a lower computation time of the GA algorithm compared to GWO and PSO algorithms in this regression problem because automatic stopping criteria of Matlab ga() can decrease the computation time. GWO and PSO algorithms do not stop before performing the maximum iteration number (Maximum iteration number is 1000 iterations for GWO and PSO). Figure 12 compares NNBA and MSAs in terms of computation time per the weight coefficient. For these network configurations (up to 10 hidden layers), it is apparent that the computation times of MSAs is much higher than those of the NNBA and such a high computation time is another important disadvantage of MSAs for the deep neural network training tasks. A reason for high computation time of MSAs is that MSAs are multi-agent (population-based) search algorithms, and they perform a loss function calculation for each agent of the population. This is an important factor that increases the training time of MSAs depending on the population size. Since population size and iteration numbers of MSAs are the same while the number of layers increases, the computation time per weight is relatively steady in Figure 11.

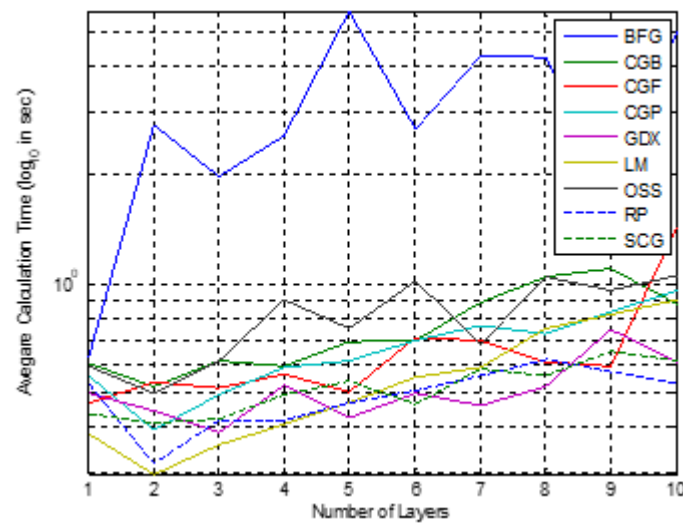


Figure 10. Computation Time (In Sec) During Training of The Neural Network Configurations By using NNBA

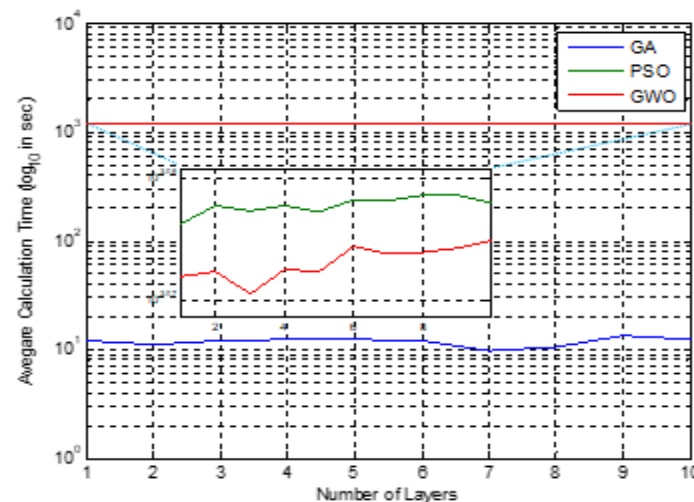


Figure 11. Computation Times (In Sec) During Training of The Neural Network Configurations By Using MSAs

Table 3 lists the training test results of algorithms on a pipe-like deep neural network architecture with 20 hidden layers. In the case of 20 hidden layers, the lowest average MSE is provided by the GWO algorithm

and the lowest maximum MSE is provided by the PSO algorithm as a result of the increased convexity in the search space. On the other hand, due to the gradient vanishing problem of the pipe-like deep neural network, which was analyzed by using Theorem 1, training performances of NNBA can reduce to levels that are comparable with training performances of MSAs. The performance of MSAs deteriorated because of the high-dimensional search space with 646 optimization parameters. However, the lowest minimum MSE is still provided by the LM algorithm (The lower minimum MSE implies accessibility to the best MSE performance in the case of multiple training.) and the lowest standard deviation of the MSE is provided by the CGF algorithm. (The lower standard deviation implies consistency of the MSE performance in multiple tests.) The lowest average computation time per weight is provided by the RP algorithm because The RP uses the sign of the partial derivative of the activation functions and this improves convergence speed however reduces convergence accuracy (Riedmiller and Braun, 1993). Although the lowest average MSE is possible by using the GWO, it's computation time is much higher than all NNBA. Table 3 showed that NNBA methods consume quite less computation time. Deep neural network training applications require faster algorithms in order to process large amounts of data. The speed of training algorithms is an important asset for deep neural network training in big data applications (Zhu et al.,2018).

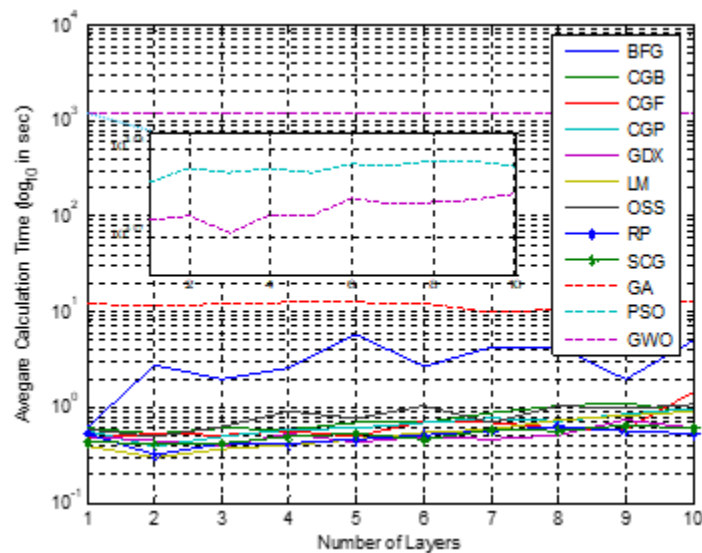


Figure 12. The Computation Time (In Sec) Comparison Between NNBA And MSAs

When an optimization algorithm is developed to be successful in hard-to-training benchmark networks, it will be more specialized and more dedicated for deep neural network training tasks. This unveils a research motivation that the optimization algorithms should be designed dedicated to the neural networks “deep learning dedicated optimization algorithms” in order to surpass the training performance standards of general purpose optimization algorithms.

Table 3. Test Results of The Pipe Architecture Deep Neural Network With 20 Hidden Layers For Analyses Of MSE Performances And Computation Times For 10 Repeated Training (The Number Of Weights To Be Updated At Each Iteration Is 646)

Training Algorithm Types	Algorithm	Average MSE	Maximum MSE	Minimum MSE	Standard Deviation	Average Computation Time (Sec.) Per Weight Update
NNBA	LM	49.26	69.84	16.25	26.56	2.12
NNBA	BFG	54.00	74.24	30.08	15.61	11.28
NNBA	CGB	63.15	70.84	28.08	13.67	1.22
NNBA	CGP	62.60	82.50	28.86	15.09	1.23
NNBA	CGF	69.73	70.14	68.86	0.34	1.07
NNBA	GDX	89.43	259.83	69.78	59.88	1.00
NNBA	OSS	67.84	72.50	45.75	7.82	1.36
NNBA	RP	71.37	74.60	70.18	1.62	0.89
NNBA	SCG	62.60	69.92	43.00	11.52	1.25
MSA	GA	73.30	106.95	46.65	18.32	129.11
MSA	PSO	52.30	60.16	44.17	5.14	20964.90
MSA	GWO	43.26	66.89	31.30	10.21	20698.54

3.2. Overall Performance Analysis and Criterion-based Selection of Training Algorithms

For criterion-based assessment on the practical effectiveness of training algorithms, a normalized overall performance scoring (NOPS) is adopted to statistical properties in Table 3 as follows:

$$NOPS = \sum_{i=1}^p W_i \frac{P_i}{\sum_{j=1}^m P_j} \quad (9)$$

where the parameter P_i , $i = 1, 2, \dots, p$ stands for the value of the properties (performance indices) in the analyses of m different algorithm options. Authors used 5 properties to evaluate training algorithm performance ($p = 5$). Accordingly, the property P_1 is the average MSE value, the property P_2 is the maximum MSE value, the property P_3 is the minimum MSE value, the property P_4 is the standard deviation and the property P_5 is the average computation time per weight. Previously, the weighted sum formula has been considered for decision-making problems (Stanujkic and Zavadskas, 2015 ; Goh et al., 1996). We modified it for the criterion-based selection of the training algorithms by using importance weighting. It should be noticed that all properties should be minimized for a desirable performance in this training algorithm selection problem. Therefore, an algorithm with a lower NOPS is better in criterion-based overall performance. The parameter W_i stands for the importance weight of the property i and the importance

weight should satisfy the normalization condition $\sum_{i=1}^p W_i = 1$ to perform a weighted average. For the equal

importance of the properties, the importance weight is set to a constant value of $W_i = \frac{1}{p}$. Table 4 and Table

5 show NOPS lists of NNBA and MSAs for three type importance weighting: the equal importance weights with $W_i = [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2]$, the NOPS_1 importance weights with $W_i = [0.4 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.0 \ 0.3]$ (it attributes more importance for average and minimum MSE performances to express accuracy and for computation time to express speed of the training algorithms) and NOPS_2 importance weights with $W_i = [0.4 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.3 \ 0.3]$ (it attributes more importance for average MSE and standard deviation to express accuracy and consistency and for computation time to express speed of the training algorithms). Due to their higher speed and accuracy requirements, NOPS_1 can be preferable for training algorithm selection tasks of deep learning applications for big data analytics. Since MSAs have very high computation time, NOPS calculations were separately performed for NNBA and MSAs categories. According to the NOPS analyses, the LM, CGB and CGP training algorithms can be advantageous for speed and accuracy requirements due to their low scores in Table 4. Improvements on nonlinear optimization (Marquardt, 1963) can contribute to NNBA. Among the tested MSAs in Table 5, GA algorithms can be useful in terms of speed and accuracy weighting. However, one should consider that these MSAs have extremely high computation time as shown in Table 3, and they are not effective for deep neural network training.

Table 4. NOPS Analyses of NNBA For The Pipe Architecture Deep Neural Network With 20 Hidden Layers

Training Algorithm Types	Algorithm	NOPS for Equal Importance	NOPS_1 for Speed and Accuracy Importance	NOPS_2 for Speed and Consistency Importance
NNBA	LM	0.0608	0.0795	0.1155
NNBA	CGB	0.0552	0.0823	0.0869
NNBA	CGP	0.0591	0.0838	0.0894
NNBA	SCG	0.0583	0.0897	0.0827
NNBA	OSS	0.0572	0.0965	0.0805
NNBA	RP	0.0612	0.1047	0.0640
NNBA	CGF	0.0581	0.1049	0.0629
NNBA	GDX	0.1629	0.1402	0.1927
NNBA	BFG	0.0563	0.2184	0.2254

Table 5. NOPS Analyses of MSAs For The Pipe Architecture Deep Neural Network With 20 Hidden Layers

Training Algorithm Types	Algorithm	NOPS for Equal Importance	NOPS_1 for Speed and Accuracy Importance	NOPS_2 for Speed and Consistency Importance
MSA	GA	0.0773	0.2967	0.3378
MSA	GWO	0.1598	0.3309	0.3420
MSA	PSO	0.1476	0.3724	0.3202

3.3. A Discussion on Experimental Results:

Some significant observations from experimental results can be summarized as

(i) For training of the shallow networks with a hidden layer of 5 neurons, MSE performances of the tested NNBA and MSAs are comparable. However, when two or more hidden layers were added to the network, MSE values of the MSAs sharply increased and the training performances severely deteriorated. While increasing the hidden layer numbers, MSE performances of NNBA rather slowly deteriorate because the gradient vanishing problem gradually becomes effective as the layer number increases as suggested by Theorem 1. Therefore, authors concluded that the tested MSAs are suitable for the training of shallow neural networks. This shortcoming is mainly caused by the fact that the tested MSA methods are practicable for low dimensional optimization problems (Fong et al., 2018). An increase in hidden layers largely increases the number of weight and bias coefficients, namely the dimension of the search space of the loss function. For this reason, in order to train deep neural networks via MSAs, it is necessary to design algorithms that can be particularly effective for high dimensional optimization problems. Consequently, research efforts on high dimensional optimization problems will be very strategic for the deep learning research community. Authors anticipated that development of deep learning dedicated optimization methods can be more effective than the adaptation of general purpose optimization methods for neural network training. In a recent work, Manoharan et al. discussed performance improvement of neural network dedicated metaheuristics for several datasets (Manoharan and Sathesh, 2020). MSAs were preferably utilized in network architecture optimization problems because architecture optimization introduces lower-dimensional optimization problems compared to training tasks. MSAs can more effectively optimize hyperparameters of neural networks such as layer numbers, neuron numbers and configuration of neural elements. Several works have discussed benefits of such neuroevolutionary approaches in deep learning (Stanley et al., 2019; Floreano et al., 2008; Suganuma, 2017; Ding et al., 2013; Galván and Mooney, 2021).

(ii) The computation load of the MSAs is much larger than those of the tested NNBA. This is another substantial shortcoming of MSAs in the training of deep neural networks. The main reason is that metaheuristic optimization commonly uses multi-agents (population) global search techniques. NNBA use the single search agent and perform the local search according to the gradient direction. This property of NNBA becomes an advantage for reduction of algorithmic computation complexity and it can significantly reduce the computation load of the training process. Nonetheless, low average MSE results of GWO in Table 3 can support the idea, suggesting that the gradient free metaheuristic search can be a solution to deal with the complications associated with the gradient-based deep neural network training, such as the gradient vanishing and gradient exploding problems. However, the computation time of GWO is severely high, which becomes an important disadvantage for deep learning applications.

For consistent evaluation of training algorithms, hyperparameters of each training algorithm type have been configured to similar values. Some significant hyperparameters of the training algorithms are summarized in Table 6. Upper and lower bounds of weight coefficients are important parameters because they can affect the training performance for MSA methods. When these bounds are set symmetrical in positive and negative ranges, MSAs can obtain both negative and positive weight coefficients in the optimization stage. Besides, we configured the upper and lower bounds of weight coefficients in the narrow range of $[-10, 10]$ as in Table 6. This can lead to a regularization effect (data generalization) in the neural learning process by preventing large differences between weight coefficients. Since the number of optimized weight coefficients in the training process exponentially grows the search space of MSAs, population size of MSAs can be increased to maintain the search performance for large search spaces.

Table 6. Hyperparameter Setting of Training Algorithms

Training Algorithm Types	Algorithm	HyperParameter Setting
NNBA	LM, BFG, CGB, CGP, CGF, GDX, OSS, RP, SCG	Number of epoch: 200, Minimum gradient magnitude: 1e-20, Error goal: 0, Numbers of neurons in hidden layers are 5, Activation function in hidden layers is hyperbolic tangent sigmoid transfer function, Activation function in output layer is linear transfer function, Number of weight coefficient: 646.
MSA	GA	Iteration number: Default stopping criteria of Matlab ga() function is used, Population size: 200, Number of parameters (dimension of optimization): 646, Lower bound of parameters: -10, Upper bound of parameters:10.
MSA	PSO	Maximum iteration number: 1000, Population size: 200, Number of parameters (dimension of optimization): 646, Lower bound of parameters: -10, Upper bound of parameters:10, Damping Ratio: 0.99, Personal Acceleration Coefficient: 2, Social Acceleration Coefficient: 2.
MSA	GWO	Maximum iteration number: 1000, Population size: 200, Number of parameters (dimension of optimization): 646, Lower bound of parameters: -10, Upper bound of parameters:10.

4. Conclusions

This study introduced the pipe-like neural network benchmark architecture and performance analysis results of popular training algorithms were reported for different depths of the generic pipe-like neural network architecture. Training difficulties of this network were theoretically demonstrated by extending the learning channel theory to an aggregated one-neuron learning channel conjecture in Theorem 1. The weight update bounds of aggregated one-neuron learning channels and gradient vanishing problem of pipe-like deep networks were analyzed for a fundamental neuron model. In the experimental studies, training processes of a pipe-like deep neural network took several weeks run-time for a high performance computer (Intel I7 processors and 16 GB RAM) without interruptions.

Some remarks and suggestions can be summarized as follows:

* Upper bounds theorem of training performance demonstrated training complications of the pipe-like neural network benchmark architecture on the basis of learning channel theorem, and the experimental study validates these performance complications for 9 popular NNBA algorithms and 3 fundamental MSA algorithms.

* A major weaknesses of the tested popular NNBA algorithms originates from decrease of sensitivity function magnitudes $\left(\left| \frac{\partial E}{\partial w^h} \right| \right)$ through hidden layers according to remarks of Theorem 1. This effect causes

severe attenuation of backward error signal propagation in the deep neural networks for backpropagation algorithms. Possible solutions to this problem may be reducing of gradient dependence of optimization methods (e.g., use of gradient-free optimization methods (Sexton and Gupta, 2000; Che et al., 2011; Gudise and Venayagamoorthy, 2003; Ince et al., 2010; Mosavi et al., 2016)), implementation of gradient magnitude balancing mechanisms to regulate backward error propagation (e.g., adjustment of additional gain coefficients (Roodschild et al., 2020) to balance gradient magnitudes through hidden layers), improving activation function (Kim, 2017; Oostwal et al., 2019) to enhance gradient magnitude of the activation function $\left(\left| \frac{\partial \varphi^h}{\partial v^h} \right| \right)$.

*An essential shortcoming of the tested popular MSA algorithms is related to a high increase of computation burden as the dimension of optimization problems (the number of parameters to optimize) increases. Dimension of optimization problem for the training of neural networks grows very fast as the layer number increases. Population sizes and iteration numbers of MSAs should be increased to deal with the high dimension issue, however this can severely increase the computation time and cause the tested MSAs to be impractical for the deep neural network training task. Possible solutions of this problem may be enhancement of search strategies by specializing them to perform more effective searching on neural network function types. Such metaheuristics are referred to as deep learning dedicated MSAs.

The current study introduced a hard-to-train benchmark network that can be utilized as a test bench for development of training algorithms. Future works can address designing and testing of the deep learning dedicated optimization algorithms by using a pipe-like neural network test benches.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Aliev, R.A., Fazlollahi, B., Guirimov, B.G., Aliev, R.R., 2008. Recurrent Fuzzy Neural Networks and Their Performance Analysis. in: *Recurr. Neural Networks, InTech*. <https://doi.org/10.5772/5540>.
- Arifovic, J., Gençay, R., 2001. Using genetic algorithms to select architecture of a feedforward artificial neural network. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.*, 289:574–594. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(00\)00479-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(00)00479-9).
- Awolusi, T.F., Oke, O.L., Akinkulore, O.O., Sojobi, A.O., Aluko, O.G., 2019. Performance comparison of neural network training algorithms in the modeling properties of steel fiber reinforced concrete. *Heliyon* 5:e01115. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01115>.
- Bahrami, M., Akbari, M., Bagherzadeh, S.A., Karimipour, A., Afrand, M., Goodarzi, M., 2019. Develop 24 dissimilar ANNs by suitable architectures & training algorithms via sensitivity analysis to better statistical presentation: Measure MSEs between targets & ANN for Fe–CuO/Eg–Water nanofluid. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 519:159–168. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.12.031>.
- Bala, J.W., Analytics, D., Bloedorn, E., Bratko, I., 1992. The MONK's Problems A Performance Comparison of Different Learning Algorithms. <http://robots.stanford.edu/papers/thrun.MONK.html> Accessed 05 August 2021.
- Battiti, R., 1992. First- and Second-Order Methods for Learning: Between Steepest Descent and Newton's Method. *Neural Comput.*, 4:141–166. <https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.2.141>.
- Beale, E.M.L., 1972. A derivation of conjugate gradients. in F.A. Lootsma, Ed., *Numerical methods for nonlinear optimization*, Academic Press, London, 39–43.
- Birattari, M., Kacprzyk, J., 2009. *Tuning metaheuristics: a machine learning perspective*, Springer, Berlin.
- Can, A., Dagdelenler, G., Ercanoglu, M., Sonmez, H., 2019. Landslide susceptibility mapping at Ovacık-Karabük (Turkey) using different artificial neural network models: comparison of training algorithms. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 78:89–102. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1034-3>.
- Caruana, R., Niculescu-Mizil, A., 2006. An empirical comparison of supervised learning algorithms. *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, 148:161–168. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143865>.
- Che, Z.G., Chiang, T.A., Che, Z.H., 2011. Feed-forward neural networks training: a comparison between genetic algorithm and back-propagation learning algorithm. *International Journal of Innovative Computing Information and Control* , 7(10), 5839–5850.
- Chen, Z., Ashkezari, A.Z., Tlili, I., 2020. Applying artificial neural network and curve fitting method to predict the viscosity of SAE50/MWCNTs-TiO₂ hybrid nanolubricant. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.*, 549:123946. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123946>.
- Chopard, B., Tomassini, M., 2018. Performance and limitations of metaheuristics. in: *Nat. Comput. Ser.*, Springer Verlag, 191–203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93073-2_11.
- Coleman, C., Narayanan, D., Kang, D., Zhao, T., Zhang, J., Nardi, L., Bailis, P., Olukotun, K., Zaharia, C.M., 2017. DawnBench: An end-to-end deep learning benchmark and competition, Training. In *NIPS ML Systems Workshop*.
- Cömert, Z., Kocamaz, A., 2017. A Study of Artificial Neural Network Training Algorithms for Classification of Cardiocography Signals. *Bitlis Eren Univ. J. Sci. Technol.*, 7 , 93–103. <https://doi.org/10.17678/beuscitech.338085>.
- Csaji, B.C., 2001. Approximation with Artificial Neural networks, Faculty of Science; Eötvö Lorand University, Hungary.
- Dennis, J.E., Schnabel, R.B., 1996. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. Society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM. <https://doi.org/10.1137/1.9781611971200>.
- Deng, L., Yu, D., 2013. Deep learning: Methods and applications, *Found. Trends Signal Process.* 7:197–387. <https://doi.org/10.1561/20000000039>.
- Ding, S., Li, H., Su, C., et al., 2013. Evolutionary artificial neural networks: a review. *Artificial Intelligence Review*, 39:251–260. <https://doi.org/10.1007/s10462-011-9270-6>.
- Faris, H., Aljarah, I., Al-Betar, M.A., Mirjalili, S., 2018. Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications. *Neural Comput. Appl.*, 30:413–435. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3272-5>.
- Fletcher, R., 1964. Function minimization by conjugate gradients. *Comput. J.*, 7:149–154. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.149>.
- Floreano, D., Dürr, P., Mattiussi, C., 2008. Neuroevolution: from architectures to learning. *Evolutionary intelligence*, 1(1), 47–62.
- Fong, S., Deb, S., Yang, X.S., 2018. How meta-heuristic algorithms contribute to deep learning in the hype of big data analytics. *Adv. Intell. Syst. Comput.*, 518:3–25. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3373-5_1.
- Galván, E., Mooney, P., 2021. Neuroevolution in deep neural networks: Current trends and future challenges. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2: 476–493. <https://doi.org/10.1109/TAI.2021.3067574>.
- Ghasemiyeh, R., Moghdani, R., Sana, S.S., 2017. A Hybrid Artificial Neural Network with Metaheuristic Algorithms for Predicting Stock Price. *Cybern. Syst.*, 48:365–392. <https://doi.org/10.1080/01969722.2017.1285162>.

- Glorot, X., Bengio, Y., 2010. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, PMLR 9:249-256.
- Gogna, A., Tayal, A., 2013. Metaheuristics: Review and application. *J. Exp. Theor. Artif. Intell.*, 25:503-526. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2013.782347>.
- Goh, C.H., Tung, Y.C.A., Cheng, C.H., 1996. A revised weighted sum decision model for robot selection. *Comput. Ind. Eng.*, 30:193-199. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(95\)00167-0](https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00167-0).
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., 2016. *Deep Learning*, MIT Press.
- Gudise, V.G., Venayagamoorthy, G.K., 2003. Comparison of particle swarm optimization and backpropagation as training algorithms for neural networks. in: 2003 IEEE Swarm Intell. Symp. SIS 2003 - Proc., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003:110-117. <https://doi.org/10.1109/SIS.2003.1202255>.
- Gunantara, N., Nurweda, Putra I.D.N., 2019. The Characteristics of Metaheuristic Method in Selection of Path Pairs on Multicriteria Ad Hoc Networks. *J. Comput. Networks Commun.*, 2019:7983583. <https://doi.org/10.1155/2019/7983583>.
- Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H., 1996. *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing.
- Hagan, M.T., Menhaj, M.B., 1994. Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm. *IEEE Trans. Neural Networks*, 5:989-993. <https://doi.org/10.1109/72.329697>.
- Hinton, G.E., Salakhutdinov, R.R., 2006. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science* 313:504-507. <https://doi.org/10.1126/science.1127647>.
- Hornik, K., 1991. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 4:251-257. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(91\)90009-T](https://doi.org/10.1016/0893-6080(91)90009-T).
- Igel, C., 2014. No free lunch theorems: Limitations and perspectives of metaheuristics. In *Theory and principled methods for the design of metaheuristics*. Springer, Berlin.
- Ince, T., Kiranyaz, S., Pulkkinen, J., Gabbouj, M., 2010. Evaluation of global and local training techniques over feedforward neural network architecture spaces for computer-aided medical diagnosis. *Expert Syst. Appl.*, 37:8450-8461. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.033>.
- Isik, P.X., Sadowski, P., 2016. A theory of local learning, the learning channel. and the optimality of backpropagation. *Neural Netw.*, 83:51-74. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2016.07.006>
- Karim, H., Niakan, S.R., Safdari, R., 2018. Comparison of neural network training algorithms for classification of heart diseases. *IAES Int. J. Artif. Intell.*, 7:185-189. <https://doi.org/10.11591/ijai.v7.i4.pp185-189>.
- Kim, P., 2017. *Matlab Deep Learning With Machine Learning*. Neural Networks and Artificial Intelligence, Apress.
- Kratsios, A., Bilkoctov, E., 2020. Non-Euclidean Universal Approximation. arXiv preprint arXiv:2006.02341.
- Manoharan, S., Sathesh, A., 2020. Population Based Meta Heuristics Algorithm for Performance Improvement of Feed Forward Neural Network. *Journal of Soft Computing Paradigm*, 2(1), 36-46. <https://doi.org/10.36548/jscp.2020.1.004>.
- Marquardt, D.W., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 11:431-441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.
- Martens, J., 2010. Deep learning via hessian-free optimization. in *ICML*, 27:735-742.
- Mhaskar, H., Liao, Q., Poggio, T., 2016. Learning Functions: When Is Deep Better Than Shallow. arXiv preprint arXiv:1603.00988.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., 2014. A. Lewis, Grey Wolf Optimizer. *Adv. Eng. Softw.*, 69:46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- Michalewicz, Z., 1992. *Genetic algorithm + data structures = evolutionary programs*. Springer-Verlag, New York.
- Melanie, M., 1996. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, Cambridge.
- Moller, M.F., 1993. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural Networks*, 1993:6525-533. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(05\)80056-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(05)80056-5).
- Mosavi, M.R., Khishe, M., Ghamgosar, A., 2016. Classification Of Sonar Data Set Using Neural Network Trained By Gray Wolf Optimization. *Neural Netw. World*. 26:393-415 <https://doi.org/10.14311/nnw.2016.26.023>.
- Oostwal, E., Straat, M., Biehl, M., 2019. Hidden Unit Specialization in Layered Neural Networks: ReLU vs. Sigmoidal Activation. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl*, 564:125517. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125517>.
- Pan, X., Lee, B., Zhang, C., 2013. A comparison of neural network backpropagation algorithms for electricity load forecasting. In 2013 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES), 22-27.
- Parejo, J.A., Ruiz-Cortés, A., Lozano, S., Fernandez, P., 2012. Metaheuristic optimization frameworks: A survey and benchmarking. *Soft Comput.*, 16:527-561. <https://doi.org/10.1007/s00500-011-0754-8>
- Powell, M.J.D., 1977. Restart procedures for the conjugate gradient method. *Math. Program*, 12:241-254. <https://doi.org/10.1007/BF01593790>.
- Riedmiller, M., Braun, H., 1993. Direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. in: 1993 IEEE Int. Conf. Neural Networks, Publ by IEEE, 586-591. <https://doi.org/10.1109/icnn.1993.298623>.
- Roodschild, M., Sardiñas, J. G., Will, A., 2020. A new approach for the vanishing gradient problem on sigmoid activation. *Progress in Artificial Intelligence*, 9(4), 351-360.
- Rusiecki, A., 2012. Robust learning algorithm based on iterative least median of squares. *Neural Process. Lett.*, 36:145-160. <https://doi.org/10.1007/s11063-012-9227-z>.
- Scales, L.E., 1985. *Introduction to Non-Linear Optimization*. Springer-Verlag, New York.
- Sexton, R.S., Gupta, J.N.D., 2000. Comparative evaluation of genetic algorithm and backpropagation for training neural networks. *Inf. Sci.*, 129:45-59. [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(00\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(00)00068-2).
- Sewak, M., Sahay, S.K., Rathore, H., 2018. Comparison of deep learning and the classical machine learning algorithm for the malware detection, in: Proc. - 2018 IEEE/ACIS 19th Int. Conf. Softw. Eng. Artif. Intell. Netw. Parallel/Distributed

- Comput. SNPD 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp.293–296. <https://doi.org/10.1109/SNPD.2018.8441123>.
- Schmidhuber, J., 2015. Deep Learning in neural networks: An overview. *Neural Networks* 61:85–117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>.
- Shrestha, A., Mahmood, A., 2019. Review of deep learning algorithms and architectures. *IEEE Access* 7:53040–53065. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912200>
- Stanley, K.O., Clune, J., Lehman, J., Miikkulainen, R., 2019. Designing neural networks through neuroevolution. *Nature Machine Intelligence*, 1(1), 24–35.
- Stanujkic, D., Zavadskas, E.K., 2015. A modified Weighted Sum method based on the decision-maker's preferred levels of performances. *Stud. Informatics Control*. 24:461–469. <https://doi.org/10.24846/v24i4y201510>.
- Strang, G., 2018. The functions of deep learning. *SIAM news.*, 51:1–4.
- Suganuma, M., Shirakawa, S., Nagao, T., 2017. A genetic programming approach to designing convolutional neural network architectures. In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference on - GECCO '17*. ACM Press, New York, New York, USA, 497–504.
- Sussillo, D., Abbott, L.F., 2014. Random Walk Initialization for Training Very Deep Feedforward Networks. arXiv preprint arXiv:1412.6558. <http://arxiv.org/abs/1412.6558> (accessed June 11, 2021).
- Tagluk, M.E., Isik, I., 2019. Communication in nano devices: Electronic based biophysical model of a neuron. *Nano Commun. Netw.*, 19:134–147. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2019.01.006>.
- Thakkar, A., Mungra, D., Agrawal, A., 2020. Sentiment analysis: An empirical comparison between various training algorithms for artificial neural network, *Int. J. Innov. Comput. Appl.*, 11:9–29. <https://doi.org/10.1504/IJICA.2020.105315>.
- Winkler, D.A., Le, T.C., 2017. Performance of Deep and Shallow Neural Networks, the Universal Approximation Theorem. Activity Cliffs, and QSAR, *Mol. Inform.*36. <https://doi.org/10.1002/minf.201600118>.
- Wong, W.K., Ming, C.I., 2019. A Review on Metaheuristic Algorithms: Recent Trends, Benchmarking and Applications, in: *2019 7th Int. Conf. Smart Comput. Commun. ICSCC 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSCC.2019.8843624>.
- Vogl, T.P., Mangis, J.K., Rigler, A.K., Zink, W.T., Alkon, D.L., 1988. Accelerating the convergence of the back-propagation method. *Biol. Cybern.*, 59:257–263. <https://doi.org/10.1007/BF00332914>.
- Zamri, N.B.A., Bhuvanewari, T., Aziz, N.A.B.A., Aziz, N.H.B.A., 2018. Feature selection using simulated Kalman filter (SKF) for prediction of body fat percentage. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Mathematics and Statistics*, 23–27. <https://doi.org/10.1145/3274250.3274264>.
- Zeugmann, T., Poupart, P., Kennedy, J., Jin, X., Han, J., Saitta, L., Sebag, M., Peters, J., Bagnell, J.A., Daelemans, W., Webb, G.I., Ting, K.M., Ting, K.M., Webb, G.I., Shirabad, J.S., Fürnkranz, J., Hüllermeier, E., Matwin, S., Sakakibara, Y., Flener, P., Schmid, U., Procopiu, C.M., Lachiche, N., Fürnkranz, J., 2011. Particle Swarm Optimization. in: *Encycl. Mach. Learn.*, Springer US, Boston, MA, 760–766. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_630.
- Zhao, X., Xia, L., Zhang, J., Song, W., 2020. Artificial neural network based modeling on unidirectional and bidirectional pedestrian flow at straight corridors. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.*, 547:123825. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123825>.
- Zhao, Z., Xin, H., Ren, Y., Guo, X., 2010. Application and comparison of BP neural network algorithm in MATLAB, in: *2010 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA*, 2010: 590–593. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2010.492>.
- Zhu, H., Akrouf, M., Zheng, B., Pelegris, A., Jayarajan, A., Phanishayee, A., Schroeder, B., Pekhimenko, G., 2018. Benchmarking and Analyzing Deep Neural Network Training, in: *2018 IEEE Int. Symp. Workload Charact. IISWC 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018:88–100. <https://doi.org/10.1109/IISWC.2018.8573476>.



GRAFEN OKSİT TAKVİYESİNİN AA1050 METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ELEKTRİKSEL DİRENÇ VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Jülide Hazal ÖZDEMİR¹, Oğuz Kaan ÖZDEMİR¹, Mehmet Fahri SARAÇ^{2*}

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

AA1050,
Grafen Oksit,
Korozyon,
Elektriksel İletkenlik,
Döküm.

Öz

Alüminyum matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla farklı metalik veya seramik oksit katkılı yapıların ilavesinin mekaniksel ve tribolojik özelliklerini incelemek üzere kurgulanmasından dolayı bu tür yapıların farklı fonksiyonel özellikleri hakkında elde edilen bulgular oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu kapsamda üstün elektriksel ve korozif direnç özelliği gösteren karbon türevi yapılardan biri olan grafen oksit yapısının AA1050 matrisi ile etkileşimi oldukça ilgi çekici bir hal almaktadır. Bu çalışmada, mekanik karıştırılmalı döküm yöntemi ile üretilen grafen oksit katkılı AA1050 metal matris kompozitlerin mikroyapı, korozyon ve elektriksel özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. Katı hal yöntemlerinin aksine, sıvı hal yöntemlerinden biri olarak bilinen yarı katı döküm tekniği ile yüksek yüzey alanına sahip grafen oksit yapısı, alüminyum matris içerisinde dağılımının sağlanması için seçilmiştir. Artan katkı miktarına bağlı olarak tane yapılarında uniform olarak dağılan grafen oksitlerin malzemenin elektriksel direncini $1k\Omega$ 'dan $60M\Omega$ 'a yükselttiği tespit edilmiştir. Ayrıca, korozif özelliklerine olan etkisi zamana bağlı potansiyel (OCP), Tafel ve anodik polarizasyon eğrileriyle incelenmiş olup, korozif direncin artan grafen oksit miktarıyla artış gösterdiği belirlenmiştir.

EFFECT OF ELECTRICAL RESISTANCE AND CORROSION PROPERTIES ON GRAFEN ADDED AA1050 METAL MATRIX COMPOSITES

Keywords

AA1050,
Graphene Oxide,
Corrosion,
Electrical Conductivity,
Casting.

Abstract

Since the studies on aluminum matrix composites are mostly designed to examine the mechanical and tribological properties of the addition of different metallic or ceramic oxide added structures, the findings about the different functional properties of such structures are quite limited. In this context, the interaction of the graphene oxide structure, which is one of the carbon-derived structures with superior electrical and corrosive resistance, with the AA1050 matrix becomes very interesting. In this study, changes in microstructure, corrosion and electrical properties of graphene oxide added AA1050 metal matrix composites produced by mechanical stir casting method were investigated. Contrary to solid-state methods, the semi-solid casting technique, known as one of the liquid-state methods, has been chosen to ensure its dispersion in the aluminum matrix of the graphene oxide structure with a high surface area. It has been determined that graphene oxides, which are uniformly dispersed in grain structures due to the increasing amount of additives, increase the electrical resistance of the material from $1k\Omega$ to $60M\Omega$. In addition, the effect on the corrosive properties was investigated by time-dependent potential (OCP), Tafel and anodic polarization curves, and it was determined that the corrosive resistance increased with increasing graphene oxide content.

Alıntı / Cite

Özdemir, J.H., Özdemir, O.K., Saraç, M.F., (2022). Grafen Oksit Katkılı AA1050 Metal Matris Kompozitlerin Elektriksel İletkenliği ve Korozyon Performansı Üzerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1272-1277.

* İlgili yazar / Corresponding author: fahrisarac@sdu.edu.tr, +90-246-211-1230

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
J.H. Özdemir, 0000-0002-2316-7693	Başvuru Tarihi / Submission Date	18.04.2022
O.K. Özdemir, 0000-0003-0251-8615	Kabul Tarihi / Accepted Date	21.04.2022
M.F. Saraç, 0000-0002-0760-5569	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Alüminyum ve alaşımları gibi hafif malzemeler, yüksek özgül kuvvetleri, iyi şekillendirilebilirlikleri ve korozyon dirençleri nedeniyle özellikle otomobil, uçak ve denizcilik sektörlerinde yakıt ekonomisi ve CO₂ salınımının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Narayana vd., 2021). Fakat son yıllarda alüminyum ve alaşımlarından beklenen yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon dirençlerinin karşılanamaması nedeniyle bu yöndeki çalışmalar daha çok alüminyum metal matrisli kompozitlerin (AMMK) geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır (Kandemir, 2018). Bu tür yapılarda nano-boyutta seramik, metal veya karbon esaslı takviye elemanların alüminyum matris içerisine katkılanması sonucu malzemenin mekanik mukavemetini arttırmasına karşılık süneklilik ve kırılma tokluğu özelliklerini azalttığı tespit edilmiştir (Ononiwu vd., 2021). Son yıllarda yapılan çalışmalar genel olarak AMMK tipi yapılarda mekanik özelliklerin iyileştirilmesi üzerine farklı takviye elemanların optimum oranlarının tayini yönünde gerçekleştirilmektedir. Seramik esaslı yapılarda katkı oranı %30 ağırlık oranlarında kullanıldığı görülürken (Şenel ve Gürbüz, 2020), karbon türevi AMMK yapılarına bakıldığında grafen esaslı AMMK yapılarında maksimum %0.50 oranında takviyeli yapılar incelenmiştir (Şenel vd., 2017). Aynı zamanda Cu ve Mn katkılı alüminyum matris yapısına katkılanan grafen nanoplaka oranında maksimum %2 ağırlık oranına kadar çıktığı da görülmüştür (Akçamalı, 2021). İlgili literatürde örneğin, SiC, SiO₂, Al₂O₃ ve B₄C gibi seramik takviye elemanları ile yapılan çalışmalar oldukça geniş yer almaktadır (Narayana vd., 2021). Fakat karbon esaslı takviye elemanların kullanımının seramik esaslı takviye elemanlarıyla kıyaslandığında üstün mekanik, elektriksel ve korozyon direnç özellikleri sağlaması bu tür katkı malzemelerine olan ilginin yoğunlaşmasına sebep olmaktadır (Venkatesan ve Xavier, 2017; Xie vd., 2021; Zheng vd., 2021).

Karbon allotropları ve bunların nano yapıları olarak bilinen karbon nanotüp, fulleren, karbon nanofiber ve grafenler, benzersiz termal, elektriksel, mekanik, tribolojik özellikleri ve korozyon dirençleri nedeniyle AMMK'ler için umut verici takviye malzemeleridir (Hedayatian vd., 2020; Khanna vd., 2021; Pankade vd., 2018). Alüminyumdan daha düşük yoğunluğa sahip olan grafen ve grafen oksitler, yalnızca kompozit bileşenlerin ağırlığını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda mekanik, termal, elektriksel özelliklerini ve korozyon direncini de iyileştirmektedir (Prabhakar vd., 2020). Özellikle, grafen oksitlerde oksijen fonksiyonel gruplarının (hidroksil, karboksil, karbonil ve epoksi) mevcudiyeti, metalik matrisli malzemeler ile iyi bir şekilde etkileşime girmesini ve güçlü bir bağ oluşturmalarını sağlamaktadır (Narayanan vd., 2021a).

AMMK'lerin üretimi katı hal ve sıvı hal olarak bilinen iki ana üretim şeklindedir. Katı hal yöntemi, sınırlı sayıda kompozit bileşen şekli üretmek için kullanılabilir. Buna karşın, karmaşık şekilli bileşenlerin imalatı için uygun değildir (Malik vd., 2020; Narayanan vd., 2021b). Bu nedenle katı hal yöntemi endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılamamaktadır. Geleneksel karıştırılmalı döküm yöntemi ise katı hal tekniğine kıyasla daha basit, esnek, yüksek sıcaklıkta homojen dağılım ve termodinamik kararlılığa sahip olması nedeniyle birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Abdo vd., 2021). Mekanik karıştırılmalı döküm tekniğinin grafen oksit katkılı alüminyum kompozit malzemelerin üretimi için en uygun yöntem olduğunun belirlenmesi nedeniyle sunulan çalışmada tercih edilmiştir.

Akçamalı vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı oranlarda mekanik alaşımlama, soğuk pres ve sonrasında basınçsız sinterleme işlemi ile grafen nanolevhalar ile katkılanmış AMMK yapılarda optimum katkılandırma oranının ağırlıkça %0,50 olduğu ve artan grafen miktarı ile yapıdaki poroziteninde arttığı belirlenmiştir. Artan gözeneklilikle birlikte ise korozyon direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Kumar ve arkadaşlarına (2021) ait bir çalışma ise, ağırlıkça maksimum %2 grafen oksit ve %5 cam fiber katkılı AMMK yapılarının farklı korozyon ortamlarındaki davranışları incelenmiştir. Mekanik karıştırılmalı döküm yöntemi ile yapılan üretim sonucunda korozyon davranışının dislokasyon yoğunluğuna ve malzemenin porozitesine bağlı olduğu vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen literatür taramasında, mekanik karıştırılmalı döküm yöntemi ile grafen oksit katkılı AA1050 kompozitlere ait çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Grafen oksit yapısındaki oksijenin varlığı AMMK'in arayüz bağlarını geliştirerek korozif ortamlardaki malzeme dayanımı ve elektriksel direnci arttırabileceği öngörülmektedir. Farklı karbon bileşikleriyle çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilen karbon katkılı AMMK yapılarda mekanik özelliklerin araştırılmasına karşılık elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci üzerine yapılan çalışmaların oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirdiğimiz çalışmamızda mekanik karıştırılmalı döküm tekniğiyle üretilen grafen oksit katkılı AA1050 kompozit yapısının katkısız ve ağırlıkça %0,25 ve %0,50 katkı oranlarındaki mikroyapısal, elektriksel iletkenlik ve korozyon özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

Hazırlanmış olan Alüminyum esaslı kompozit numunelerin AA1050 matris malzemesi, İSM Dış Ticaret, Türkiye firmasından satın alınmıştır. AA1050 alaşımına ait kimyasal bileşim Tablo 1'de sunulmuştur. Belirtilen alaşımın tercih edilmesinin temel nedeni mümkün olan en yüksek saflıkta alüminyumun grafen oksite karşı gösterdiği etkileşimin incelenbilmesidir. Grafen oksit sentezinde grafit (<20 µm toz), sülfürik asit (H₂SO₄, 98%), sodyum nitrat (NaNO₃), hidrojen peroksit (H₂O₂, 30%) ve potasyum permanganat (KMnO₄, %98) Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir.

Tablo 1. AA1050 Alaşımının Kimyasal Bileşimi, % Ağırlıkça (Chemical Composition of AA1050 Alloy, % Weight)

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	Zn
Kalan	%0,04	%0,25	%0,03	%0,03	%0,20	%0,03	%0,05	%0,04

2.2. Grafen Oksitin Hazırlanması (Preparation of Graphene Oxide)

Takviye elemanı olarak kullanılan grafen oksit geliştirilmiş Hummers yöntemiyle üretilmiştir (Özdemir, 2020). Özetle, 3 g doğal grafit 1°C sıcaklıkta bulunan buz banyosuna yerleştirilen bir beher içerisinde sodyum nitrat (1.2 g) ile 30 dakika boyunca karıştırılmış ve 150 mL sülfürik asit ilave edilmiştir. Ardından grafitin oksitlenmesi amacıyla potasyum permanganat (12 g) ilave edilmiştir. Elde edilen çözelti buz banyosundan çıkarıldıktan sonra 35°C'de 90 dakika boyunca manyetik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından ultra saf su ilavesiyle birlikte sıcaklıkta hızlı bir yükselme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Sıcaklığın 100°C'nin altında kalması sağlanmıştır. Bu işlemlerin ardından 30 dakika daha karıştırılan çözelti, 300 mL ultra saf suyla seyreltilir ve 20 mL %30 hidrojen peroksit ilave edilerek reaksiyon sonlandırılır. Son olarak karışım sırasıyla HCl ve H₂O ile yıkanır, ardından katıyı ayırmak için 4000 rpm hızında 10 dakika boyunca santrifüje tabi tutulur ve gece boyunca 80°C'de vakum altında kurutularak grafen oksit elde edilir.

2.3. Grafen Oksit katkılı AA1050 Üretimi (Production of Graphene Oxide Added AA1050)

Kondöksan firmasında bulunan dökümhanede grafit potası içerisinde ergitilen AA1050 alaşımına grafit problu mekanik karıştırıcı ile ayrı ayrı %0,25 ve %0,50 (%ağ.) grafen oksit eklenmiş ve 4000 rpm hızında 5 dakika karıştırıldıktan sonra hazırlanan 10 mm çapında 10 cm uzunluğundaki boru şeklindeki kalıba dökülerek soğuması beklenmiştir. Devamında her bir çubuktan uzunluğu 10 mm boyutunda numuneler tornada kesilerek korozyon ve elektriksel iletkenlik testleri için hazır hale getirilmiştir.

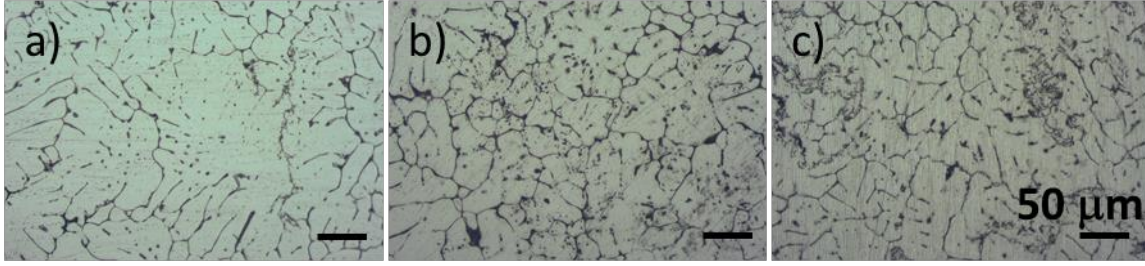
2.4. Karakterizasyon Yöntemleri (Characterization Methods)

Mikroyapısal analizler Nikon marka ECLIPS MA100 model cihazında 200X büyütmede alınmıştır. Korozyon testleri Gamry Interface 1010B potansiyostat/galvanostat ve elektriksel iletkenlik ölçümleri ise dört nokta prob testi ile Twintex marka LCR-7010 model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Saf Al ve Al metal matrisli kompozit numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri geleneksel üç elektrotlu elektrokimyasal hücre aracılığıyla elde edilerek korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve akım değerleri (I_{corr}) kıyaslanmıştır. Referans elektrot olarak Ag/AgCl kullanılmış ve çalışma elektrodunun çözeltiye maruz kalan yüzey alanı 1 cm² olarak belirlenmiştir. Numunelere ait testler 25±1°C sıcaklıkta ve ağırlıkça %3,5'lik NaCl çözeltisi (17,5 gram NaCl tuzu ve 50 ml distile su) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, açık devre potansiyeline göre -250 ila +250 mV potansiyel aralığında 1 mV/s'lik bir tarama hızıyla elde edilmiştir.

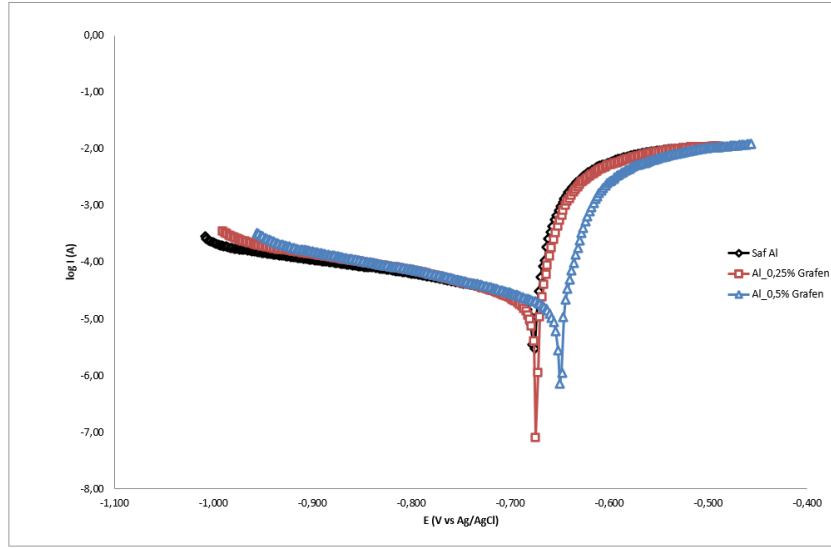
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Saf ve iki farklı kompozisyonda üretilen grafen oksit katkılı AA1050 kompozitlerin mikroyapı incelemeleri Şekil 1'de verilmektedir. Artan grafen oksit miktarına bağlı olarak tane yapılarında görülen siyah noktaların varlığının artması döküm sonrası grafen oksitlerin tane içlerinde uniform dağıldığını ve topaklaşmaya sebebiyet verecek şekilde tane sınırlarına birikmediğini göstermektedir. Bu açıdan mekanik karıştırılmalı döküm yöntemi ile grafen oksitin alüminyum matris içinde homojen dağıldığı belirlenmiştir.

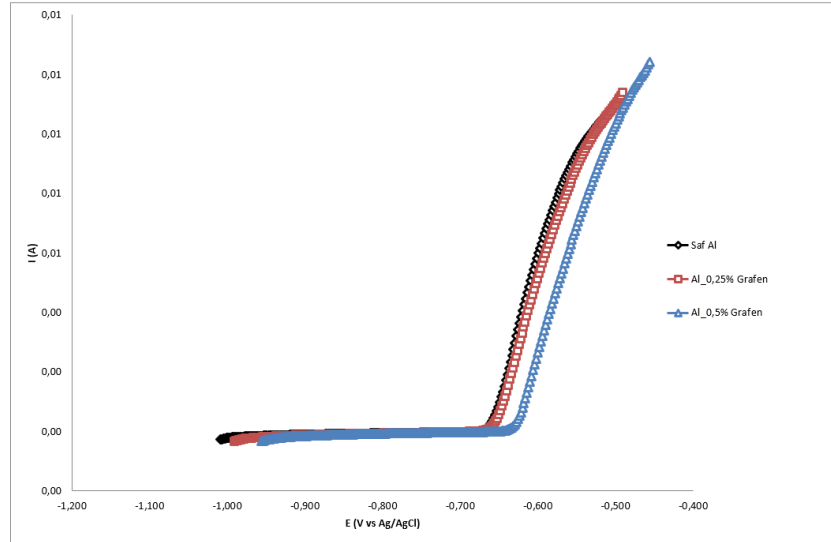


Şekil 1. Saf, %0,25 ve %0,50 Katkılı Grafen Oksit Katkılı AA1050 Kompozitlerin Mikroyapı Görüntüsü (Microstructural View of Pure, 0.25% and 0.50% Graphene Oxide Added AA1050 Composites)

Grafen oksit katkı AA1050 kompozit numunelerin korozyon testleri ile elde edilen Tafel eğrileri ve polarizasyon eğrileri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.



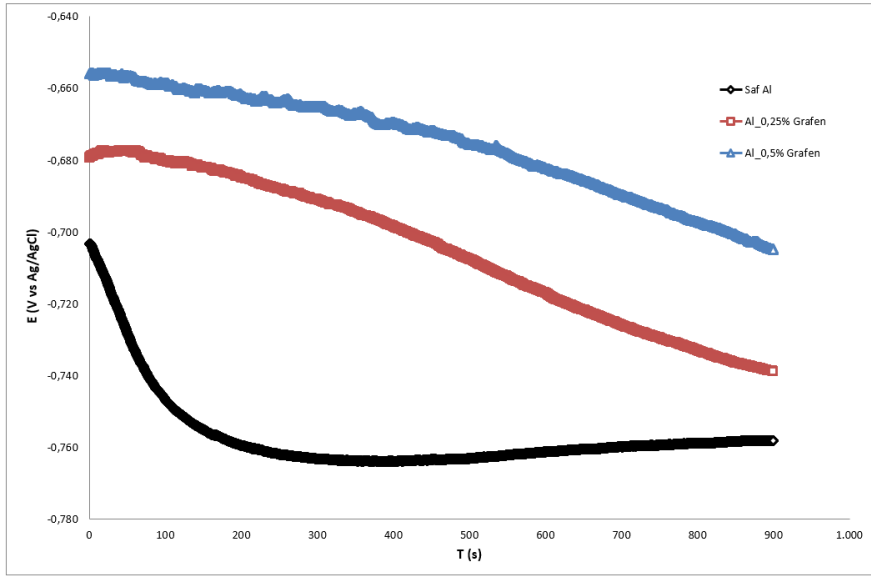
Şekil 2. Grafen Oksit Katkılı AA1050 Kompozitlere Ait Tafel Eğrileri (Tafel Curves of Graphene Oxide Added AA1050 Composites)



Şekil 3. Grafen Oksit Katkılı AA1050 Kompozitlere Ait Anodik Polarizasyon Eğrileri (Anodic Polarization Curves of Graphene Oxide Added AA1050 Composites)

Tafel ve polarizasyon eğrilerine göre en yüksek potansiyele ve en düşük akım değerine sahip olan Al_%0,50 Grafen oksit numunesinin en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelere ait korozyon direnci en yüksekten en düşüğe sırasıyla Al_%0,50 Grafen oksit>Al_%0,25 Grafen oksit>Saf Al olarak sıralanmaktadır.

25±1°C sıcaklıkta ve %3,5 NaCl solüsyonunda farklı oranlarda grafen oksit katkı ve katkısız numunelere ait açık devre potansiyeli-zaman grafiği Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. Grafen Oksit Katkılı AA1050 Kompozitlere Ait Zamana Bağlı Potansiyel Grafiği (Time-Dependent Potential Plot of Graphene Oxide Added AA1050 Composites)

Saf alüminyum numunesinin OCP değerinin aktif yöne kayarken, grafen oksit katkı numunelerde ise daha kararlı bölge yönünde değiştiği görülmektedir. Üç numune kıyaslandığında korozyona karşı direnci ve termodinamiksel kararlılığı en yüksek numunenin Al_%0,50 Grafen oksit kompozit malzemesi olduğu belirlenmiştir. Literatürde grafen oksitin sahip olduğu fonksiyonel gruplar nedeniyle iletkenliğin düşük olduğu bilinmektedir (Nayak vd., 2020). Bu sebep ile yapı içerisinde artan grafen oksit miktarıyla birlikte artan elektriksel direnç değerleri Tablo 2'de verilmekte olup bu değerlendirmeyi doğrulamaktadır.

Tablo 2. Grafen Oksit Katkılı AA1050 Kompozitlerin Elektriksel Dirençleri (Electrical Resistance of Graphene Added AA1050 Composites)

Numune Adı	Direnç (Rp)
AA1050	1.0587 kΩ
Gr. %0,25+AA1050	11.961 MΩ
Gr. %0,50+AA1050	60.045 MΩ

Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında en yüksek dirence sahip Gr. %0,50+AA1050 numunesinin (60.045 MΩ) en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu, elektrokimyasal test sonuçlarıyla uyumlu olarak, belirlenmiştir.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma kapsamında mekanik karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilen katkısız ve ağırlıkça %0,25 ve %0,50 grafen oksit katkı AA1050 kompozit yapısının mikroyapı, elektrik iletkenliği ve korozyona karşı dayanımı incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda, artan grafen oksit miktarlarının alüminyum matris içerisinde homojen dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca yapı içerisine katkılanılan grafen oksitin tane sınırlarında toplanmaması ve numunenin iç yapısındaki homojen dağılım, kullanılan döküm yönteminin metal matrisli kompozitlerin uniform şekilde üretimindeki önemini göstermektedir. Sonuç olarak katkılama ile, artan grafen oksit miktarıyla yapıların korozyon dayanımı ve elektriksel dirençlerinin artması çalışmanın mikroyapı ve özellik ilişkisinin uyumlu olduğunu göstermektedir. Ek olarak, optimum grafen oksit katkılama miktarı, ağırlıkça %0,50 olarak tespit edilmiş ve artan oranların tane sınırlarında toplanmaya sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında elde edilen verilerin, ilerideki çalışmalarda da grafen oksit katkılama miktarının korozyon dayanımı ve elektriksel direnç özellikleri noktasında yön verici olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın döküm işlemleri Kondöksan Döküm firmasında gerçekleştirilmiştir. Dökümhaneyi bizlerin kullanımına açan Levent Çalık ve döküm işlemlerini yapmamızda yardımcı olan Murat Çekici'ye teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdo, H.S., Seikh, A.H., Mohammed, J.A., Soliman, M.S., 2021. Alloying Elements Effects on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Newly Fabricated Al Based Alloys Produced by Conventional Casting Process. *Materials*, 14, 3971.
- Akçamlı, N., Küçükelyas, B., Kaykılarlı, C., Uzunsoy, D., 2019. Investigation of microstructural, mechanical and corrosion properties of graphene nanoplatelets reinforced Al matrix composites. *Materials Research Express*, 6 (11), 115627.
- Akçamlı, N., 2021. Grafen Nano Plakalarla Takviye Edilmiş Al-5,5Cu-0,5Mn Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretim ve Karakterizasyonu. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (2), 403-415.
- Çiğeroğlu, Z., Haşimoğlu, A., Özdemir, O.K., 2020. Synthesis, characterization and an application of graphene oxide nanopowder: methylene blue adsorption and comparison between experimental data and literature data. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42 (5), 771-783.
- Hedayatian, M., Vahedi, K., Nezamabadi, A., Momeni, A., 2020. Microstructural and Mechanical Behavior of Al6061-Graphene Oxide Nanocomposites, *Metals and Materials International*, 26, 760-772.
- Kandemir, S., 2018. Grafen Nanolevha Takviyesinin AlSi10Mg Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 61 (1), 177-187.
- Khanna, V., Kumar, V., Bansal, S.A., 2021. Mechanical properties of aluminium-graphene/carbon nanotubes (CNTs) metal matrix composites: Advancement, opportunities and perspective. *Materials Research Bulletin*, 138, 111224.
- Kumar, L.K.D., Kulkarni, S.S., Deepu, J.N., Subramani, N., Sivaprakash, K., 2021. Investigation of mechanical & corrosion properties of graphene, R-glass fiber reinforced Aluminium 2024 hybrid composites. *Materialstoday:Proceedings*, 43 (2), 1684-1693.
- Malik, V.R., Bajakke, P.A., Jambagi, S.C., Nagarjuna, C., Deshpande, A.S., 2020. Investigating Mechanical and Corrosion Behavior of Plain and Reinforced AA1050 Sheets Fabricated by Friction Stir Processing. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 72 (10), 3582-3593.
- Narayana, K.S.L., Benal, M.M., Shivanand, H.K., 2021. Effect of graphite on aluminium matrix composites fabricated by stir casting route – A review. *Materialstoday: Proceedings*, 45 (1), 327-331.
- Narayanan, S., Sozhamannan, G.G., Hemalatha, K., VELmurugan, K., Venkatachalapathy, V.S.K., 2021. Corrosion and Hardness Behaviour of Al/GO Nanocomposites Processed by the Ultrasonic Gravitational Stir Casting Method. *International Journal of Corrosion*, 6658186, 1-8.
- Narayanan, S., Sozhamannan, G.G., Hemalatha, K., Venkatachalapathy, V.S.K., 2021. Study on pitting corrosion behaviour of graphene oxide reinforced metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 39 (1), 160-164.
- Nayak, P., Polai, B., Mitra, A., Nayak, S.K., 2020. Effect of graphene on the mechanical and conducting properties of aluminium. *Proceedings of the 38th International Conference, Zagreb*, 767-775.
- Ononiwu, N.H., Ozoeqwu, C.G., Madushele, N., Akinlabi, E.T., 2021. Evaluation of particle size distribution, mechanical properties, microstructure and electrochemical studies of AA1050/fly ash metal matrix composite. *Advances in Materials and Processing Technologies*, Baskı aşamasında.
- Pankade, S.B., Khedekar, D.S., Gogte, C.L., 2018. The influence of heat treatments on electrical conductivity and corrosion performance of AA 7075-T6 aluminium alloy, *2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering*, 20, 53-58.
- Prabhakar, G.V.N.B., Dumpala, L., Kumar, N.R., 2020. Investigating Mechanical Properties, Corrosion Resistance and Machining Characteristics of Al5083-Graphene Composites Produced by Friction Stir Processing. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73, 2955-2964.
- Şenel, M.C., Gürbüz, M., Koç, E., 2017. Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (8), 974-978.
- Şenel, M.C., Gürbüz, M., 2020. Al₂O₃ Tanecik Boyutunun ve Katkı Oranının Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Mikro Yayı Üzerine Olan Etkileri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 565-575.
- Venkatesan, S., Xavier, M.A., 2017. Mechanical behaviour of Aluminium metal matrix composite reinforced with graphene particulate by stir casting method. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 10 (1), 1-5.
- Xie, Y., Meng, X., Mao, D., Qin, Z., Wan, L., Huang, Y., 2021. Homogeneously Dispersed Graphene Nanoplatelets as Long-Term Corrosion Inhibitors for Aluminum Matrix Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 32161-32174.
- Zheng, Z., Yang, X.-X., Li, J.-C., Zhang, X.-X., 2021. Muhammad, I., Geng, L. Preparation and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminum composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31 (4), 878-886.



OPTIMIZATION OF ALKALINE-THERMAL HYDROLYSIS TO OBTAIN STRUVITE FROM DIGESTED SLUDGE USING A BOX-BEHNKEN DESIGN: SOLUBILIZATION OF NUTRIENTS AND METALS

Ayla UYSAL*, Mehmet AYDOĞAN

Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Isparta, Türkiye

Keywords

Alkaline-Thermal Hydrolysis, Hydrolyzed Sludge, Nutrients Recovery, Solubilization, Struvite.

Abstract

In this study, we investigated ways by which to optimize metals and nutrients solubilization from sewage sludge using alkaline-thermal hydrolysis and the Box-Behnken design. We also examined through struvite crystallization the recovery of solubilized nutrients from hydrolyzed liquid and determined the effect of NaOH concentration, the liquid/solid ratio, and temperature on the hydrolysis process. Nutrients solubilization was positively affected by decreasing liquid/sludge ratio and increasing NaOH concentration. Ca, Al, and Zn solubilization increased with increasing temperature. The optimum condition for solubilization of nutrients and metals was 0.7 M NaOH and a 5/1 mL/g liquid/solid ratio at 35 °C. EDS analyses of hydrolyzed sludge obtained under optimum conditions showed that the mass percentage of C, P, Fe, Al, and K decreased compared to that of the digested sludge. Under optimum conditions, the removal efficiencies of NH_4^+ and PO_4^{3-} from hydrolyzed liquid by struvite precipitation were 57.43 and 79.22% at a N:Mg:P molar ratio of 1:1:1, and 73.31 and 99.02% at a N:Mg:P molar ratio of 1:1.5:1, respectively. XRD analyses of the dry precipitate showed hazenite in addition to struvite formation at a molar ratio of N:Mg:P of 1:1:1.

BOX-BEHNKEN DİZAYNI KULLANILARAK ÇÜRÜTÜLMÜŞ ÇAMURDAN STRÜVİT ELDE ETMEK İÇİN ALKALİ-TERMAL HİDROLİZİN OPTİMİZASYONU: NÜTRİYENTLERİN VE METALLERİN ÇÖZÜNDÜRÜLMESİ

Anahtar Kelimeler

Alkali-Termal Hidroliz, Hidrolize Edilmiş Çamur, Nutrient Geri Kazanımı, Çözündürme, Strüvit.

Öz

Bu çalışmada, alkali-termal hidroliz ve Box-Behnken dizaynı kullanılarak arıtma çamurundan metallerin ve nütrientlerin çözündürülmesinin optimizasyonu araştırılmıştır. Çözündürülmüş nütrientlerin, hidroliz sıvısından geri kazanımı da strüvit kristalizasyonu ile araştırılmış ve hidroliz prosesi üzerine NaOH konsantrasyonu, sıvı/katı oranı ve sıcaklığın etkileri belirlenmiştir. Nütrientlerin çözündürülmesi, azalan sıvı/katı oranı ve artan NaOH konsantrasyonu ile pozitif olarak etkilenmiştir. Ca, Al ve Zn çözündürülmesi sıcaklık artışı ile artmıştır. Nütrientlerin ve metallerin çözündürülmesi için optimum koşullar 0,7 M NaOH, 5/1 mL/g sıvı/katı oranı ve 35 °C'de olmuştur. Optimum koşullar altında elde edilen hidrolize edilmiş çamurun EDS analiz sonuçları, C, P, Fe, Al ve K kütle yüzde değerlerinin çürütülmüş çamurunkine kıyasla azaldığını göstermiştir. Optimum koşullar altında, strüvit çöktürmesi ile hidroliz sıvısından NH_4^+ ve PO_4^{3-} giderim verimleri sırasıyla N:Mg:P molar oranı 1:1:1 iken %57,43 ve %79,22 ve N:Mg:P molar oranı 1:1.5:1 iken %73,31 ve %99.02 olmuştur. Kuru çökeltinin XRD analizleri, N:Mg:P molar oranı 1:1:1 iken strüvit oluşumuna ek olarak hazenit oluşumunu da göstermiştir.

Alıntı / Cite

Uysal, A., Aydoğan, M., (2022). Optimization of Alkaline-Thermal Hydrolysis to Obtain Struvite from Digested Sludge using a Box-Behnken Design: Solubilization of Nutrients and Metals, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1278-1289.

* İlgili yazar / Corresponding author: aylauysal@sdu.edu.tr, +90-246-211-1280

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Uysal, 0000-0002-4580-4593	Başvuru Tarihi / Submission Date	01.04.2022
M. Aydoğan, 0000-0003-1011-1057	Revizyon Tarihi / Revision Date	28.07.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	28.07.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

Currently, producing chemical fertilizers industrially firmly relies on non-renewable sources of phosphorus (P), like natural deposits of phosphate minerals like apatite rock. A crucial research topic to guarantee the future of global food security requires, instead, an evaluation of renewable resource alternatives to produce fertilizer (Barca et al., 2019). Waste activated sludge contains a significant amount of nutrients, especially nitrogen and phosphorus (Alhraishawi and Aslan, 2022).

One of the most significant issues in wastewater treatment is dealing with waste activated sludge, a rich source of P produced by the action of P-accumulating organisms. Given the expected future depletion of P resources, its recovery from sewage sludge is one very encouraging alternative to eliminate sludge-associated problems (Semerci et al., 2021). Using a chemical wash is the most widespread method used to extract P from waste sludge because it is an inexpensive and simple process (Donatello and Cheeseman, 2013; Meng et al., 2019). Leaching exists when a liquid solution containing a waste and chemicals (acids or bases) flows through the wastes (Sayılğan and Karacan, 2019). Acidic and alkaline solutions can be used to leach P from waste sludge. The potential advantages of both of these washing processes are that they use less energy and produce phosphoric acid and phosphates that can be converted into products with a higher commercial return. These include struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) and hydroxyapatites or calcium phosphates. However, as a result of the leaching process, the leachate includes elements – predominantly Al, Fe and Ca – and heavy metals alongside P, and recovering P from this leachate is a critical issue (Meng et al., 2019).

Thus, the leaching process must use additional process to remove P from the extracted pollutants, by means of solvent extraction (Donatello and Cheeseman, 2013), sequential precipitation (Takahashi et al., 2001), sulfide precipitation (Franz, 2007), ion exchange membrane processes (Uysal et al., 2017), and chemical precipitation of P.

Directly dissolving it in an alkaline solution is an alternative to dissolving P in acid and then separating the dissolved P from the dissolved metals where most metals solubilized in the sludge liquid. It is also possible to directly extract P using sodium hydroxide (NaOH), but only at an efficiency of 40% (Meng et al., 2019). To mitigate this problem, a combined alkaline-thermal hydrolysis is used, which is considered superior to traditional alkaline hydrolysis (Kim et al., 2015; Takahashi et al., 2015). The combination of chemicals and thermal treatment seems to be more favorable than just thermal treatment (Suarez-Iglesias et al., 2017). While there has been widespread study of the use of alkalis to dissolve sludge, they have largely concentrated on dissolving easily biodegradable carbon involving, soluble chemical oxygen demand (SCOD). By contrast, very few have studied the solubility of P (Tolofari et al., 2020; Zin et al., 2021). In addition, studies are limited on P, N, and metal releases from sewage sludge using alkaline-thermal hydrolysis (Semerci et al., 2021). The conditions affecting hydrolysis must be optimized for nutrients recovery from sewage sludge in the form of struvite.

In the present study, we evaluated the effects of NaOH concentration, liquid/solid (L/S) ratio, and temperature on the hydrolysis of digested sludge using the Box-Behnken design. Under our test conditions, release of maximum nutrients and minimum metals were determined. The chemical composition and morphology of the hydrolyzed digested sludge were compared to the digested sludge. P and N from the hydrolyzed liquid obtained under optimum conditions were recovered using struvite crystallization. The precipitate obtained was analyzed.

2.1. Material and Method

2.1. Sludge Sample and Preparation

Anaerobic sludge digester effluent from a municipal wastewater treatment plant based in Antalya, Turkey, using the anaerobic/anoxic/aerobic method (A^2/O) provided the digested sewage sludge samples for this study. After oven drying at a temperature of 103 ± 2 °C for 42 hours, samples were powdered and sieved to a size of 1 mm or less. Subsequently, the sieved samples were stored in plastic bags at room temperature and sealed until the metals, nutrients measurements, and hydrolysis experiments were performed. Table 1 lists the basic attributes of the digested sludge samples used.

Table 1. Basic characteristics of digested sludge samples used in this study

Parameter	Value ^a
pH	7.64 ± 0.2
TS (g/L)	36.45 ± 3.46
TVS (g/L)	25.35 ± 3.04
TCOD (g/L)	51.47 ± 3.49
SCOD (g/L)	1.29 ± 0.05
TN (mg/g)	41.9 ± 1.2
TP (mg/g)	24.75 ± 0.16
Total Metals (mg/g)	
Ca	17.47 ± 0.13
Mg	1.79 ± 0.03
K	4.85 ± 0.04
Na	0.66 ± 0.009
Al	4.83 ± 0.06
Fe	6.19 ± 0.08
Zn	1.59 ± 0.01
Cu	0.12 ± 0.002
Cr	0.04 ± 0.001
Pb	0.014 ± 0.001
Ni	0.02 ± 0.00
Cd	b.d. ^b
Hg	b.d.

^adata: mean ± standard deviation (n = 2); ^bb.d.: below detection limit.

2.2. Alkaline–Thermal Hydrolysis

In alkaline pretreatment, NaOH is most preferred used because of its high solubilization rate with relatively low dosages (de Sousa et al., 2021). Thus, we used NaOH for alkali hydrolysis in the present study.

In our preliminary study (Uysal et al., 2019), the effects of reaction time, temperature, and L/S ratio factors on the hydrolysis of sewage sludge were investigated by maintaining a constant concentration of NaOH (0.5 M). We observed that the effect of reaction time on release of P is insignificant, but that P release was positively correlated with an increase in temperature and a decrease in the L/S ratio; however, we also realized that Fe, Ca, and Zn releases increased with an increase in temperature. The results obtained within the scope of the preliminary study (Uysal et al., 2019) indicated that it was necessary to investigate the effects of NaOH concentration and a low L/S ratio on P release. Because metal releases increased in parallel with the increase in temperature, we planned to work within a lower temperature range in the present study.

Alkaline–thermal hydrolysis was conducted using a magnetic stirrer with hot plate at 250 rpm. Optimization of low metals and high nutrients releases from digested sludge using alkaline–thermal hydrolysis was performed using the Box–Behnken design. We determined the effects of the parameters, such as NaOH concentration (M), L/S ratio (mL/g), and temperature (°C), on the solubilization of metals and nutrients from digested sludge using alkaline–thermal hydrolysis and the Box–Behnken design.

After hydrolysis, the hydrolyzed samples were centrifuged at 9000 rpm for 20 minutes to separate the solid and liquid fractions. Hydrolyzed sludge obtained under optimum experimental conditions was oven-dried overnight at 103 °C, after which the dried hydrolyzed sludge samples were ground.

2.2.1. Box–Behnken Experimental Design and Statistical Analysis

A Box–Behnken statistical experimental design was chosen to be the most suitable method to optimize the chemical and physical processes (Dong et al., 2009). The Box–Behnken design requires fewer iterations compared to central composite designs. As a result, the Box–Behnken design reduced the number of experiments required and the time taken compared to the intensive laboratory studies that would otherwise have been required.

Specifically, a three factor, three-level Box–Behnken design was applied to determine the optimal conditions required for maximum nutrients solubilization and minimum metals solubilization using NaOH–thermal hydrolysis. The number of experiments applied for the three factors was 15. The three independent variables were

studied at three coded levels as -1, 0, and +1. Table 2 shows the levels and experimental range of the three independent variables considered in this study.

Table 2. Levels and variables examined in alkaline-thermal hydrolysis using Box-Behnken design

Coded Levels	Variables		
	NaOH (M), X_1	L/S Ratio (mL/g), X_2	Temperature (°C), X_3
Low Level (-1)	0.3	3/1	35
Center Level (0)	0.5	5/1	50
High Level (+1)	0.7	7/1	65

The data was subjected to regression and graphical analyses using the analysis of variance (ANOVA) component within the Minitab 19 statistical software package (Minitab, Inc., State College, PA, USA) to test for the significance of independent variables and how they interacted with each other. In this study, model results with a 95% confidence level were considered statistically significant. The main effects and interaction effects of the variables were predicted with quadratic polynomial model shown below in Eq. (1):

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \quad (1)$$

where, Y is solubilization of metals or nutrients (mg/L); x_1, x_2, x_3 are coded independent variables; a_0 is constant coefficient; a_1, a_2, a_3 are linear coefficients; $a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{24}$ are interaction coefficients; and a_{11}, a_{22}, a_{33} are quadratic coefficients.

2.3. Struvite Formation from the Hydrolyzed Sludge Liquid

Hydrolyzed liquid obtained optimum test conditions was used in struvite crystallization experiments. For struvite crystallization, batch chemical precipitation experiments were carried out in a volume of 45 mL with a magnetic stirrer. The formation of struvite needs NH_4^+ , PO_4^{3-} , and Mg^{2+} with an ideal molar ratio 1:1:1. Thus, H_3PO_4 and $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were used as additional reagents of PO_4^{3-} and Mg^{2+} to simultaneously recover NH_4^+ and PO_4^{3-} (Zin et al., 2021).

20% NaOH and 1 M hydrochloric acid (HCl) solutions were used to adjust and maintain the sample pH value at the desired level. The precipitation of solid matter from the samples was achieved by stirring for 30 minutes and then leaving for 1 hour. A coarse filter was then used to filter the contents of the beaker. The solid product on the filter was collected and dried at room temperature for 2 days.

2.4. Analytical Procedure

Total nitrogen (TN), total solid (TS), and total volatile solid (TVS) were performed by the procedure identified in the Standard Methods (APHA, 2005). The Hach reactor digestion method was applied to measure of SCOD and total chemical oxygen demand (TCOD). The Hach Nessler method and the Hach ascorbic acid method were used to determine of ammonium ion (NH_4^+) and phosphate ion (PO_4^{3-}), respectively. The process of analyzing the total phosphorus (TP) and total metal contents was to weigh out 1.0 g of the dried digested sludge sample before employing microwave digestion using HCl, nitric acid (HNO_3), and hydrofluoric acid (HF). Following acidic microwave digestion, metals and TP were measured by an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES, Perkin Elmer, DV2100). The hydrolyzed liquids were filtered through a 0.45 μm filter before determining the SCOD, PO_4^{3-} and metal content readings. pH value of the digested sludge was determined by a pH meter (Hanna HI 221).

The morphology and the chemical composition of the dried digested sludge and dried hydrolyzed sludge were performed by a scanning electron microscope (SEM, FEI, Quanta FEG 250) combined with an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). An X-ray diffraction (XRD, Philips, X'Pert Pro) was applied to determine the crystalline structures in the dry struvite precipitate.

3. Experimental Results

3.1. Effect of the NaOH Concentration, L/S Ratio, and Temperature on Solubilization of Nutrients and Metals in Digested Sludge and Statistical Significance

A Box-Behnken design was used to optimize maximum solubilization of NH_4^+ and PO_4^{3-} and minimum solubilization of metals from the digested sludge with an alkaline-thermal process. Table 3 shows the solubilization of metals and nutrients.

As NaOH concentration increased, PO_4^{3-} and NH_4^+ releases increased. Compared to 0.3 M NaOH, 0.7 M NaOH produced a significantly larger release of P. The largest release of PO_4^{3-} (3936 mg/L) was obtained in test 6 with 0.7 M NaOH and 5/1 L/S ratio at 35 °C. Under these conditions, NH_4^+ release was 1527.36 mg/L. Strong alkaline conditions (pH > 11) favor the hydrolysis of organic P compounds (Li et al., 2013; Bi et al., 2014). The pH of the hydrolyzed liquids at the end of all tests was ~10–13.5 for all except test 1. The largest PO_4^{3-} release was in test 6 at 13.33 pH of the liquid phase after hydrolysis. The largest NH_4^+ release (1880 mg/L) was in test 2 with 0.7 M NaOH and a 3/1 L/S ratio at 50 °C. Under these conditions, the release of PO_4^{3-} was 2727 mg/L (Table 3). As shown in Table 3, Mg release was insignificant. Similarly, Semerci et al. (2021) have reported that Mg leaching is insignificant, most likely from precipitation with P under alkaline conditions. Yu et al. (2017) reported that the concentration of Mg in the hydrolysate by hydrothermal treatment is insufficient compared to $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations.

Table 3. Solubilization of metals and nutrients from digested sludge with alkaline-thermal hydrolysis

Test	X_1	X_2	X_3	PO_4^{3-} (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Zn (mg/L)
1	0.3	3/1	50	720	1563.48	<0.1	130.20	1632.00	5072	72.00	2.50	45.70
2	0.7	3/1	50	2727	1880.82	<0.1	101.70	1765.00	10440	103.70	25.30	32.40
3	0.3	7/1	50	1720	1090.05	<0.1	46.40	816.10	4962	25.10	38.40	14.10
4	0.7	7/1	50	1620	1393.20	3.40	109.50	998.90	12150	61.40	188.20	50.80
5	0.3	5/1	35	1224	1201.64	<0.1	74.60	970.20	4658	25.50	7.40	22.50
6	0.7	5/1	35	3936	1527.36	<0.1	65.30	1259.00	11330	61.20	207.70	31.50
7	0.3	5/1	65	1540	1167.45	<0.1	66.10	995.30	4384	33.10	3.00	15.40
8	0.7	5/1	65	2350	1677.00	<0.1	101.20	1187.00	10420	81.20	179.10	65.20
9	0.5	3/1	35	1295	1573.80	<0.1	100.20	1508.00	6121	75.20	6.60	54.00
10	0.5	7/1	35	2310	825.60	<0.1	18.10	780.10	6155	49.90	115.70	21.50
11	0.5	3/1	65	1554	1548.00	<0.1	126.10	1632.00	6215	47.00	6.50	29.70
12	0.5	7/1	65	2552	598.56	<0.1	84.40	922.10	6891	77.50	112.60	40.10
13	0.5	5/1	50	2035	1238.40	<0.1	60.30	1111.00	6137	60.90	21.00	24.40
14	0.5	5/1	50	1835	1180.35	<0.1	58.10	1005.00	5966	55.10	21.20	21.10
15	0.5	5/1	50	2175	1470.60	<0.1	54.50	1074.00	6103	60.00	29.00	21.20

The significance of each coefficient was determined and evaluated using ANOVA (Table 4). Only regression of the significant parameters ($P < 0.05$) was considered in the second-order polynomial model for the solubilization of PO_4^{3-} and NH_4^+ . This is shown in Eqs. (2) and (3):

$$Y_P = 2015 + 679x_1 - 527x_1x_2 \quad (2)$$

$$Y_N = 1296.4 + 182x_1 - 332.3x_2 + 221.2x_1^2 \quad (3)$$

As seen in Eq. (2), NaOH concentration (x_1) and the interaction effect (x_1x_2) on the solubilization of PO_4^{3-} were the significant model terms. As seen in Eq. (3), NaOH concentration (x_1) and L/S ratio (x_2) and the second-degree main effect (x_1^2) on the solubilization of NH_4^+ were the significant model terms. The first-degree main effect importance of (x_3) of temperature on release of PO_4^{3-} and NH_4^+ was lower (Eqs. 2 and 3) than that of the other main effects (x_1 and x_2).

The adequacy of the model was checked by determining the coefficient (R^2). The R^2 values of the models for Y_P and Y_N were 0.8372 and 0.9122, respectively (Table 4). The values for R^2 were sufficiently high enough to validate the models.

Table 4. ANOVA for the second-order polynomial models of release of nutrients

Terms (Coded)	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value	Coefficient
Y_P ($R^2 = 0.8372$)						
Model	9	6880594	764510	2.86	0.13	
Constant					0.001	2015
NaOH concentration	1	3684255	3684255	13.76	0.014	679
L/S ratio	1	454105	454105	1.70	0.249	238
Temperature	1	73920	73920	0.28	0.622	-96
NaOH \times NaOH	1	251	251	0.00	0.977	8
L/S ratio \times L/S ratio	1	39360	39360	1.47	0.279	-327
Temperature \times Temperature	1	211350	211350	0.79	0.415	239
NaOH \times L/S ratio	1	1109862	1109862	4.15	0.097	-527
NaOH \times Temperature	1	904401	904401	3.38	0.125	-476
L/S ratio \times Temperature	1	72	72	0.00	0.988	-4
Residual error	5	1338283	267657			
Lack of fit	3	1279883	426628	14.61	0.065	
Pure error	2	58400	29200			
Total	14	8218878				
Y_N ($R^2 = 0.9122$)						
Model	9	1430954	158995	5.77	0.034	
Constant					0.000	1296.4
NaOH concentration	1	264905	264905	9.62	0.027	182.0
L/S ratio	1	88357	88357	32.08	0.002	-332.3
Temperature	1	2360	2360	0.09	0.782	-17.2
NaOH \times NaOH	1	180589	180589	6.56	0.051	221.2
L/S ratio \times L/S ratio	1	4710	4710	0.17	0.696	-35.7
Temperature \times Temperature	1	56995	56995	2.07	0.210	-124.2
NaOH \times L/S ratio	1	50	50	0.00	0.968	-3.5
NaOH \times Temperature	1	8448	8448	0.31	0.604	46.0
L/S ratio \times Temperature	1	10124	10124	0.37	0.571	-50.3
Residual error	5	137719	27544			
Lack of fit	3	90542	30181	1.28	0.467	
Pure error	2	47177	23589			
Total	14	1568672				

The interactive effects of the variables on PO_4^{3-} release are illustrated in Figs. 1a–c. The release of PO_4^{3-} significantly increased with the increase in NaOH concentration (Fig. 1a). Kim et al. (2015) have similarly reported that an increase in NaOH concentration (0.001, 0.01, 0.1, and 1 N) applied to the waste active sludge positively affects the P release. They reported that the release of TP were 64%, 86% and 90% at 0.02, 0.1 and 1 M NaOH concentrations, respectively. At the L/S ratio below the center point, there was some decrease in PO_4^{3-} release (Fig. 1a). The concentration of NaOH above the center point and the temperature below the center point increased the release of PO_4^{3-} (Fig. 1b). Kim et al. (2015) have reported that the temperature increase (50–80 °C) had an effect on COD, N, and P release at only low NaOH concentrations; however, the effect was not significant at high concentrations. Similarly in the present study, the effect of an increase in temperature on solubilization of PO_4^{3-} was not significant compared to that of an increase in NaOH concentration. The L/S ratio was at the center point, while the PO_4^{3-} release reached the highest value. We observed that the release efficiency decreased to values below and above the central point (Fig. 1c). Similarly, by applying KOH and NaOH alkalis to the sewage sludge, Falayi et al. (2019) found that the release of P increases when the L/S ratio decreases from 0.5 to 0.25%; however, they have noted that P releases decrease at L/S ratios of <0.25%. In the present study, PO_4^{3-} releases decreased at low L/S ratios, which might have been the result of a reduction in mass transfer efficiency because of more solids being available for a fixed quantity of alkali (reagent starvation) (Falayi et al., 2019; Li et al., 2012; Nosrati et al., 2013; Hosseini et al., 2017).

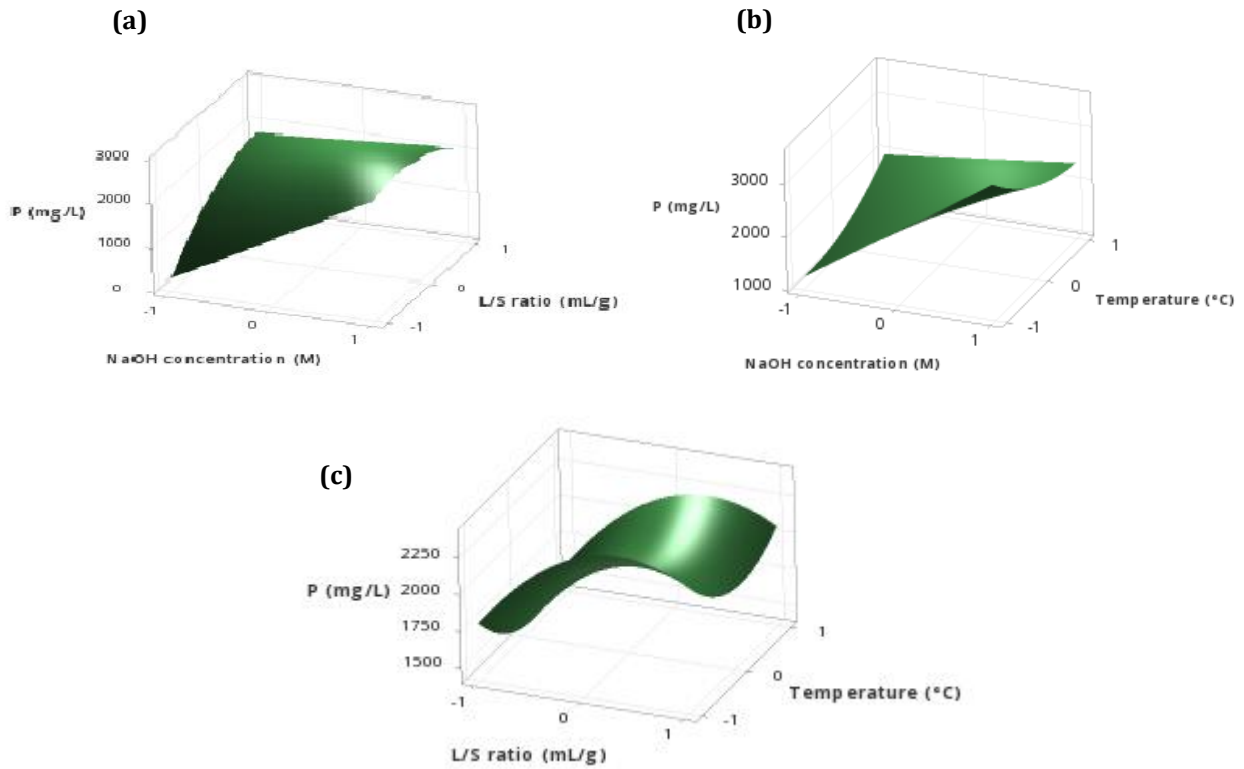


Figure 1. Effects of interaction of (a) NaOH concentration × L/S ratio, (b) NaOH concentration × temperature, and (c) L/S ratio × temperature on P release

The interactive effects of the variables on NH_4^+ release are illustrated in Figs. 2a–c. The release of NH_4^+ increased with the increase in NaOH concentration (Figs. 2a–b). Kim et al. (2015) have similarly reported that TN release increases as the concentration of NaOH applied to the waste active sludge increases. A higher pH caused to more released TN and NH_4^+ because of more releases of nitrogenous organic compounds from the sludge (Xu et al., 2018). As the L/S ratio increased, NH_4^+ releases decreased (Fig. 2a). Although NH_4^+ releases increased significantly with the decreasing L/S ratio, we observed that the effect of temperature changes on NH_4^+ releases was not significant. A slight decrease in NH_4^+ release was observed at temperatures above and below the central point (Fig. 2c).

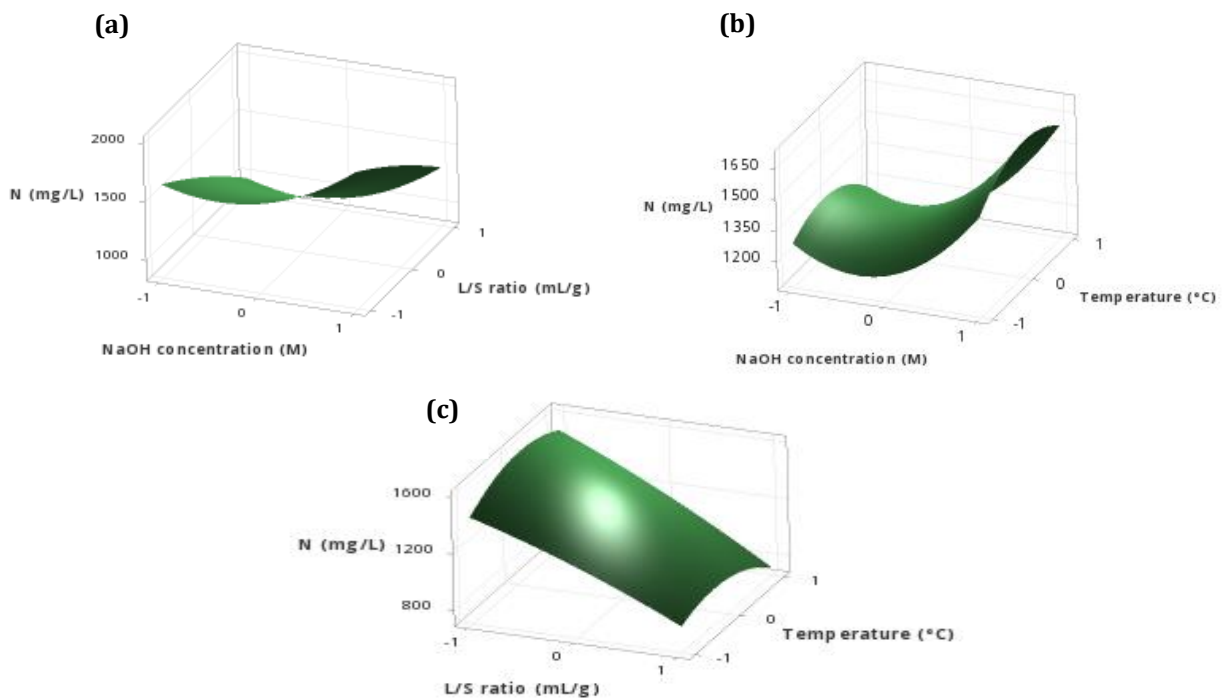


Figure 2. Effects of interaction of (a) NaOH concentration × L/S ratio, (b) NaOH concentration × temperature, and (c) L/S ratio × temperature on N release

Metals and PO_4^{3-} and NH_4^+ were released in all the hydrolysis tests; however, Mg release was comparatively low (Table 3). The R^2 value shows how good a fit the model is in determining the solubilization of metals (Y). The regression models presented were shown to be statistically significant and therefore valid for predicting the solubilization of the following metals: $R^2_{\text{Fe}} = 0.8044$, $R^2_{\text{K}} = 0.9826$, $R^2_{\text{Na}} = 0.9933$, $R^2_{\text{Ca}} = 0.9392$, $R^2_{\text{Al}} = 0.9317$ and $R^2_{\text{Zn}} = 0.9074$. The second-order polynomial model for metals solubilization in terms of coded factors was regressed by considering only the significant terms, as shown in Eqs. (4) and (9):

$$Y_{\text{Fe}} = 58.67 + 18.98x_1 \quad (4)$$

$$Y_{\text{K}} = 1063.3 + 99.5x_1 - 3377.5x_2 + 173.7x_2^2 \quad (5)$$

$$Y_{\text{Na}} = 6069 + 3158x_1 + 289x_2 + 1720x_1^2 + 455x_1x_2 \quad (6)$$

$$Y_{\text{Ca}} = 57.63 - 24.97x_2 + 14.95x_3 + 16.96x_1^2 + 22.36x_2^2 + 22.90x_1x_2 \quad (7)$$

$$Y_{\text{Al}} = 23.7 + 68.6x_1 + 51.8x_2 + 39.4x_1^2 + 36.2x_3^2 \quad (8)$$

$$Y_{\text{Zn}} = 22.23 + 10.28x_1 + 12.50x_1x_2 + 10.20x_1x_3 + 10.72x_2x_3 \quad (9)$$

Of the main effects, only NaOH concentration (x_1) was significant on the release of Fe (Eq. 4). NaOH concentration (x_1) and the L/S ratio (x_2) were found to be important first-order main effects on K, Na, Ca, Al, and Zn releases (Eqs. (5–9)). The temperature (x_3) effect was also significant for Ca, Al, and Zn releases (Eqs.(7–9)). The temperature increase positively affected the solubilization of Ca, Al, and Zn. The release of Al increased significantly at an NaOH concentration above the center point; however, the increase in NaOH concentration did not have a significant effect on the Ca release. Similarly, Ali and Kim (2016) have reported that Al and P leaching increases with NaOH concentration, with nearly no increase in Ca concentration. Tolofari et al. (2020) reported that a significant amount of Al was released from the sludge when the pH was greater than 10.

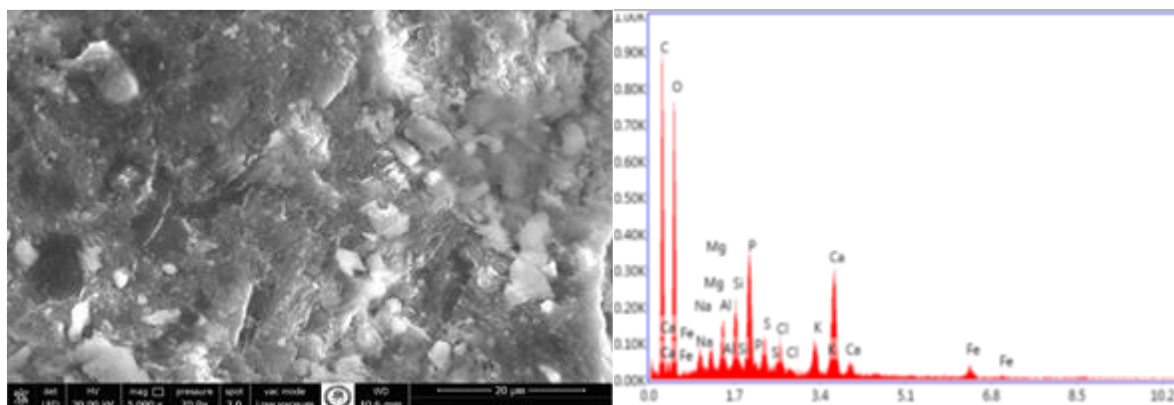
3.2. Optimization of NaOH–Thermal Hydrolysis for Solubilization of Metals and Nutrients from Digested Sludge

PO_4^{3-} releases increased at an NaOH concentration above the center point and a temperature below the center point when the L/S ratio was at the center point. At 0.7 M NaOH and a 5/1 L/S ratio, the largest PO_4^{3-} release was obtained at 35 °C (Table 3). With an increase in temperature, the solubilization of Ca, Al, and Zn also increased. High metal concentrations affect the growth and formation of struvite crystals (Wang et al., 2016). During the test conditions under which there was maximum P release, a temperature below the center point was found to be suitable for metal releases.

3.3. Characterization of Hydrolyzed Sludge Residues Obtained under Optimum Conditions

The digested sludge, and the residual hydrolyzed digested sludge after hydrolysis under optimum conditions were characterized using SEM–EDS to observe the surface morphology and distribution of elements. A comparison of the SEM images of the digested sludge and the hydrolyzed sludge at 5000x magnification is shown in Figs. 3a, b. The morphology of the hydrolyzed digested sludge changed compared to that of the digested sludge. The images show that alkaline–thermal hydrolysis fragmented the aggregates of the digested sludge and that there were several pores on the coarse surface of the hydrolyzed digested sludge. The results of the EDS surface distribution scans showed that the mass percentage of C, P, Fe, Al, and K decreased, which resulted from these elements entering the hydrolyzed sludge liquid, thus decreasing the content in the hydrolyzed sludge residue. Because NaOH was used for hydrolysis, the hydrolyzed sludge contained a significantly higher amount of Na than the digested sludge.

(a)



(b)

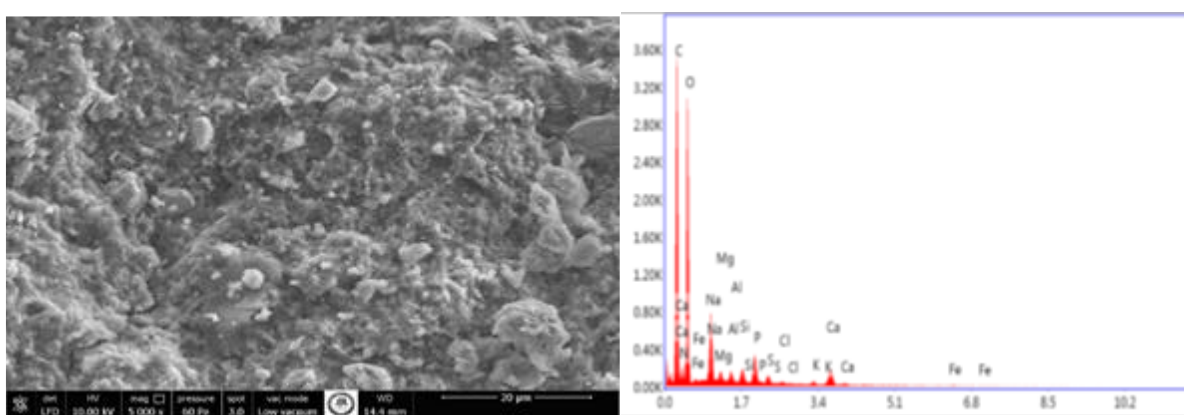


Figure 3. SEM images and EDS analyses of (a) digested sludge and (b) hydrolyzed digested sludge

3.4. Formation of Struvite from Hydrolyzed Sludge Liquid using Alkaline–Thermal Hydrolysis under Optimum Test Conditions

The hydrolyzed sludge liquid obtained using NaOH–thermal hydrolysis under optimum test conditions was used in the struvite crystallization experiments.

Struvite formation is more suitable when the N:Mg:P molar ratio is at least 1:1:1 (Cieslik and Konieczka, 2017). In the treatment aimed at P removal and recovery, many studies stressed the importance of applying a Mg/P molar ratio higher than the stoichiometric ratio (Uysal et al., 2010; Siciliano et al., 2020).

In the present study, the N:Mg:P molar ratios were arranged at 1:1.1 and 1:1.5:1, and pH was held at 9.0. Under these conditions, struvite crystals were formed. The removal efficiencies of NH_4^+ and PO_4^{3-} were 57.43 and 79.22% in the N:Mg:P molar ratio of 1:1:1, and 73.31 and 99.02% in the N:Mg:P molar ratio of 1:1.5:1, respectively. These results indicated that supplementary concentration of Mg is necessary for maximum P removal.

XRD analysis of the dry struvite precipitate showed hazenite ($\text{KNaMg}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) formation in the N:Mg:P molar ratio of 1:1:1 in addition to struvite formation (Fig. 4a). Hazenite is a new struvite compound with a structure containing two separate monovalent K and Na cations (Yang et al., 2011). The hazenite “relative” struvite has shown promise as a slow-release fertilizer with highly effective P (Weissengruber et al., 2018). Watson et al. (2020) have reported that hazenite is a new secondary P, K, and Mg fertilizer. Arslanoğlu and Tümen (2021) have reported that potassium struvite and hazenite formed from vinasse and grape marc organic waste using thermal processing.

The dry precipitate obtained in the N:Mg:P molar ratio of 1:1.5:1 matched that of the database model for pure struvite in terms of intensity of peaks and position (Figs. 4b,c).

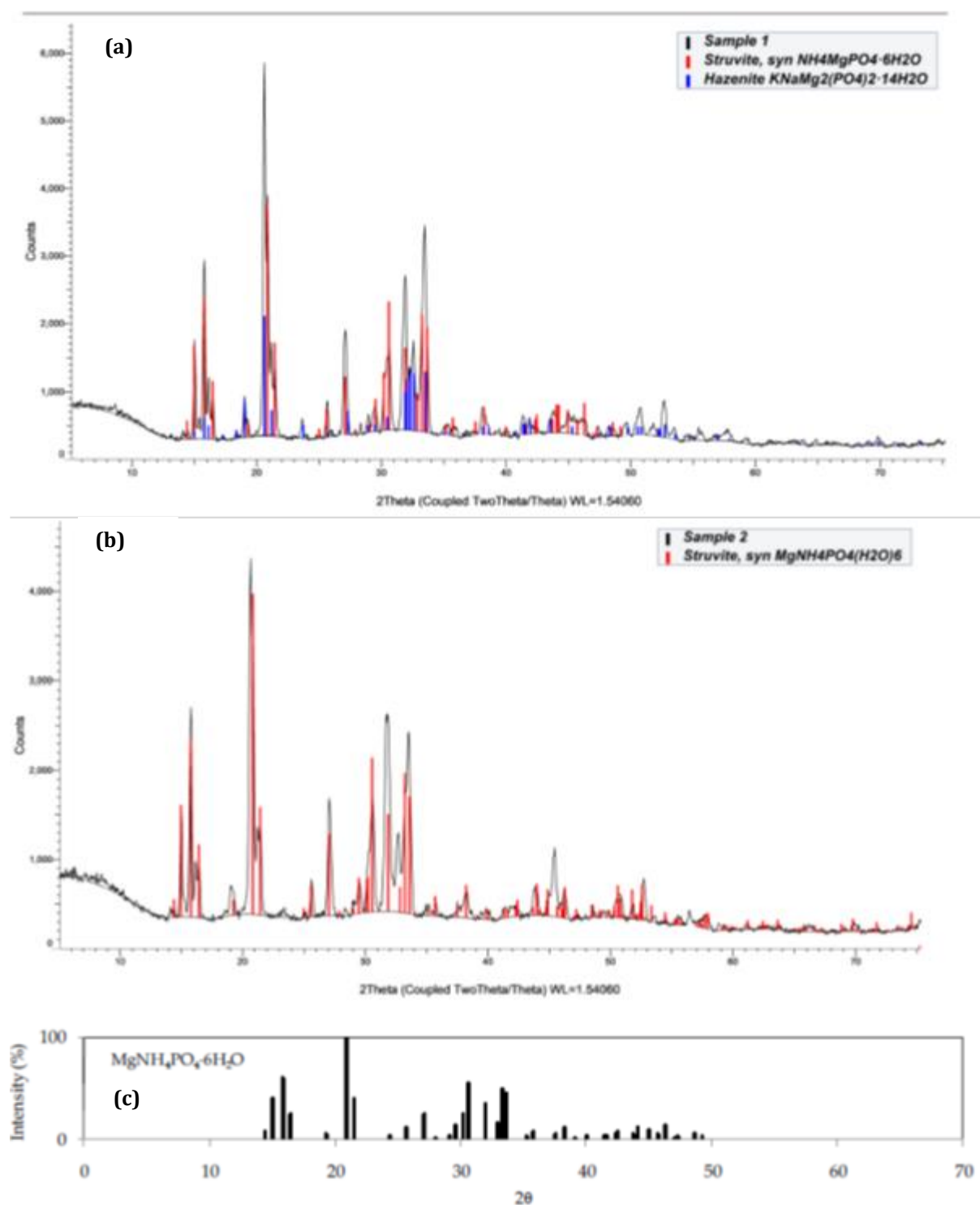


Figure 4. XRD analyses of (a) dry struvite precipitate in the molar ratio of N:Mg:P of 1:1:1, (b) dry struvite precipitate in the molar ratio of N:Mg:P of 1:1.5:1, and (c) pure struvite

4. Result and Discussion

Optimum solubilization of nutrients and metals was obtained at an NaOH concentration above the center point and a temperature below the center point when the L/S ratio was at the center point. NaOH helped denature proteins and ionize inorganic phosphate, which dissolved easily in the aqueous phase. As a result of all applied hydrolysis tests (except 1) in this study, the pH values of the hydrolyzed liquid were >10 , which had a higher effect than temperature of increasing NaOH concentrations on PO_4^{3-} and NH_4^+ solubilization from sewage sludge. With an increase in temperature, the solubilization of metals also increased. A temperature below the center point was found to be suitable for metal releases. EDS analyses of hydrolyzed sludge obtained under optimum conditions showed that the mass percentage of C, P, Fe, Al, and K decreased compared to that of the digested sludge.

The concentration of Mg in the hydrolyzed liquid is not enough to make an equal molar ratio with NH_4^+ and PO_4^{3-} . Under optimum conditions, the removal efficiencies of NH_4^+ and PO_4^{3-} from hydrolyzed liquid by precipitation of struvite were 57.43 and 79.22% in the N:Mg:P molar ratio of 1:1:1, and 73.31 and 99.02% in the N:Mg:P molar ratio of 1:1.5:1 at pH 9, respectively. The dry precipitate showed hazenite and struvite formation in the molar ratio of N:Mg:P of 1:1:1. Hazenite is a new struvite compound with a structure containing two separate monovalent K and Na cations. The positive effect of NaOH on K solubilization caused the formation of hazenite. To the best of our knowledge, hazenite was formed for the first time in nutrient recovery from sewage sludge in the present study.

Acknowledgement

This study was funded by the Research Project Funding Unit of Suleyman Demirel University (project no. FYL-2018-5788).

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Alhraishawi, A., Aslan, Ş., 2022. Anaerobik Çürütme Öncesi Atık Biyolojik Çamurların Mikrodalga Radyasyonu İle Dezentegrasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 740-760.
- Ali, T.U., Kim, D.J., 2016. Phosphorus Extraction and Sludge Dissolution by Acid and Alkali Treatments of Polyaluminum Chloride (PAC) Treated Wastewater Sludge. *Bioresource Technology*, 217, 233-238.
- APHA, AWWA, WEF, 2005. *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*. 21st ed., Washington, DC.
- Arslanoğlu, H., Tümen, F., 2021. Potassium Struvite (Slow Release Fertilizer) and Activated Carbon Production: Resource Recovery from Vinasse and Grape Marc Organic Waste using Thermal Processing. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 1077-1087.
- Barca, C., Martino, M., Hennebert, P., Roche, N., 2019. Kinetics and Capacity of Phosphorus Extraction from Solid Residues Obtained from Wet Air Oxidation of Sewage Sludge. *Waste Management*, 89, 275-283.
- Bi, W., Li, Y., Hu, Y., 2014. Recovery of Phosphorus and Nitrogen from Alkaline Hydrolysis Supernatant of Excess Sludge by Magnesium Ammonium Phosphate. *Bioresource Technology*, 166, 1-8.
- Cieslik, B., Konieczka, P., 2017. A Review of Phosphorus Recovery Methods at Various Steps of Wastewater Treatment and Sewage Sludge Management. The Concept of "No Solid Waste Generation" and Analytical Methods. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1728-1740.
- de Sousa, T.A.T., do Monte, F.P., Silva, J.V.D., Lopes, W.S., Leite, V.D., van Lier, J.B., de Sousa, J.T., 2021. Alkaline and Acid Solubilisation of Waste Activated Sludge. *Water Science and Technology*, 83, 2980-2996.
- Donatello, S., Cheeseman, C.R., 2013. Recycling and Recovery Routes for Incinerated Sewage Sludge Ash (ISSA): A Review. *Waste Management*, 33, 2328-40.
- Dong, C.H., Xie, X.Q., Wang, X.L., Zhani, Y., Yao, Y.J., 2009. Application of Box-Behnken Design in Optimisation for Polysaccharides Extraction from Cultured Mycelium of *Cordyceps Sinensis*. *Food Bioproducts Processing*, 87, 139-144.
- Falayi, T., 2019. Alkaline Recovery of Phosphorous from Sewage Sludge and Stabilisation of Sewage Sludge Residue. *Waste Management*, 84, 166-172.
- Franz, M., 2007. Phosphate Fertilizer from Sewage Sludge Ash (SSA). *Waste Management*, 28, 1809-18.
- Hosseini, S.A., Raygan, S., Reaei, A., Jafari, A., 2017. Leaching of Nickel from a Secondary Source by Sulfuric Acid. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 3922-3929.
- Kim, M., Han, D.W., Kim, D.J., 2015. Selective Release of Phosphorus and Nitrogen from Waste Activated Sludge with Combined Thermal and Alkali Treatment. *Bioresource Technology*, 190, 522-5284.
- Li, J., Xiong, D., Chen, H., Wang, R., Liang, Y., 2012. Physicochemical Factors Affecting Leaching of Laterite Ore in Hydrochloric Acid. *Hydrometallurgy*, 129, 14-18.
- Li, H., Zou, S., Li, C., Jin, Y., 2013. Alkaline Post-Treatment for Improved Sludge Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 140, 187-191.
- Meng, X., Huang, Q., Xu, J., Gao, H., Yan, J., 2019. A Review of Phosphorus Recovery from Different Thermal Treatment Products of Sewage Sludge. *Waste Disposal and Sustainable Energy*, 1, 99-115.
- Nosrati, A., MacCarthy, J., Addai-Mensah, J., 2013. Acid Leaching and Rheological Behavior of Siliceous Goethite Ni Laterite Ore: Effect of Solid Loading and Temperature. In: *Proceedings of Chemeca 2013 Australia*, 404-412.
- Sayılğan, E., Karacan, G., 2019. Characterization and Evaluation of Removal Conditions of Lead-Zinc-Copper Flotation Plant Waste. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(1), 175-181.
- Semerci, N., Ahadi, S., Coşgun, S., 2021. Comparison of Dried Sludge and Sludge Ash for Phosphorus Recovery with Acidic and Alkaline Leaching. *Water and Environment Journal*, 35, 359-370.
- Siciliano, A., Limonti, C., Curcio, G.M., Molinari, R., 2020. Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater. *Sustainability*, 12(18), 7538.
- Suarez-Iglesias, O., Urrea, J.L., Oulego, P., Collado, S., Diaz, M., 2017. Valuable compounds from sewage sludge by thermal hydrolysis and wet oxidation. A review, *The Science of the Total Environment*, 584-585, 921-934.
- Takahashi, M., Kato, S., Shima, H., Sarai, E., Ichioka, T., Hatakyawa, S., Miyajiri, H., 2001. Technology for Recovering Phosphorus from Incinerated Wastewater Treatment Sludge. *Chemosphere* 44(1), 23-9.

- Takahashi, M., Takemoto, Y., Onsihi, K., 2015. Phosphorus Recovery from Carbonized Sewage Sludge by Hydrothermal Processes. *Journal of Materials Science Engineering B*, 5(1-2), 58–62.
- Tolofari, A., Islam, M., Yuan, Q., 2020. Statistical Modeling of Phosphorus Solubilization from Chemical Sludge and Evaluation of Optimal Sodium Hydroxide Dose. *Journal of Environmental Management*, 255, 109824.
- Uysal, A., Yılmazel, Y.D., Demirer, G.N., 2010. The Determination of Fertilizer Quality of the Formed Struvite from Effluent of a Sewage Sludge Anaerobic Digester. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 248–254.
- Uysal, A., Tuncer, D., Kir, E., Sardohan Köseoğlu, T., 2017. Recovery of Nutrients from Digested Sludge as Struvite with a Combination Process of Acid Hydrolysis and Donnan Dialysis. *Water Science and Technology*, 76(10), 2733–2741.
- Uysal, A., Aydoğan, M., Çelik, E., 2019. Recovery of Phosphorus and Nitrogen from Sewage Sludge as Struvite using a Combined Alkali Hydrolysis and Thermal Treatment Process. In: Balkaya N., Guneysu S. (eds) *Recycling and Reuse Approaches for Better Sustainability*. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham, pp 75-85.
- Wang, Y., Xiao, Q., Zhong, H., Zheng, X., Wei, Y., 2016. Effect of Organic Matter on Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Subjected to Microwave Hybrid Pretreatment. *Journal of Environmental Sciences*, 39, 29–36.
- Watson, C., Clemens, J., Wichern, F., 2020. Hazenite: A New Secondary Phosphorus, Potassium and Magnesium Fertilizer. *Plant, Soil and Environment*, 66(1), 1–6.
- Weissengruber, L., Möller, K., Puschenreiter, M., Friedel, J.K., 2018. Long-Term Soil Accumulation of Potentially Toxic Elements and Selected Organic Pollutants through Application of Recycled Phosphorus Fertilizers for Organic Farming Conditions. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 110, 427–449.
- Xu, D., Zhong, C., Yin, K., Peng, S., Zhu, T., Cheng, G., 2018. Alkaline Solubilization of Excess Mixed Sludge and The Recovery of Released Phosphorus as Magnesium Ammonium Phosphate. *Bioresource Technology*, 249, 783–790.
- Yang, H., Sun, H.J., Downs, R.T., 2011. Hazenite, $\text{KNaMg}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, A New Biologically Related Phosphate Mineral, from Mono Lake, California, U.S.A. *American Mineralogist*, 96, 675–681.
- Yu, Y., Lei, Z., Yuan, T., Jiang, Y., Chen, N., Feng, C., Shimizu, K., Zhang, Z., 2017. Simultaneous Phosphorus and Nitrogen Recovery from Anaerobically Digested Sludge using a Hybrid System Coupling Hydrothermal Pretreatment with MAP Precipitation. *Bioresource Technology*, 243, 634–640.
- Zin, M.M.T., Tiwari, D., Kim, D.J., 2021. Recovery of Ammonium and Phosphate as Struvite via Integrated Hydrolysis and Incineration of Sewage Sludge. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101697.



HİBRİT YAKIT HÜCRESİ-PV DESTEKLİ BİR TRAMVAYIN EKONOMİK İŞLETİMİ

İbrahim ŞENGÖR^{1,2,3*}, Alper ÇİÇEK⁴

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² University College Cork, Environmental Research Institute, MaREI Centre, Cork, Ireland

³ University College Cork, School of Engineering, Cork, Ireland

⁴ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

*Yakıt Hücresi,
Hidrojen Enerji
Sistemi,
Optimum Enerji
Yöntemi,
Raylı Sistemler.*

Raylı sistemler büyük nüfusa sahip şehirlerde ulaşım sorununun çözülmesi için önemli bir çözüm aracı olarak görülmektedir. Fakat bu sistemlerde kullanılan tramvaylar küçümsenmeyecek kadar büyük güç tüketimine sahiptirler. Ayrıca bu araçların güç tüketimleri tramvay sayısı ve yolcu sayısı gibi çeşitli etmenlerden dolayı değişkenlik gösterdiği için raylı sistemin ekonomik işletiminin sağlanması ve güç sisteminin güvenilir bir şekilde idare edilmesi çok kolay olmayabilir. Bu bağlamda bu çalışmada çatısına fotovoltaik (PV) sistem dahil edilen ve ayrıca elektrolizör, hidrojen tankı, kompresör ve yakıt hücresinden oluşan hidrojen enerji sistemi ile entegre edilen bir tramvayın optimum enerji yönetim modeli açıklanmaktadır. Çalışmada tramvay ve hidrojen enerji sistemi için elektrik şebekesinden dinamik elektrik fiyatları ile enerji satın alınmaktadır. Önerilen modelin etkinliğini göstermek amacıyla gerçekleştirilen çeşitli durum çalışmalarında İstanbul'da bir tramvay hattının gerçek işletimi dikkate alınarak elde edilen güç profili kullanılmaktadır. Durum çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre önerilen yapı toplam elektrik satın alma maliyetini önemli miktarda düşürebilmektedir. Maliyetleri düşürmede sırasıyla dinamik elektrik fiyatları, PV sistem ve hidrojen enerji sisteminin etkin olduğu görülmektedir. Dinamik elektrik fiyatları elektrik satın alma maliyetinde yaklaşık olarak %13'lük iyileşme sağlarken, tramvay üzerine yerleştirilen PV sistem ile toplam maliyet yaklaşık olarak %3 oranında azaltılabilmektedir.

ECONOMIC OPERATION OF A HYBRID FUEL CELL-PV-SUPPORTED TRAM

Keywords

*Fuel Cell,
Hydrogen Energy
System,
Optimal Energy
Management,
Railway Systems.*

Abstract

Rail systems are accepted as promising solutions to transportation problems in metropolitan cities. However, trams, one of the most common vehicles availed of, have a power consumption that can not be underestimated. In addition, since the power consumption of these vehicles varies due to various factors such as the number of trams and the number of passengers, it may not be very easy to ensure the economical operation of the rail system and to operate the power system in a reliable manner. In this context, this study presents an optimum energy management model of a tram, which is integrated with a photovoltaic (PV) system on its roof and also integrated with a hydrogen energy system consisting of an electrolyzer, hydrogen tank, compressor, and fuel cell. In the study, energy is assumed to be purchased from the power grid with a dynamic pricing scheme for the tram and hydrogen energy system. To demonstrate the effectiveness of the proposed model, the power profile obtained by considering an operated tram line is used in various case studies carried out. According to the results obtained from the case studies, the proposed structure can significantly reduce the total electricity purchase cost. It is seen that, in order, the dynamic pricing scheme, PV system, and hydrogen energy system are effective in reducing costs. While the dynamic pricing scheme provides an improvement of approximately 13% in the cost of purchasing electricity, the total cost can be reduced by approximately 3% with the PV system placed on the tram.

* İlgili yazar / Corresponding author: ibrahim.sengor@ikcu.edu.tr, +90-232-329-3758

Alıntı / Cite

Şengör, İ., Çiçek, A., (2022). Hibrit Yakıt Hücresi-PV Destekli Bir Tramvayın Ekonomik İşletimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1290-1302.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Şengör, 0000-0002-9451-4218
A. Çiçek, 0000-0003-4540-2276

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.05.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	29.07.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.08.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

Adlar Dizini

Çalışmada kullanılan kümeler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

Kümeler

t Zaman periyotları kümesi [saniye].

Parametreler

A Hidrojen enerji sistemi için kilogramdan kW'a dönüşüm için kullanılan dönüştürme sabiti.
 a_{komp}/b_{komp} Kompresör modeline ait regresyon parametreleri.
 AR_{EL} Elektrolizörün güç tüketimini azaltma oranı [kW/saat].
 AR_{YH} Yakıt hücresinin güç üretimini azaltma oranı [kW/saat].
 M_C Oldukça büyük pozitif bir sayı.
 $m_{hidr-maks}$ Hidrojen tankının maksimum hidrojen molar kapasitesi [kg].
 n Adım sayısı.
 P_{EL-nom} Elektrolizörün nominal güç tüketimi [kW].
 P_{YH-nom} Yakıt hücresinin üretebileceği nominal güç değeri [kW].
 YR_{EL} Elektrolizörün güç tüketimini artırma oranı [kW/saat].
 YR_{YH} Yakıt hücresinin güç üretimini arttırma oranı [kW/saat].
 $\lambda_{fiyat,t}$ t periyodunda elektrik birim fiyatı [TL/kWh].
 ΔT Zaman çözünürlüğü [saniye].
 η_{EL} Elektrolizörün verimi [%].
 η_{YH} Yakıt hücresinin verimi [%].
 $\eta_{YH-dön}$ Yakıt hücresine ait dönüştürücünün verimi [%].

Değişkenler

$m_{hidr,t}$ t periyodunda hidrojen tankındaki hidrojen molar miktarı [kg].
 $P_{EL,t}$ t periyodunda elektrolizörün hidrojen üretmek için kullandığı güç miktarı [kW].
 $P_{EL,giriş,t}$ t periyodunda elektrolizörün tükettiği güç miktarı [kW].
 $P_{komp,t}$ t periyodunda kompresör tarafından tüketilen güç miktarı [kW].
 $P_{şebeke-tram,t}$ t periyodunda tramvayın hareketi için şebekeden satın alınan güç miktarı [kW].
 $P_{YH,t}$ t periyodunda yakıt hücresinin ürettiği potansiyel güç miktarı [kW].
 $P_{YH-çıkış,t}$ t periyodunda yakıt hücresinin ürettiği güç [kW].
 $u_{EL,t}$ t periyodunda elektrolizörün çalışmasına ait ikili karar değişkeni. Eğer 1 ise elektrolizör idorjen üretmektedir, 0 ise hidrojen üretimi gerçekleştirilmemektedir [0,1].
 $u_{YH,t}$ t periyodunda yakıt hücresinin çalışmasına ait ikili karar değişkeni. Eğer 1 ise yakıt hücresi enerji üretmektedir, 0 ise enerji üretimi gerçekleştirilmemektedir [0,1].

1. Giriş (Introduction)**1.1. Motivasyon (Motivation)**

Trafik sorunu günümüzde büyük nüfusa sahip kentlerde en büyük problemlerden biri olarak görülmektedir. Bu açıdan dünyada ulaşımın kolay bir şekilde gerçekleştirilmesi için raylı sistem yatırımlarına önem verilerek raylı sistem ağının her geçen gün giderek büyüdüğü görülmektedir. Fakat şehir içi ulaşımında kullanılan tramvaylar nispeten büyük güç tüketimine sahiptirler ve ayrıca raylı sistemde güç tüketimi zaman, işletilen tramvay sayısı ve yolcu sayısı gibi birçok değişkene bağlı olarak değişebilmektedir. Bu sebeple dalgalı ve yüksek orandaki güç tüketimi güç sisteminde güvenilirliği azaltarak arz ve talep dengesinin sağlanmamasına sebep olabileceği için sistem frekansının korunamaması ve enerji kesintisi gibi birçok işletimsel problemin ortaya çıkmasına sebep olabilir. Bu açıdan raylı sistemin optimum ekonomik işletimi ele alınması gereken önemli konulardan birisi olarak görülmektedir. Bu sebeple optimum enerji yönetimi ile birlikte raylı sistem ile entegre edilen yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri ve dinamik elektrik fiyatlarının uygulanması da ekonomik işletim konusunda fayda sağlayacaktır. Raylı sisteme entegre edilecek yenilenebilir enerji kaynakları şebekeden çekilen elektrik enerjisi miktarını azaltırken diğer yandan da karbon emisyonlarının azaltılmasını sağlayacaktır. Ayrıca bir

başka sıfır karbon enerji kaynağı olan hidrojen enerji sistemi raylı sistemde esnekliği sağlayarak optimum ekonomik işletim konusunda önemli faydalar sağlayabilir. Güç sisteminin güvenilir şekilde idare edilmesi açısından tüketicilere sunulan dinamik elektrik fiyatları da güç sisteminin işletimi konusunda fayda sağlarken raylı sistem işletmecisine de sistemini ekonomik şekilde işleterek toplam maliyetlerini azaltma fırsatı sunabilmektedir.

1.2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürde raylı sistem araçlarının optimum enerji yönetimi üzerine bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Han ve ark. hafif raylı tramvay için çoklu proton değişim membranlı yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitör içeren hibrit bir sistem tasarlamışlardır (Han vd., 2018). Yazarlar çalışmadan elde ettikleri sonuçların önerilen stratejinin birden fazla enerji kaynağını koordine etme ve genel tramvay verimliliğini artırma konusunda fayda sağladığını belirtmişlerdir. Li ve ark. yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitörden oluşan hibrit kaynakların yüksek güçlü bir tramvayı desteklemesi ve tramvayın güç talebindeki geçici ve hızlı değişimlerden kaçınılabilmesi için tüketim minimizasyonu tabanlı bir stratejisi sunmuşlardır (Li vd., 2018). Yazarlar çalışmada önerilen stratejinin birden fazla güç kaynağını yönetebildiğini ve koordine edebildiğini, DC bara gerilim stabilizasyonunu sürdürdüğü, genel tramvay verimliliğini artırdığını ve hibrit güç sistemi üzerindeki stresi azaltabildiğini belirtmişlerdir. Ciccarella ve ark. tramvay hattı üzerinde yol kenarına kurulan süper kapasitörün enerji yönetimi için bir kontrol stratejisi açıklamışlardır (Ciccarella vd., 2016). Kontrol stratejisinde tramvaylar ve trafo merkezleri arasındaki enerji akışını gerçek zamanlı olarak optimize etmişlerdir. Zhang ve ark. yakıt hücreli hibrit bir tramvayın hız ayarlamasını gerçekleştirmek, adaptif güç tahsisini sağlamak ve işletim güvenliğini artırmak için sentetik bir strateji önermişlerdir (Zhang vd., 2021). Torreglosa ve ark. İspanya'nın Zaragoza şehrinde yer alan ve süper kapasitörle işletilen Urbos 3 tramvayı için yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitöre dayalı yeni bir hibrit güç aktarma sistemini değerlendirmişlerdir (Torreglosa vd., 2014).

Arévalo ve ark. Cuenca-Ekvador'da yer alan bir tramvaya cer gücü sağlanması için iki alternatif sistemi karşılaştırmışlardır. İlk sistemde yenilenebilir enerji, şebeke gücü, süper kapasitör, lityum iyon batarya ve yakıt hücresine yer verirken ikinci sistemde yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmemişlerdir (Arevalo vd., 2020). Han ve ark. Hafif raylı metro hattı için yakıt hücresi ve kurşun asit batarya destekli bir güç modeli sunmuşlardır. Ayrıca Türkiye'de yer alan bir tramvay ile test çalışması gerçekleştirmişlerdir (Han vd. 2016). Zhang ve ark. gerçek bir tramvayın parametrelerini kullanarak iki yakıt hücresi, iki batarya ve iki süper kapasitörden oluşan bir hibrit tramvay modeli sunmuşlardır (Zhang vd., 2019). Cano ve ark. yenilenebilir enerji kaynakları, süper kapasitörler ve lityum iyon bataryaların desteklediği gerçek bir tramvay için rejeneratif frenleme enerjisini de dikkate alarak yeni bir enerji kontrolü modeli önerilmişlerdir (Cano vd., 2021). Yang ve ark. iki yakıt hücresi, iki lityum iyon batarya ve iki süper kapasitörden oluşan bir yapı sunmuşlardır (Yang vd., 2016). Zhang ve ark. bir pantograf/katener tramvay, bir raydan beslemeli tramvay ve üç yakıt hücreli hibrit tramvayın maliyet analizini gerçekleştirdiler (Zhang vd., 2016).

Garcia ve ark. İspanya'nın Sevilla kentindeki Metro Centro tramvayı için bir yakıt hücresi ve batarya hibrit sisteminin konfigürasyonunu, modellenmesini ve kontrolünü gerçekleştirmek için bir yapı sunmuşlardır (Garcia vd., 2010). Önerilen hibrit sistemde birincil enerji kaynağı olarak polimer elektrolit membran yakıt hücresini ve ikincil enerji kaynağı olarak nikel-metal hidrit hücre bataryayı değerlendirmişlerdir. Noia ve ark. bir tramvayın optimum enerji yönetimi açısından süper kapasitör tabanlı enerji depolama sistemi ve endüktif güç aktarım sisteminin optimum entegrasyonunu değerlendirmişlerdir (Noia vd., 2019). Herrera ve ark. bataryaları ve süper kapasitörleri içeren yerleşik bir enerji depolama sistemine sahip hafif raylı bir tramvay için optimum enerji yönetimi stratejisi sunmuşlardır (Herrera vd., 2016). Khayyam ve ark. bir tramvaya ait rejeneratif enerji, yük, enerji depolama sistemi ve dağıtık enerji kaynaklarının koordineli işletimi için yeni bir strateji sunmuşlardır (Khayyam vd., 2016). Loy-Benitez ve ark. Güney Kore'de yer alan bir demiryolu transformator merkezindeki dinamik hidrojen, soğutma ve ısıtma talebinin karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği yeni bir strateji geliştirmişlerdir (Loy-Benitez vd., 2021). Fakat yukarıda incelenen çalışmaların hiçbirinde tramvayın çatısında fotovoltaik (PV) güç üretim seçeneği ele alınmamış ve dinamik elektrik fiyatları uygulanmamıştır. Ayrıca hidrojen enerji sisteminin sadece bir çalışmada dikkate alındığı belirtilmelidir fakat bu çalışmada dinamik elektrik fiyatları ve tramvayın çatısında PV yapısı dikkate alınmamıştır. Çalışmanın literatürde hangi boşluğu doldurduğunun daha iyi görülebilmesi açısından Tablo 1'de sınıflandırmaya yer verilmiştir.

Tablo 1. Burada sunulan ve literatürde yer alan çalışmaların karşılaştırıldığı sınıflandırma tablosu (Taxonomy table comparing presented study and papers in the literature)

Referans	Yakıt hücresi	Hidrojen tankı	Elektrolizör	Kompresör	Dinamik elektrik fiyatları	Tramvayın çatısında PV sistem
(Han vd., 2018)	✓	–	–	–	–	–
(Li vd., 2018)	✓	–	–	–	–	–
(Ciccarelli vd., 2016)	–	–	–	–	–	–
(Zhang vd., 2021).	✓	–	–	–	–	–
(Torreglosa vd., 2014)	✓	–	–	–	–	–
(Arévalo vd. 2020)	✓	✓	✓	✓	–	–
(Han vd. 2016)	✓	–	–	–	–	–
(Zhang vd. 2019)	✓	–	–	–	–	–
(Cano vd. 2021)	–	–	–	–	–	–
(Yang vd. 2016)	✓	–	–	–	–	–
(Zhang vd. 2016)	✓	–	–	–	–	–
(Garcia vd., 2010)	✓	–	–	–	–	–
(Noia vd., 2019)	–	–	–	–	–	–
(Herrera vd., 2016)	–	–	–	–	–	–
(Khayyam vd., 2016)	–	–	–	–	–	–
(Loy-Benitez vd., 2021)	✓	–	✓	–	–	–
Bu çalışma	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1.3. Çalışmanın Katkıları ve Organizasyonu (Contributions and Organisation of Studies)

Bu çalışmada raylı sistem araçlarından tramvayın enerji yönetiminin ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi açısından hibrit yenilenebilir kaynak-enerji depolama sisteminin dahil edildiği optimum enerji yönetimine ait karışık tamsayı doğrusal programlama (mixed-integer linear programming – MILP) modeli sunulmaktadır. Dinamik elektrik fiyatlarının da dikkate alındığı çalışmada amaç raylı sisteme ait toplam maliyetinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir. Çalışmanın literatüre katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

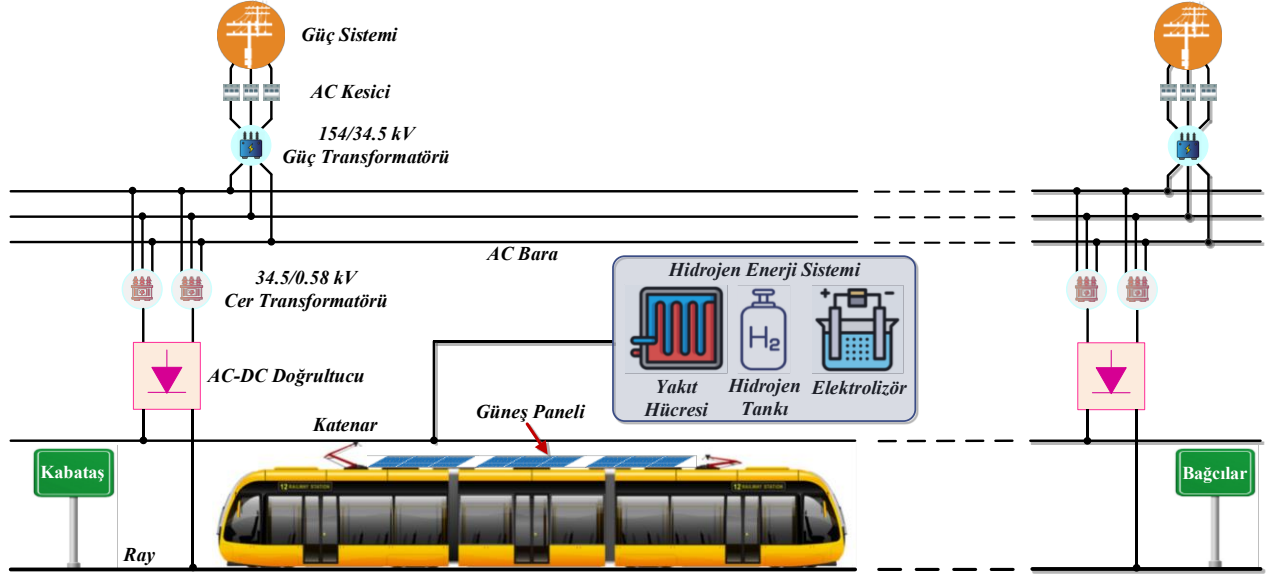
1. Tramvay hareketi için şebekeden satın alınan toplam enerji satın alma maliyetini düşürülmesi açısından tramvayın çatısında PV güç üretim sistemi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca raylı sistem işletimine esneklik kazandırmak açısından raylı sisteme ait yol üzerinde bir hidrojen enerji sistemi yer almaktadır. Hidrojen enerji sistemi hidrojen üreten elektrolizör, hidrojen tankı, kompresör ve hidrojenden enerji üreten yakıt hücresinden oluşmaktadır.
2. Tramvayın hareket etmesi için şebekeden çekilen enerjinin dinamik elektrik fiyatları ile satın alındığı varsayılmaktadır. Böylelikle dinamik elektrik fiyatları aracılığı ile hidrojen enerji sistemine hidrojen depolama için elektriğin nispeten pahalı olduğu periyotlarda kullanılmak üzere nispeten ucuz olduğu periyotlarda enerji satın alma fırsatı yakalanabilmektedir.
3. Önerilen raylı sistem enerji yönetim modelinin değerlendirilmesi açısından İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattına ait gerçek işletim durumu dikkate alınarak oluşturulan güç tüketim profili test çalışmalarında değerlendirilmektedir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: 2. Bölümde önerilen modele ait matematiksel modellemeye yer verilmektedir. 3. Bölüm durum çalışmaları ve elde edilen sonuçların detaylı olarak karşılaştırmalı analizlerini içermektedir. Son olarak, Bölüm 4'te önemli sonuçlar vurgulanmakta ve gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada hidrojen enerji sistemi ile desteklenen ve üzerinde PV güç sistemi yerleştirilen bir tramvayın ekonomik şekilde optimum işletim problemi ele alınmaktadır. Önerilen yapıya ait genel bir görünüm Şekil 1'de verilmektedir. Burada şebekeden tahsis edilen enerji AC-DC dönüştürücü aracılığı ile tramvayın hareketi için kullanılmaktadır. Ayrıca tramvayın katenar hattına tramvayın optimum işletimini sağlamak için bir hidrojen enerji sistemi entegre edilmiştir. Burada katenar üzerinden sağlanan enerji ile elektrolizör aracılığı ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen hidrojen yüksek basınçlı hidrojen tankı içerisinde depolanabilmektedir. Tankta depo edilen hidrojen yakıt hücresinde kullanılarak elektrik enerjisi olarak tramvaya hizmet edebilmektedir. Ayrıca

tramvay üzerinde yer alan PV panelleri tramvayın enerji talebinin karşılanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada rejeneratif frenleme enerjisi konseptinin değerlendirilmediğinin altı çizilmelidir.



Şekil 1. Hibrit yakıt hücresi-PV sistem destekli tramvayın optimum enerji yönetim modeline ait genel bir yapı. (Overview of the hybrid FC-PV assisted tram)

Çalışmada amaç fonksiyonu şebekeden satın alınan toplam elektrik enerjisi maliyetinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir ki bu (1) denklemi ile ifade edilmektedir. Burada şebekeden tramvayın hareketi için, elektrolizörün hidrojen üretmesi için ve hidrojen enerji sistemi içerisinde yer alan kompresörde kullanılmak üzere enerji satın alındığı ifade edilmelidir.

$$\text{Minimum Tüketim} = \sum_t (P_{\text{şebeke-tram},t} + P_{EL,giris,t} + P_{komp,t}) \cdot \lambda_{fiyat,t} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Önerilen sistem için her bir t periyodundaki güç dengesi (2) eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada PV sistemde üretilen güç, yakıt hücresinden elde edilen güç ve şebekeden satın alınan güç tramvayın tükettiği güç ve hidrojen enerji sistemi içerisinde yer alan elektrolizör ve kompresörde tüketilen gücün toplamına eşittir. Yakıt hücresinin üretim artırma oranı (3) ile sınırlandırılırken, üretim azaltma oranına ait limit (4) ile belirlenmektedir. Yakıt hücresinin üretebileceği maksimum güç limiti ise (5) ile ifade edilmektedir. Yakıt hücresine ait çıkış gücü ise DC-DC dönüştürücünün verimi ve yakıt hücresinin de verimine bağlı olacak şekilde (6) denklemi ile hesaplanmaktadır. Ayrıca yakıt hücresinin düzgün çalışabilmesi için sistemde bir basınçlı oksijene ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple devreye bir kompresör dahil edilmiştir. Kompresöre ait güç talebi (7) ile ifade edilmektedir.

$$P_{PV,t} + P_{YH-çıkış,t} + P_{\text{şebeke-tram},t} = P_{yük-tram,t} + P_{EL-giris,t} + P_{komp,t}, \quad \forall t \quad (2)$$

$$P_{YH,t} - P_{YH,t-1} \leq YR_{YH} \cdot P_{YH-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (3)$$

$$P_{YH,t-1} - P_{YH,t} \leq AR_{YH} \cdot P_{YH-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (4)$$

$$P_{YH,t} \leq P_{YH-nom}, \quad \forall t \quad (5)$$

$$P_{YH-çıkış,t} = P_{YH,t} \cdot \eta_{YH} \cdot \eta_{YH-dön}, \quad \forall t \quad (6)$$

$$P_{komp,t} = a_{komp} \cdot P_{YH,t} + b_{komp} \cdot u_{YH,t}, \quad \forall t \quad (7)$$

Hidrojen tankındaki hidrojen miktarının her bir t periyodunda yakıt hücresi ve elektrolizörün çalışmasına bağlı değişimi (8) eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada elektrolizör tarafından üretilen ve yakıt hücresi tarafından tüketilen hidrojen miktarları denge denkleminde yer almaktadır. Hidrojen enerji sisteminden kullanılacak hidrojen miktarının üst sınırı ise (9) eşitsizliği ile belirlenmektedir. Elektrolizörün hidrojen üretmek için güç tüketimini artırma oranı (10) ile sınırlandırılırken, güç tüketimini azaltma oranı sınırı ise (11) ile ifade

edilmektedir. Eşitlik (12)'de elektrolizörün maksimum güç limitinin elektrolizörün nominal gücü kadar olabileceği belirtilmektedir. Ayrıca elektrolizör ve yakıt hücresinin aynı periyotta çalışmaması durumu $u_{EL,t}$ ve $u_{YH,t}$ ikili karar değişkenlerinden de yararlanılarak (13)-(15) eşitsizlikleri ile garanti edilmektedir. Son olarak, elektrolizör tarafından tüketilen güç değeri elektrolizörün giriş gücü ve elektrolizörün verimlilik değerinin çarpımı ile değişmektedir ki bu durum (16) eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$m_{hidr,t} \cdot n - m_{hidr,t-1} \cdot n - P_{el,gir,t} \cdot (1/A) + P_{YH,t} \cdot (1/A) = 0, \quad t > 1 \quad (8)$$

$$m_{hidr,t} \leq m_{hidr-maks}, \quad \forall t \quad (9)$$

$$P_{EL,t} - P_{EL,t-1} \leq YR_{EL} \cdot P_{EL-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (10)$$

$$P_{EL,t-1} - P_{EL,t} \leq AR_{EL} \cdot P_{EL-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (11)$$

$$P_{EL,t} \leq P_{EL-nom}, \quad \forall t \quad (12)$$

$$P_{EL,t} \leq M_C \cdot u_{EL,t}, \quad \forall t \quad (13)$$

$$P_{YH,t} \leq M_C \cdot u_{YH,t}, \quad \forall t \quad (14)$$

$$u_{EL,t} + u_{YH,t} \leq 1, \quad \forall t \quad (15)$$

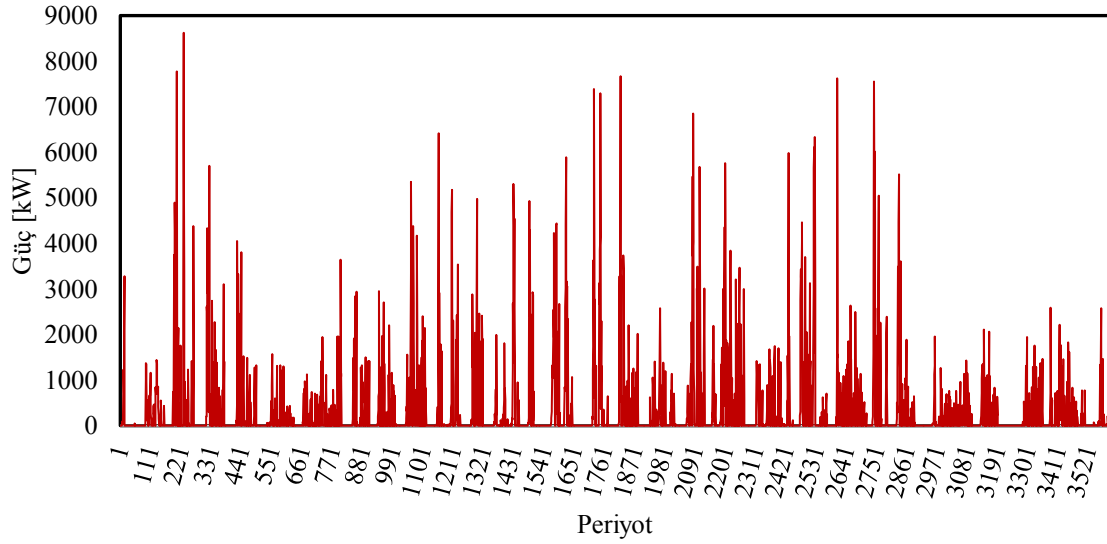
$$P_{EL,t} = P_{EL-giris,t} \cdot \eta_{EL}, \quad \forall t \quad (16)$$

3. Test ve Sonuçlar (Test and Results)

Yakıt hücresi ve PV sistem tarafından desteklenen tramvayın optimum enerji yönetim modeli karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemi kullanılarak sunulmaktadır. Önerilen optimizasyon stratejisi GAMS v.24.1.3 yazılımı ve CPLEX v.12 çözücüsü aracılığı ile test edilmektedir. Problem, 8 Çekirdekli 1065G7 1.5 GHz CPU ve 32 GB RAM'e sahip bir laptop ile en uzun durum çalışmasında bile 2.77 saniyede çözülebilmektedir. Bu bölümün geri kalanında sırasıyla test çalışmalarına ait giriş verileri ve elde edilen sonuçların karşılaştırması yer almaktadır.

3.1. Giriş Verileri (Input Data)

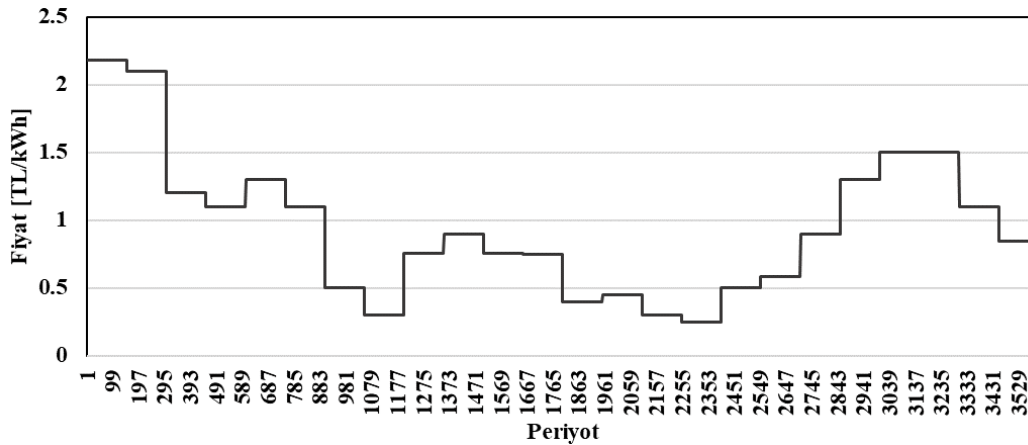
Test çalışmasında Kabataş-Bağcılar hattında çalıştığı kabul edilen bir tramvayın bir saatlik işletimi dikkate alınmaktadır. Gerçek çalışma durumu simüle edilerek oluşturulan tramvaya ait güç tüketim profili Şekil 2'de verilmektedir. Ayrıca modelde yer aldığı düşünülen hidrojen enerji sistemine ait veriler referans (Eren, 2022)'de yer alan verilerin çalışmaya uygun şekilde revize edilmesi ile oluşturulmuştur ki ilgili veri Tablo 2'de verilmektedir. Tramvay hareketi için ve hidrojen enerji sisteminde hidrojene dönüştürülerek depolanmak üzere şebekeden satın alınan enerjiye ait dinamik elektrik fiyatları Şekil 3'te verilirken, sabit elektrik fiyatının olduğu durumda ise fiyatın 2.04 TL/kWh olduğu kabul edilmektedir. Çalışmada ilgili çalışma saati için her bir periyotta PV sistemin 30 kW'lık güç ürettiği düşünülmektedir. Ayrıca zaman çözünürlüğü 1 saniye olarak alınmıştır.



Şekil 2. Gerçek çalışma durumu dikkate alınarak oluşturulan tramvaya ait güç tüketimi. (Power consumption profile of the tram throughout the journey)

Tablo 2. Test çalışmalarında kullanılan hidrojen enerji sistemine ait giriş verileri (Input parameters of the hydrogen energy system)

Parametre	Değer [Birim]	Parametre	Değer [Birim]
A	33.5	P_{YH-nom}	100 [kW]
a_{komp}	0.0104	η_{YH}	0.6
b_{komp}	0.437	$\eta_{YH-dön}$	0.95
$m_{hidr,bşlncç}$	40 [kg]	η_{EL}	0.7
$m_{hidr,maks}$	100 [kg]	YR_{EL}	12 [kW/saat]
n	10	AR_{EL}	12 [kW/saat]
YR_{YH}	12 [kW/saat]	P_{EL-nom}	100 [kW]
AR_{YH}	12 [kW/saat]	M_C	10000



Şekil 3. Dinamik elektrik fiyatları (Dynamic pricing scheme)

3.2. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

Çalışmada önerilen modelin etkinliğini göstermek açısından 6 farklı durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Dinamik ve sabit elektrik fiyatları, hidrojen enerji sistemi ile PV sistemin varlığı dikkate alınarak oluşturulan durum çalışmalarına ait detaylı bilgi Tablo 3'te verilmiştir. Burada hidrojen enerji sistemi ile PV sistemin olmadığı ve sabit elektrik fiyatının uygulandığı Durum-1 temel durum olarak kabul edilmektedir.

Tablo 3. Durum çalışmalarına ilişkin detaylar (The details of the evaluated case studies)

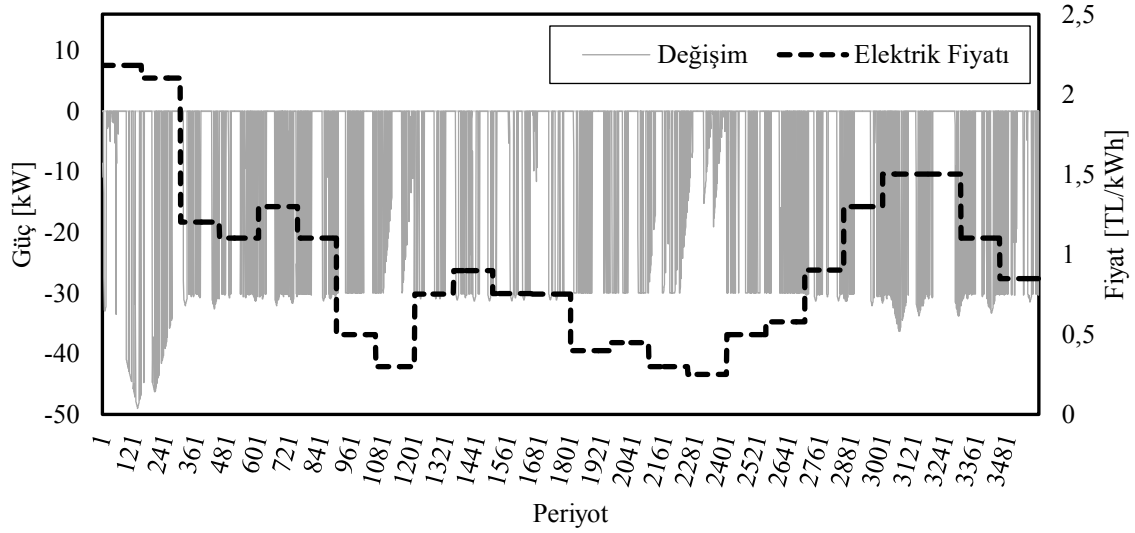
Durum çalışması	Hidrojen enerji sistemi	PV sistem	Dinamik / Sabit elektrik fiyatı
Durum-1 (Temel Durum)	–	–	– / ✓
Durum-2	–	–	✓ / –
Durum-3	✓	–	✓ / –
Durum-4	–	✓	✓ / –
Durum-5	✓	✓	– / ✓
Durum-6	✓	✓	✓ / –

Elde edilen sonuçlara göre her bir durum çalışmasında meydana gelen toplam maliyet Tablo 4'te verilmiştir. Toplam işletme maliyeti temel durumda 367.483 TL olarak gerçekleşmiştir ki bu durum çalışmaları arasındaki en yüksek maliyeti ifade etmektedir. Durum-6 olarak isimlendirilen (hidrojen enerji ve PV güç üretim sisteminin dahil olduğu) durumda toplam maliyet 58.61 TL (yaklaşık olarak %15.89 azalma) azalma göstererek 309.101 TL olarak gerçekleşmiştir. Yine temel duruma göre PV sistem yaklaşık %2.88 maliyetin azaltılmasını sağlamıştır. Durum çalışmaları karşılaştırıldığında toplam maliyet üzerinde en fazla dinamik elektrik fiyatlarının, daha sonra ise PV sistemin etkili olduğu söylenmelidir. Durum-1 ve Durum-2 karşılaştırıldığında sadece dinamik elektrik fiyatının sistem maliyetini azaltma konusunda yaklaşık olarak %13 etkisi söz konusudur. Dinamik fiyatlarının uygulandığı Durum-4 ve Durum-6'yı karşılaştırdığımızda ise hidrojen enerji sisteminin toplam maliyet üzerinde 0.318 TL etki gösterdiği görülmektedir. Hidrojen enerji depolama sisteminin maliyet üzerinde büyük etki göstermese de dinamik elektrik fiyatının uygulandığı durumda büyük fiyat değişimleri durumunda daha fazla kâr elde edebilme konusunda faydalı olabileceği belirtilmelidir. Burada yer alan hidrojen enerji sisteminin kapasitesinin nispeten çok büyük olmadığı da ifade edilmelidir. Bunun dışında hidrojen enerji sistemi kısa süreli elektrik kesintileri konusunda tramvayın desteklenmesi konusunda da fayda sağlayabilir. Ayrıca önerilen sistem sıfır karbon emisyonu sağlayan PV ve hidrojen enerji sistemini içerdiği için çevre için de oldukça fayda sağlayacaktır. Ayrıca önerilen model toplam işletme maliyetini %15,89 oranında azaltabilmektedir ki bu oran hiç de küçümsenmeyecek düzeydedir. Bu açıdan sunulan yaklaşık raylı sistem işletmecilerinin kârlarını arttırmaları konusunda önemli bir avantaj sunabilmektedir. Günümüzde hidrojen tabanlı enerji sistemlerinin yatırım maliyetleri yüksek olsa da gelecekte bu maliyetlerinin giderek daha da azalacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda çevreci özelliği, raylı sisteme esneklik ve kazanç sağlaması ile hidrojen enerji sistemlerinin gelecekte önemli bir yer bulacağı ifade edilebilir.

Tablo 4. Durum çalışmalarında elde edilen toplam işletme maliyetleri (Simulation results of each case studies)

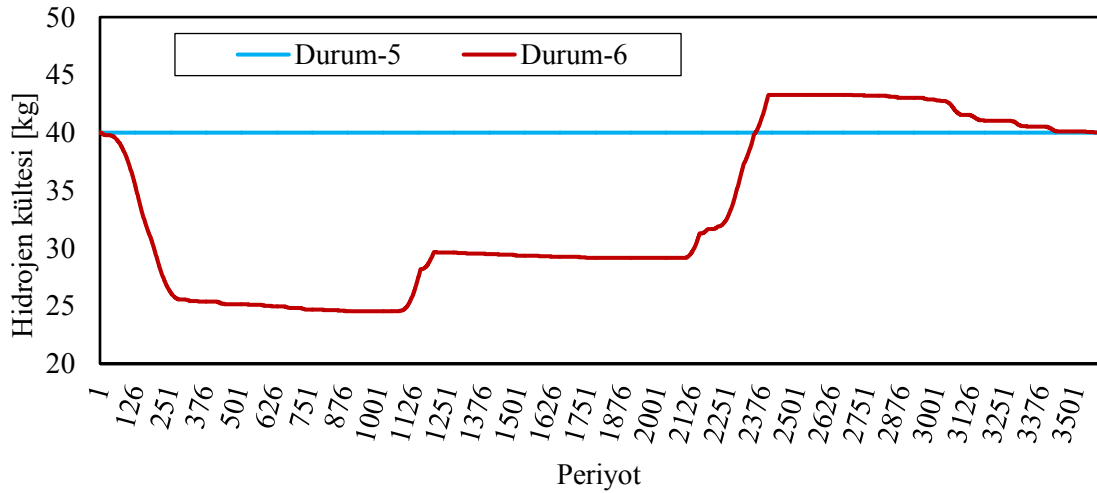
Durum çalışması	Maliyet [TL]	Temel Duruma göre değişim
Durum-1 (Temel Durum)	367,483	–
Durum-2	319,276	-%13,12
Durum-3	319,161	-%13,15
Durum-4	309,419	-%15,80
Durum-5	356,915	-%2,88
Durum-6	309,101	-%15,89

Durum-6'da her bir periyotta şebekeden satın alınan gücün temel durum ile karşılaştırması Şekil 4'te verilmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere elektrik fiyatının en yüksek olduğu saatlerde şebekeden çekilen güçlerde azalma söz konusudur. 2275-2400 periyot aralığında elektrik fiyatı en düşük seviyede olduğu için bu aralıktaki değişim diğer zamanlara göre daha az olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca bir saatte şebekeden 356.9 kWh enerji satın alındığı ifade edilmelidir. Durum-6'da Durum-1'e göre şebekeden satın alınan enerjide 10.67 kWh'lik bir azalma söz konusudur.



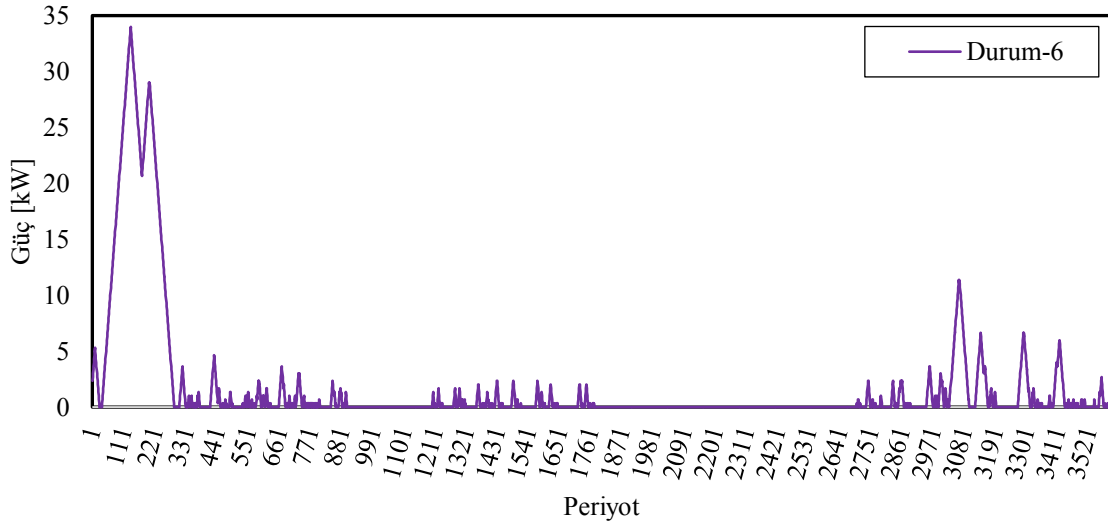
Şekil 4. Durum-6 için Durum-1'e göre şebekeden satın alınan güçlerin değişimi (Change of the purchased power from the grid for Case-6 with respect to Case-1)

Durum-5 ve Durum-6'da hidrojen tankındaki hidrojen molar değişimleri Şekil 5'te verilmektedir. Hidrojen enerji sistemi ve PV sistemin yer aldığı fakat farklı fiyat uygulamalarının düşünüldüğü Durum-5 ve Durum-6 karşılaştırıldığında, Durum-5'te elektrik fiyatı sabit olduğu için bir arbitraj yapma fırsatı söz konusu değildir. Bu açıdan hidrojen enerji sistemi mevcut olmasına rağmen hiç değerlendirilmediği ifade edilmelidir. Dinamik elektrik fiyatlarının uygulandığı ve ayrıca önerilen yapı olan Durum-6'da ise hidrojen enerji sistemi de değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik fiyatının yüksek olduğu ilk periyotlarda hidrojen molar miktarında bir azalma gerçekleşmektedir. Daha sonra elektrik fiyatının nispeten daha düşük olduğu periyotlarda ise hidrojen molar miktarı giderek artmaktadır hatta fiyatın düşük olması sebebiyle başlangıçtaki seviyeden bile daha fazla hidrojen molar depolanmaktadır. İlgili saatin son periyodunda ise hidrojen tankındaki hidrojen molar miktarı çalışmada belirtildiği gibi başlangıçtaki seviye olan 40 kg değerine ulaşmaktadır.



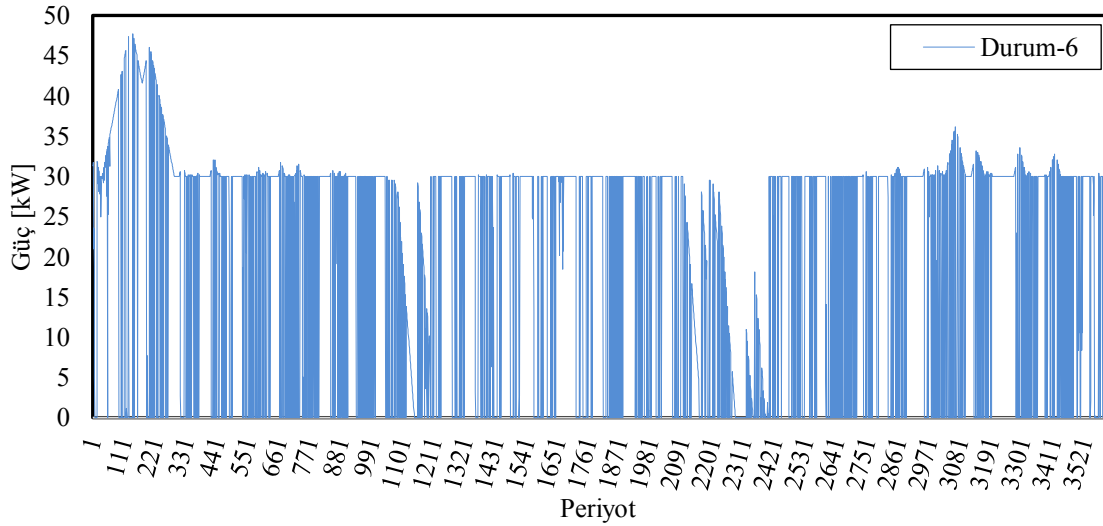
Şekil 5. Hidrojen enerji sistemine ait hidrojen tankındaki hidrojen miktarının değişimi (Change of the amount of hydrogen in the hydrogen tank)

Durum-6'da yakıt hücresi tarafından üretilen güce ait veri Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 5'te yer alan hidrojen molar değişiminden de görülebileceği gibi ilk periyotlarda, ki burada elektrik fiyatı en yüksek seviyelerdedir, yakıt hücresi en fazla güç üretimini gerçekleştirmektedir. İlgili saatin sonunda ise hidrojen miktarının istenen seviyeye gelmesi açısından bir miktar daha güç üretildiği belirtilmelidir.



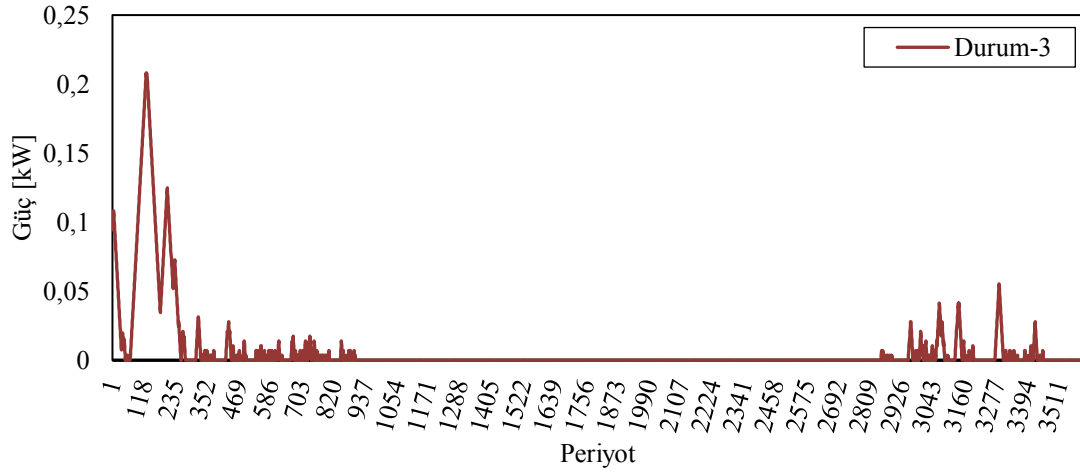
Şekil 6. Durum-6'da yakıt hücresinin ürettiği güç (The produced power by Fuel-cell in Case-6)

Tramvay seyahat rotası boyunca sürekli olarak hareket etmemektedir ve yolcuların inmeleri ve binmeleri için duraklarda bir süre beklemektedir ki rota üzerinde 31 durak yer aldığı belirtilmelidir. Bu bağlamda ilgili saat için sürekli güç üretimi gerçekleştirdiği kabul edilen PV sistemde üretilen fazla güç tramvaya ait fren dirençleri üzerinde harcanmaktadır. Durum-6'da tramvay tarafından tüketilmeyen bu güce ait veri Şekil 7'de verilmektedir. Burada 1 saatlik süre boyunca toplam 18,53 kWh enerjinin tüketilmediği ifade edilmelidir. Bu çalışmada PV sistemden hidrojen enerji sistemine enerji seçeneğinin düşünülmediği ve bu sebeple bu durumun ortaya çıktığını hatırlatmakta fayda vardır.

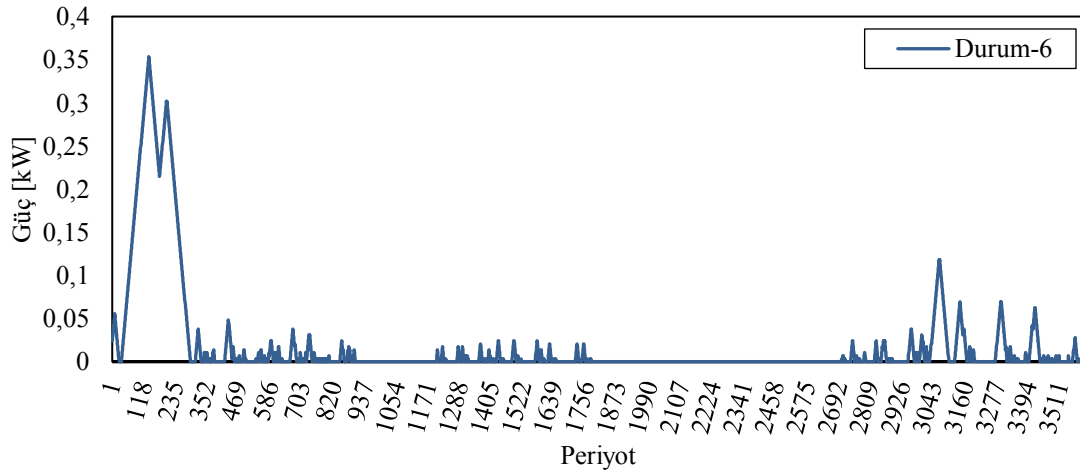


Şekil 7. Tramvay tarafından fren dirençleri üzerinde harcanan fazla yenilenebilir enerji (Excess renewable energy wasted on the braking resistors of the tram)

Durum-3 ve Durum-6'da hidrojen enerji sisteminin içerisinde yer alan kompresör tarafından tüketilen güçler sırasıyla Şekil 8-a ve Şekil 8-b'de verilmektedir. Burada yakıt hücresinin çalıştığı periyotlarda kompresörün de çalıştığı belirtilmelidir. Durum-6 ve Durum-3'te 1 saat boyunca sırasıyla kompresör tarafından 0,019 kWh ve 0,0071 kWh enerji tüketilmektedir.



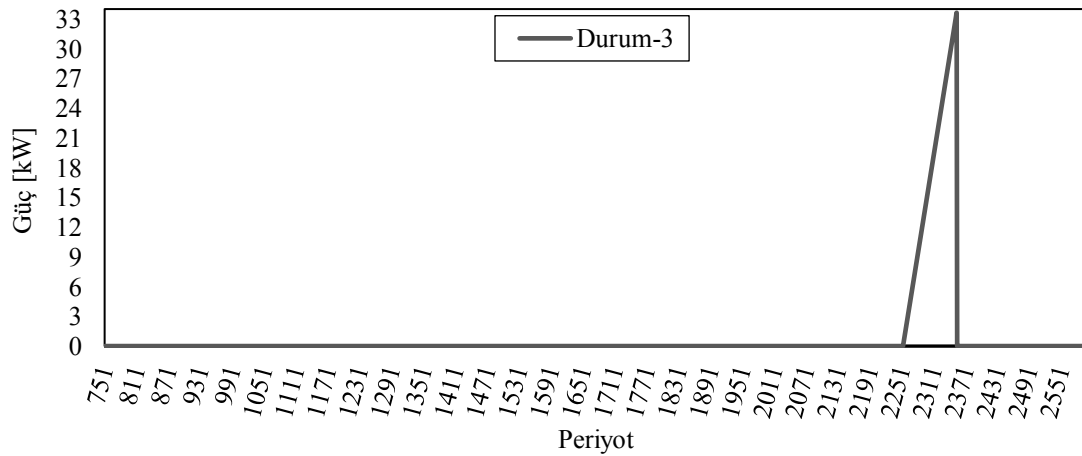
a)



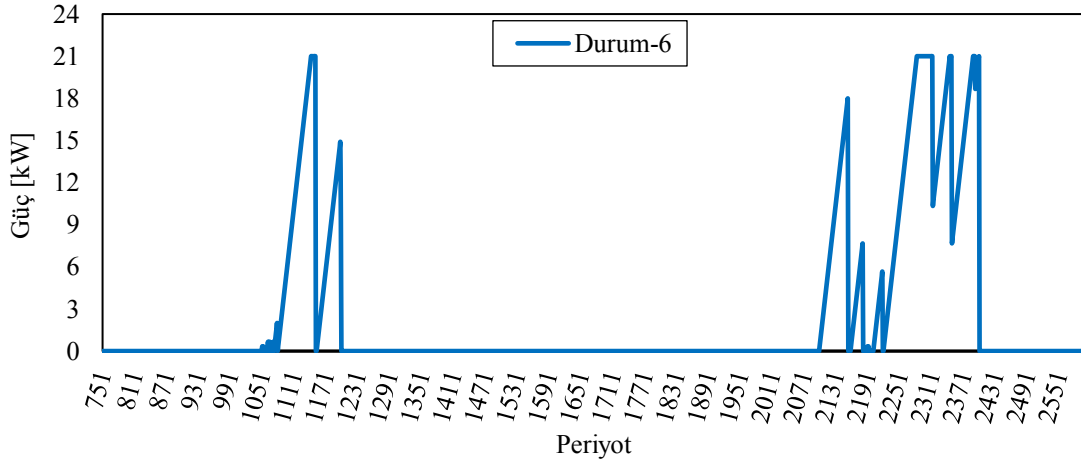
b)

Şekil 8. Kompresör tarafından tüketilen güç a) Durum-3, b) Durum-6 (The power consumed by compressor in Case-3 and Case-6).

Şekil 9-a ve Şekil 9-b'de Durum-3 ve Durum-6 için elektrolizör tarafından hidrojen üretmek için tüketilen güce ait veri yer almaktadır. Durum-3 ve Durum-6'da sırasıyla 0.48 kWh ve 1.25 kWh enerji tüketilmektedir. Burada enerji tüketiminin elektrik fiyatının en ucuz olduğu periyotlarda gerçekleştirildiğinin altı çizilmelidir.



a)



b)

Şekil 9. Durum-3 ve Durum-6'da elektrolizör tarafından tüketilen güç (The power consumed by the electrolyzer in Case-3 and Case-6)

4. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Günümüzde büyük nüfuslu kentlerde ulaşımın önemli bir problem olması sebebiyle konvansiyonel taşıtlardan raylı sisteme doğru bir geçiş söz konusudur. Fakat raylı sistemler nispeten büyük güç tüketimine sahiptirler ve bunların enerji tüketimlerinde zaman, tramvay sayısı ve yolcu sayısı gibi çeşitli değişkenlere bağlı olarak büyük değişimler görülebilmektedir. Bu bağlamda raylı sistemin ekonomik şekilde işletimi ele alınması gereken önemli konulardan biridir.

Bu çalışmada çatısına PV sistem dahil edilen ve ayrıca hidrojen enerji sistemi entegre edilen bir tramvayın dinamik elektrik fiyatları da düşünülerek optimum enerji yönetim modeli sunulmuştur. Gerçekleştirilen test çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre önerilen sistemin toplam elektrik satın alma maliyetini önemli derecede düşürebildiği görülmüştür. Maliyetleri düşürmede sırasıyla dinamik elektrik fiyatları, PV sistem ve hidrojen enerji sisteminin etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fakat daha büyük kapasiteli bir hidrojen enerji sistemi ile maliyet daha fazla azaltılabileceği gibi işletimsel esneklik ve elektrik kesintilerine karşı güvenilirlik sağlama konusunda daha fazla fayda elde edilebilir. Ayrıca şebekeden çekilen enerji miktarı azaltıldığı için hat kapasitesi genişlemeleri ve şebeke yatırımları geciktirilebilir. Dinamik elektrik fiyatları toplam işletme maliyetini %13 oranında azaltabilirken, tramvayın çatısına yerleştirilen PV sistem toplam giderlerin azaltılması konusunda %3'lük bir fayda sağlayabilmektedir. Ayrıca hidrojen enerji sistemi, PV sistem ve dinamik elektrik fiyatının yer aldığı önerilen model ile toplam maliyet %15,89 oranında düşürülebilmektedir. %15,89 oranındaki maliyet azaltımı raylı sistem işletmecisine önemli kazanç sunabilmektedir. Ayrıca sıfır karbon PV sistem ve hidrojen enerji sistemi karbon emisyonlarının azaltılması konusunda da fayda sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda PV sistemden hidrojen enerji sistemine enerji depolama seçeneği ve tramvaya ait rejeneratif frenleme enerjisi optimum çalışma kapsamında değerlendirilebilir. Ayrıca farklı türdeki enerji depolama sistemleri de modele dahil edilebilir. Bunun dışında raylı sistemde belirsizlikleri oluşturan tramvaya ait güç tüketimi ve şebekeden satın alınan enerjiye ait elektrik fiyatları için stokastik yaklaşım ele alınabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Arévalo, P., Cano, A., Jurado, F. (2020). Comparative study of two new energy control systems based on PEMFC for a hybrid tramway in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25357-25377.
- Cano, A., Arévalo, P., Benavides, D., Jurado, F. (2021). Sustainable tramway, techno-economic analysis and environmental effects in an urban public transport. A comparative study, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100462, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100462>.
- Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., Kondo, K., & Fratelli, L. (2015). Line-voltage control based on wayside energy storage systems for tramway networks. *IEEE Transactions on power electronics*, 31(1), 884-899.
- Di Noia, L. P., Genduso, F., Miceli, R., & Rizzo, R. (2018). Optimal integration of hybrid supercapacitor and IPT system for a free-catenary tramway. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 794-801.

- Eren, Y. (2022). Uncertainty-aware non-supplied load minimization oriented demand response program for PV/FC power system with electrolyzer back-up. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(19), 10715-10735.
- Garcia, P., Fernandez, L. M., Garcia, C. A., & Jurado, F. (2009). Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 4013-4023.
- Han, Y., Cao, N., Hong, Z., Li Q., Chen, W. (2016). Experimental Study on Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Tramway, *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 17-20 October 2016, Hangzhou, China, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791686.
- Han, Y., Li, Q., Wang, T., Chen, W., & Ma, L. (2018). Multisource coordination energy management strategy based on SOC consensus for a PEMFC–battery–supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 296-305.
- Herrera, V. I., Gaztañaga, H., Milo, A., Saez-de-Ibarra, A., Etxeberria-Otadui, I., & Nieva, T. (2016). Optimal energy management and sizing of a battery--supercapacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3367-3377.
- Khayyam, S., Ponci, F., Goikoetxea, J., Recagno, V., Bagliano, V., & Monti, A. (2016). Railway energy management system: Centralized–decentralized automation architecture. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 1164-1175.
- Li, Q., Wang, T., Dai, C., Chen, W., & Ma, L. (2018). Power management strategy based on adaptive droop control for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(7), 5658-5670.
- Loy-Benitez, J., Safder, U., Nguyen, H. T., Li, Q., Woo, T., & Yoo, C. (2021). Techno-economic assessment and smart management of an integrated fuel cell-based energy system with absorption chiller for power, hydrogen, heating, and cooling in an electrified railway network. *Energy*, 233, 121099.
- Torreglosa, J. P., Garcia, P., Fernández, L. M., & Jurado, F. (2013). Predictive control for the energy management of a fuel-cell-battery–supercapacitor tramway. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 276-285.
- Yang, H., Zhang, G., Wang, T., Li Q., Chen, W. (2016). Coordination Control for a PEMFC-Battery-Supercapacitor Hybrid Tramway," *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 17-20 October 2016, Hangzhou, China, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791640.
- Zhang, G., Li, Q., Chen, W., & Meng, X. (2020). Synthetic strategy combining speed self-adjusting operation control and adaptive power allocation for fuel cell hybrid tramway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2), 1454-1465.
- Zhang, G., Li, Q., Chen, W., Meng, X., Deng, H. (2019). A coupled power-voltage equilibrium strategy based on droop control for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid tramway, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(35), 19370-19383, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.070>.
- Zhang, W., Li, J., Xu, L., Ouyang, M., Liu, Y., Han, Q., Li, K. (2016). Comparison study on life-cycle costs of different trams powered by fuel cell systems and others, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), 16577-16591, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.032>.



TOPLU TAŞIMA YOLCULARININ SOSYO-DEMOGRAFİK ÖZELLİKLERİNİN ERİŞİLEBİLİRLİK, BEKLEME VE SEYAHAT SÜRESİ ALGISINA ETKİSİ

Buket ÇAPALI^{1*}, Serdal TERZİ², Mehmet SALTAN²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Hizmet Faktörleri,
Toplu Taşıma,
Erişilebilirlik,
Kent İçi Ulaşım,
Çok Terimli Logit
Regresyon.*

Öz

Toplu taşıma hizmetinin kalitesini belirleyen faktörlerden en önemlileri seyahat süresi, bekleme süresi ve erişilebilirlik süresidir. Bu çalışmada, Isparta ili toplu taşıma sistemi incelenmiş ve yolcuların algularına dayalı hizmet kalitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle en çok kullanılan beş hat seçilmiştir. Hatlarda araç içi anket çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Metodoloji, yolcuların duraklara erişim süresi, duraklarda bekleme süresi ve seyahat süresi olmak üzere üç parametrenin ağırlıklarının yolcuların sosyo-demografik özelliklerine göre istatistiksel araçlarla belirlenmesini içermektedir. Bu çalışmada, hizmet kalitesini iyileştirmek ve toplu taşımaya daha fazla yolcu çekmek için parametrelerin ağırlıklarının çok terimli logit modeli ile etkileşimi araştırılmıştır. Pearson modeli kullanılarak birbirleri ile anlamlılık dereceleri tespit edilmiştir. İkidenden fazla değeri olan çalışma durumu (çalışıyor, öğrenci, emekli, çalışmıyor, öğrenci ve çalışıyor), eğitim durumu (ilköğretim, lise, üniversite) bağımlı değişken olarak ele alınırken, bağımsız değişkenler erişilebilirlik süresi, bekleme süresi ve seyahat süresidir. Bunlara ek olarak yolcuların yaşı, seyahat amacı, cinsiyeti, kent kart kullanımı ve özel araç sahipliği açıklayıcı değişkenler olarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak çok terimli logit modelinde çalışma durumu bağımlı değişken seçildiğinde erişilebilirlik süresi ($\beta_{\text{erişilebilirlik}}=0.0808$), bekleme süresi ($\beta_{\text{bekleme}}=-0.0709$) ve seyahat süresi ($\beta_{\text{seyahat}}=0.1246$) bağımsız değişken katsayıları elde edilmiştir. Eğitim durumu bağımlı değişken seçildiğinde erişilebilirlik süresi ($\beta_{\text{erişilebilirlik}}=0.0518$), bekleme süresi ($\beta_{\text{bekleme}}=-0.1963$) ve seyahat süresi ($\beta_{\text{seyahat}}=0.1711$) bağımsız değişken katsayıları elde edilmiştir.

THE EFFECT OF PUBLIC TRANSPORT PASSENGERS' SOCIO-DEMOGRAPHIC CHARACTERISTICS ON ACCESSIBILITY, WAITING AND TRAVEL TIME PERCEPTION

Keywords

*Service Factors,
Public Transportation,
Accessibility,
Urban Transportation,
Multinomial Logit
Regression.*

Abstract

The most important factors that determine the quality of public transportation service are travel time, waiting time and access time. In this study, the public transportation system of Isparta is examined and it is aimed to determine the service quality that based on the perceptions of the passengers. For this reason, the five most used lines were selected. In-vehicle surveys were carried out on the lines. The methodology involves determining the weights of three parameters according to socio-demographic characteristics with statistical tools: access time of passengers to stops, waiting time at the stops and travel time. This study was investigated to improve service quality and attract more passengers to public transport to the interaction of the weights of the parameters with the multi nominal logit model. Significance levels with each other were determined using the Pearson model. While working status with more than two values (employed, student, retired, unemployed, student and employed) and educational status (secondary school, high school, university) is considered as the dependent variable, the independent variables are access time, waiting time and travel time. In addition to these, age, purpose of travel, gender, city card usage and private vehicle ownership of the

* İlgili yazar / Corresponding author: buketcapali@sdu.edu.tr, +90-246-211-1791

passengers is found as explanatory variables. As a result, it is seen that the change in working status and educational status affected the perceived service quality. As a result, when working status is chosen as the dependent variable in the multinomial logit model, the independent variable coefficients are obtained for accessibility time ($\beta_{\text{accessibility}}=0.0808$), waiting time ($\beta_{\text{wait}}=-0.0709$) and travel time ($\beta_{\text{travel}}=0.1246$). When education status is chosen as the dependent variable, the independent variable coefficients are obtained for accessibility ($\beta_{\text{accessibility}}=0.0518$), waiting time ($\beta_{\text{wait}}=-0.1963$) and travel time ($\beta_{\text{travel}}=0.1711$).

Alıntı / Cite

Çapalı, B., Terzi, S., Saltan, M., (2022) Toplu Taşıma Yolcularının Sosyo-Demografik Özelliklerinin Erişilebilirlik, Bekleme ve Seyahat Süresi Algısına Etkisi., Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1303-1314.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Çapalı, 0000-0003-1917-1654
S. Terzi, 0000-0002-4776-824X
M. Saltan, 0000-0001-6221-4918

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.03.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	03.08.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Kentlerde giderek artan nüfus, sorun olarak kent yaşayanlarının karşısına çıkmakta ve kentler ulaşımdaki talep artışını karşılamaya çalışmaktadır. Yerleşim alanlarının giderek artması beraberinde kentsel hareketliliği de getirmekte ve ulaşım sorunu giderek büyümektedir. Sanayi, ticaret, yerleşim, maden, nüfus, sosyo-ekonomik yapı vb. etkenler trafik çekimi veya doğurganlığı oluşturarak trafiğin dinamik bir duruma geçmesine neden olmaktadır. Artan kentleşme ile nüfusun büyük çoğunluğunun ekonomik sebeplerle şehirlerde yaşamayı tercih ettiği ülkemizde, kentleşmenin getirdiği sorunlar giderek artmaktadır. Günümüzde bu sorunların başında ulaşım sorunu gelmektedir.

Kent içi ulaşımda, kentleşme hareketlerinin artması kent içinde özel araç kullanımını geniş ölçüde artırmaktadır. Bu durum trafik yoğunluğu, hava kirliliği, akaryakıt kullanımının artması, gürültü ve otopark problemleri gibi olumsuz faktörleri de beraberinde getirmektedir. Toplu taşıma, seyahat edenler için hareketliliği sağlayan çevre dostu çözüm yollarından biridir (De Vos vd., 2020). Toplu taşıma sisteminin ön plana çıkartılması ve iyileştirilmesi ile yolcuların verimli, ekonomik ve çevreci bir şekilde taşınması müşteri memnuniyetini artırarak kaynak tüketimini azaltacaktır.

Toplu taşıma sistem tercihini etkileyen en önemli parametrelerin temizlik, konfor, dakiklik, bekleme koşulları ve sürücü davranışı gibi unsurlar olarak belirlenmiş ve değerlendirilmiştir (De Oña vd., 2012; Dell'Olio vd., 2011). Hindistan'da yapılan bir araştırmada konforun toplu taşıma seçim davranışını etkilediği ve toplu taşıma kullanıcılarının en çok bekleme süresi, temizlik ve konfora değer verdiği tespit edilmiştir (Sarkar ve Mallikarjuna, 2018). Kanada, Calgary'de yürütülen bir çalışmanın sonuçları, toplu taşıma hizmeti güvenilirliğinin, toplu taşıma araçlarını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir. Toplu taşıma yolculuk süresi, yürüme süresi, bekleme süresi değerlerini azaltmak ve telafi etmek için daha sık, daha erişilebilir ve daha hızlı toplu taşıma hizmetinin zorunlu olduğunu tavsiye etmişlerdir (Habib vd., 2011; Wardman, 2004). Pakistan'ın Lahore kentinde durakta bekleme süresinin, yolculuk amacının, mesleğin, gelirin ve araç sahipliğinin kullanıcıların tutum ve tercihlerinde önemli belirleyiciler olduğu savunulmuştur. Pekin'deki 100 otobüs hattı üzerinde yapılan bir araştırma, tatmin edici en düşük puanların dakiklik ile ilgili olduğunu ve bunun seyahat amacı ve seyahat süresinden etkilenebileceğini belirtmişlerdir (Javid vd., 2021). Geleneksel olarak, toplu taşıma hizmet kalitesinin değerlendirilmesi, işletme bakış açısından gerçekleştirilmiştir. Taşıma hizmetinin verimliliğini, etkinliğini ve kalitesini sağlamak için hizmetin performansını sürekli olarak değerlendirmek gerekir. Bu durum toplu taşıma sisteminin, yolcuları çekmeye devam etmelerini ve sektörde rekabetçi kalmalarını sağlar (İslam, 2021).

Toplu taşıma sistemleri ile ilgili tutum, algı ve bilgilerini anlamak, verimli toplu taşıma sistemleri için önemlidir. Herhangi bir kentsel alanda verimli bir toplu taşıma sistemine olan talep, hareketlilik, çevre ve enerji hedeflerinden kaynaklanmaktadır. Bir toplu taşıma sisteminin hizmet kalitesinin ölçülmesi zorlu bir araştırma konusudur ve toplu taşıma hizmeti sağlayıcıları ve düzenleyici kurumlar için büyük önem taşımaktadır (Hensher vd., 2003). Bir toplu taşıma sisteminin gerçek performansı, toplu taşıma kullanıcılarının bakış açısından değerlendirilmelidir (Fu ve Xin, 2007). Kullanıcıların nasıl algıladıklarına dayalı olarak toplu taşıma hizmeti kalitesinin analizine yönelik bir talep olmasına rağmen (Joewono ve Kubota H., 2007), kullanıcıların toplu taşıma hizmeti kalitesi algılarının ardındaki tutumlara veya psikolojik faktörlere gerçekten odaklanan çok az çalışma vardır.

Bu çalışmada toplu taşıma sistemi kullanıcılarının bekleme süresi, erişilebilirlik süresi ve seyahat süresi algılarını

etkileyen sosyo-demografik özellikler anket yardımı ile elde edilmiş ve elde edilen veriler çok terimli logit regresyon modeli kullanılarak yorumlanmıştır. Bu çalışmanın amacı elde edilmesi zor kişisel bilgiye dayalı sosyo-demografik özellikleri elde ederek toplu taşıma sisteminin iyileştirilmesi için gerekli önemli parametrelerin (erişilebilirlik, bekleme, seyahat süreleri) yolcu algıları üzerindeki etkilerini incelemektir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Şehirlerde artan trafik sıkışıklığı ve kirlilik, kentsel alanların yaşanabilirliğini ve gelişimini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Sonuç olarak, toplu taşıma erişilebilirliğinin artan önemi, ulaşım planlaması, kentsel coğrafya ve sürdürülebilir kalkınma alanlarındaki araştırmacılar arasında büyük ilgi görmektedir. Giderek daha ciddi hale gelen bu sorunları çözmeye yardımcı olmak için, toplu taşıma sistemi değerlendirmesi, arazi kullanımı ve şehirlerdeki ulaşım planlaması ile ilgili toplu taşıma çalışmaları ve erişilebilirlik ölçümleri gerekmektedir (Malekzadeh ve Chung, 2019). Erişilebilirlik kavramı ulaşım literatüründe elli yıldan fazla bir süredir tartışılrsa da tanımlanması ve ölçülmesi hala zordur (Wang vd., 2013). Ikhrata ve Michell, (1997), toplu taşıma erişilebilirliğini, toplu taşıma kullanıcılarının bakış açısından, sistemin bir değerlendirmesi olarak tanımladılar. Toplu taşıma erişilebilirliği tanımı, toplu taşıma kullanıcılarının toplu taşıma sistemindeki davranışlarını vurgulamakta ve yolcuların, varış noktalarına ulaşmak için kullandıkları toplu taşıma hizmetlerini nasıl anladıklarını ve hangi parametrelerin kendi bakış açılarından önemli olduğunu (örneğin, seyahat süresi) açıklamaktadır. ABD'deki son araştırmalar, çoğu planlama kurumunun mobilite geliştirmeyi erişilebilirliği iyileştirmenin bir yolu olarak gördüğünü vurgulamaktadır (Proffitt vd., 2019).

Toplu taşıma sisteminin güvenilirliğinin artması ile yolcu memnuniyetinin ve yolcu talebinin de aynı oranda arttığı yapılan çalışmalarda görülmektedir. Seyahat süresinin doğru analiz edilmesi ve belirlenmesi toplu taşıma aracının hizmet kalitesinde önemli bir anahtardır (Bates vd., 2001; Brownstone vd., 2005; Golob vd., 1972; Prashker, 1979). Toplu taşıma aracının; kapasite fazlası yolcu taşınması, trafik akımının yoğunluğu ve sinyalizasyon kavşaklarının fazla olması nedeniyle durağa ulaşımının gecikmesi, yolcuların uzun süre beklemesi gibi durumların yolcular üzerinde olumsuz duygulara neden olarak, toplu taşıma hizmetine olan güveni etkilediği yapılan çalışmalarda görülmektedir (Carrel vd., 2013). Toplu taşıma sistemi hizmet kalitesini değerlendirirken önemli bir husus yolcuların her bir niteliğe ne kadar ağırlık vereceğini belirlemektir. De Oña vd. (2012) çalışmalarında, 2007 yılında İspanya Granada metro toplu taşıma sisteminde anket ile toplanan verilerle regresyon ağacı yöntemi kullanarak toplu taşıma hizmetini etkileyen faktörleri belirlemek için bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi sınıflandırmışlardır. Değerlendirme de yolcu algısının temel olarak sefer sıklığından etkilendiğini, ön değerlendirme de hız ve dakiklik, otobüs durağına yakınlık, güvenlik ve ücretin önem kazanan kalite ile ilgili diğer nitelikler olduğunu öne sürmüşlerdir. Akademik çalışmalarda bahsedilmesine rağmen (Bohte vd., 2009; Mokhtarian vd., 2015), hedefe yönelik davranış modeli yalnızca seyahat davranışı bağlamında sınırlı ölçüde analiz edilmiştir. Carrus vd., (2008), seyahat açısından inceleyen çalışmalarında toplu taşımayı kullanma isteğinin toplu taşımaya yönelik tutumlardan ve olumlu beklenen duygulardan etkilendiğini savunmuşlardır. Bu istek de toplu taşıma ile seyahat etme isteğini olumlu yönde etkilemektedir.

Dell'Olio vd. (2011) çalışmalarında, bekleme süresi, temizlik ve konfor parametrelerini toplu taşıma da yolcuların en çok tercih ettiği değişkenler olarak göstermektedir. Sürücü nezaketi, otobüs doluluk ve yolculuk süresi değişkenlerine daha az ağırlık verilmektedir. Araç içi doluluk en az önemli olan değişken olarak bulunmuştur. Ortaya çıkan ağırlık neredeyse eşittir. İncelenen farklı etkileşimler sosyo-ekonomik özellikler ile istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bunun nedenini, daha fazla talebin olduğu hatlarda, daha fazla otobüs tahsis edilmesi ile yolcuların durumu çözülmesi gereken bir sorun olarak görmemeleri olarak açıklamışlardır.

Konfor, toplu taşıma hizmetlerinde algılanan memnuniyeti etkileyen önemli bir faktör olarak kabul edilmiştir (Beirão ve Cabral, 2007; Dell'Olio vd., 2011; Fellesson ve Friman, 2008; Lin vd., 2010) Otobüslerde konfor yumuşak ve temiz koltukların mevcudiyetine, araç içi sabit sıcaklık aralığına ve düşük doluluk faktörüne bağlı olabilir (Beirão ve Cabral, 2007), Araç doluluğunun artması ile kişisel güvenlik ve güvenliğe yönelik artan risk algıları (Cox vd., 2006; Katz ve Rahman, 2010), kaygı (Cheng, 2010) ve stres artabilir (Mohd Mahudin vd., 2011).

Gündoğdu vd. (2021) çalışmalarında, Budapeşte toplu taşıma hizmet kalitesinin belirlenmesinde doğrusal atama modeli kullanmışlardır. Çok sayıda araştırmacı toplu taşıma sisteminin hizmet kalitesini etkileyen özellikleri araştırmıştır. Bu konudaki çalışmalardan en önemlisi seyahat süresi, bekleme süresi, erişilebilirlik, uygunluk ve güvenliğin değerlendirildiği çalışmadır (Nassereddine ve Eskandari, 2017). Eboli vd. (2015) çalışmalarında, toplu taşıma sisteminde güvenilirliğin kilit bir faktör olduğunu vurgulamıştır.

Chauhan vd. (2021) çalışmalarında, toplu taşıma sistemi memnuniyet anketi ile hizmet kalitesini etkileyen faktörleri ve etkilerini incelemişlerdir. Bu faktörler; aktarma ortamı ve tesisler, güvenlik, ulaşım modları ve seyahat bilgileri, erişilebilirlik ve yön işaretleri, konfor, rahatlık ve çevre kalitesi ile personel yönetimidir. Çalışma sonucunda hizmet kalitesinin en çok aktarma ortamından ve önemli tesislerden, ardından emniyet ve güvenlikten

etkilendiği belirtilmiştir. Beimborn vd., (2003) çalışmalarında erişilebilirlik gibi toplu taşıma hizmeti faktörlerinin tür seçimi ile ilişkisini incelemişlerdir. Bireysel yolculuk verileri, özel araç sahipliği, toplu taşıma bağlantısı ve bir toplu taşıma durağına olan uzaklık hakkındaki bilgilere dayalı olarak toplu taşıma veya otomobil seçimi belirlenmiştir. Toplu taşımayı tercih eden kullanıcıları arasında, otomobil ve toplu taşıma türleri arasındaki seyahat sürelerindeki farklılıklar tür seçimini çok az etkilerken toplu taşımaya yürüyerek erişimin düşünülenden daha fazla etkisi olduğunu tespit etmişlerdir.

Pan vd. (2022) çalışmalarında kişiye ayrılan bir koltuk olması durumunda toplu taşıma aracını beklemeye istekli olup olmayacağını araştırmışlardır. Havanın güneşli/güzel olması, çok soğuk olmaması, seyahat amacının bir arkadaş veya alışveriş olması, daha kısa otobüs bekleme süresi gibi etkenlerin toplu taşıma seçim davranışını nasıl etkilediğini ikili logit model ve çok terimli logit model kullanarak incelemişlerdir. Yaş, cinsiyet, çalışma durumu, ehliyet sahibi olmak ve araç kullanılabilirliği, teşvik tercihi için önemli belirleyiciler olduğunu çalışmalarında sunmuşlardır.

Makale, çalışma alanı ve sosyo-demografik karakteristiği, metodoloji, veri toplama tekniği ve anket tasarımı, anket sonuçları son olarak da sonuçlar ve tartışma bölümlerinden oluşmaktadır.

2.1. Çalışma Alanı ve Sosyo-Demografik Karakteristiği (Study Area and Sosyo-Demographic Characteristic)

Çalışma alanı olarak seçilen Isparta ili toplam nüfusunun adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçlarına göre (31 Aralık 2020) 440.304 kişidir. Nüfusun %73,65'i il ve ilçe merkezinde, %26,35'i belde ve köylerde kayıtlıdır (TÜİK, 2021a). Dünya nüfusunun ise yarısından fazlası yaklaşık %55'i kentsel alanlarda yaşamakta ve bu oranının 2050 yılına kadar %68'e çıkması beklenmektedir (DESA, 2018). Isparta ilindeki 2010-2020 yılları arasında trafiğe kaydı yapılan motorlu kara taşıt sayısı yıllık ortalama büyüme oranı ortalaması %2,98, on yıllık büyüme oranı %38,6'dır (TÜİK, 2021b). Kasım 2021 TÜİK verilerine göre Türkiye, 2021 yılı motorlu kara taşıt toplam sayısı 25.188.967'dir. En yüksek oran %54,29 ile otomobil ardından %16,29 ve %14,82 ile sırasıyla kamyonet ve motosiklet, otobüsler ise %0,83'ünü oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında hatlara göre yolcu grafiği incelenmiş ve araştırmada aynı güzergâh üzerinde 14 gidiş yönü 17 dönüş yönünde olmak üzere toplam 31 durağı ortak kullanan ve en fazla yolcu yoğunluğuna sahip 5 hat çalışma alanı olarak seçilmiştir. Beş hat olmasının nedeni ortak kullanılan durak sayısının yüksek olması, gidiş yönünde 4,5 km'lik dönüş yönünde 6 km'lik güzergâhı ortak olarak kullanmasıdır. Seçilen hatlarda, sabah 08:00-09:00 arası (gidiş ve dönüş), öğle 12:00-13:00 (gidiş ve dönüş), akşam 16:00-17:00 (gidiş ve dönüş) saatleri arasında, otobüs içerisinde anket yapılmıştır. Tablo 2.1'de seçilen hatlar, durak sayıları, hat uzunlukları ve yapılan anket sayıları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. Seçilen hatlar ve özellikleri (Selected Lines and Features)

HAT NUMARASI	DURAK SAYISI	SİNYALİZE KAVŞAK SAYISI	HAT UZUNLUĞU (GİDİŞ - DÖNÜŞ) (m)	YAPILAN ANKET SAYISI
4 Nolu Hat	40	17	8.021 - 8.564	390
8 Nolu Hat	44	17	8.261 - 10.775	186
9 Nolu Hat	50	20	6.762 - 12.871	104
12 Nolu Hat	43	16	9.117 - 9.364	506
18 Nolu Hat	69	18	9.025 - 13.358	108

Yapılan hat analizleri sonucunda; 4 Nolu hattın yolcu yük faktörü %73, 8 Nolu hattın yolcu yük faktörü %47, 9 Nolu hattın yolcu yük faktörü %81, 12 Nolu hattın yolcu yük faktörü %75 ve 18 Nolu hattın yolcu yük faktörü ise %97 olarak elde edilmiştir. Yolcu yük faktörü (YF), formül 1 ile hesaplanmıştır.

$$YF = \frac{KS}{YS} \quad (1)$$

Burada KS otobüs koltuk sayısını, YS yolcu sayısını ifade etmektedir.

Anket çalışması kapsamında toplu taşıma yolcularına seyahat amacı, çalışma durumu, cinsiyet, eğitim durumu, araç sahipliği, kent kart kullanımı soruları sorulmuş ve sosyo-demografik özellikler elde edilmiştir. Bağımlı değişkenleri belirlemek için durağa yürüme süresi (erişilebilirlik), durakta bekleme süresi, yolculuk süresi

değerleri sorulmuştur. Süre değerleri yolcunun algısına göre değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenliği etkileyen altı sosyo-demografik özellik ve üç bağımlı değişken olmak üzere dokuz değişken anket yardımı ile elde edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında toplu taşıma sistemi kullanıcıları tarafından istenen hizmet kalitesini incelemek için kullanılan metodoloji açıklanmaktadır. Isparta ili için otobüs, tek toplu taşıma modudur. Bu nedenle hizmet kalitesinin artırılması çok önemlidir. Tüm çalışma kullanıcıların algı ve beklentilerine dayalıdır. Bu tür çalışmalar sınırlı sayıdadır ve hizmetin iyileştirilmesi için gereken temel faktörlerin belirlenmesinde faydalıdır.

3. Metodoloji (Methodology)

3.1. Veri Toplama ve Anket Tasarımı (Data Collection and Survey Design)

Bu araştırma yolcuların verimli ve kaliteli toplu taşıma hizmetinden beklentilerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Yolcuların durağa erişim süresi, otobüs durağında bekleme süresi, yolculuk süresi gibi değişkenlerin hizmet kalitesindeki önemini ve ağırlığını belirlemek alt hedeflerdir.

Araştırmanın amaçlarını gerçekleştirmek için veriler otobüs içerisinde yolcular ile yapılan anket ile algı ve beklentilerini belirlemek için yapılmıştır. Bu anket araştırması için minimum örneklem boyutu formül 2 ile belirlenmiştir (Johnson ve Wichern, 2002).

$$n \geq N \left[1 + \frac{N-1}{P(1-P)} \left(\frac{d}{z_{\alpha/2}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (2)$$

Burada n minimum örnek boyutu, N hattın günlük yolcu sayısı, P ölçülecek kalite özellikleridir. Johnson ve Wichern, (2002)'a göre tarafsız durumlar veya hiç deneyim olmadığı durumlarda P değeri 0,5 olarak alınır. d %5 hata payıdır. $z_{\alpha/2}$ %95 güven aralığı için 1,96 değeri alınarak minimum örnek boyutu hesaplanır. Denklem 2 kullanılarak elde edilen örneklem boyutları 4,8,9,12,18 nolu hat için sırasıyla 315, 186, 104, 280 ve 108'dir. Tablo 1'de hesaplanan örneklem boyutlarına göre yapılan anket sayısı değerleri verilmiştir.

Anket iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm yolcuların yaş cinsiyet, araç sahipliği, kent kart kullanımına ilişkin sosyo-demografik sorulardan oluşmaktadır. İkinci bölümde durağa nereden geldiği indikten sonra nereye gideceği, durağa yürüme süresi, durakta bekleme süresi ve ortalama seyahat süresi bilgileri elde edilmiştir.

3.2. Anket Sonuçları (Survey Results)

Bu araştırma, toplu taşıma kullanıcılarının kendilerine sunulan hizmette aradığı özellikleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Anketler otobüs içerisinde seyahat esnasında yolcular ile birebir soru-cevap şeklinde gerçekleştirilmiştir. Anketlerden elde edilen cevaplar dijital ortama aktarıldıktan sonra değişkenler arasındaki anlamlılık ilişkisi için pearson korelasyonuna bakılmış ve çok terimli logit model kullanılarak analiz edilmiştir. İki değer arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla literatürde oldukça yaygın kullanılan pearson korelasyonu kullanılmıştır. En iyi korelasyona sahip değerler birbirleri ile ilişkisini belirleyebilmek için eğitim durumu ve çalışma durumu bağımlı değişken olarak ele alınırken, bağımsız değişkenler erişilebilirlik süresi, bekleme süresi ve seyahat süresidir. Ek olarak yaş, cinsiyet, araç sahipliği, kent kart kullanımı ve özel araç sahipliği açıklayıcı değişkenler olarak yorumlanmıştır. İstenen kalitenin temsili değişkenleri erişilebilirlik süresi, bekleme süresi, yolculuk süresidir. Bu istatistiksel analizlerin sonuçları bu bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Anketler, iş günlerinde ve yoğun olarak kullanılan saatlerde otobüs içerisinde toplu taşıma kullanıcıları ile birebir soru-cevap şeklinde gerçekleştirilmiştir. Toplam 1294 anket yapılmıştır. Her bir hat için otobüs durağına erişim süresi, durakta bekleme süresi, seyahat süresi parametreleri bağımsız değişken olarak belirlenmiş ve eğitim düzeyi, çalışma durumu bağımlı değişkenlerine göre aralarındaki ilişki incelenerek potansiyel kullanıcıların algı düzeylerinin bağımsız değişkenlere etkisi belirlenmiştir.

Modelleme aşamasına başlamadan önce anketin tanımlayıcı istatistikleri ve sosyo-demografik özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler çalışma durumu, cinsiyet, eğitim durumu, araç sahipliği, kent kart kullanımı ve seyahat amacı ve ankete katılanların hatlara göre yaş ortalamasıdır. Hatlarda yapılan anketlere verilen cevaplara göre her hatta ait sosyo-demografik özellikler Şekil 1 ve Tablo2'de görülmektedir.

Tablo 2 incelendiğinde yolcuların seyahat amacı sorusuna verdiği cevaplara göre, 4 ve 8 nolu hat yolcularının %80 üzerinde okula gitmek veya okuldan dönmek için seyahat ettiği görülmektedir. 12 nolu hatta %42 ile okula gitmek veya dönmek ilk sırada %18 ile sağlık için seyahat ikinci sırada yer almaktadır. 4, 8 ve 12 nolu hatların

üniversitenin doğu ve batı yerleşke güzergahında olmaları okula gitmek veya okuldan dönmek cevabı üzerinde etkilidir. 9 nolu hattı kullanan yolcuların %25'inin arkadaş/akraba ziyareti için seyahat ettikleri ve bunu %19 ile sağlık, %17 ile sinema, spor vb. aktivitelerle boş zamanlarını değerlendirmek takip ettiği görülmektedir. 18 nolu hattı kullanan yolculardan %23'ü işe gitmek veya dönmek, %22'si alışverişe gitmek veya dönmek için seyahat etmektedir. Yapılan anket sonuçlarının tamamı incelendiğinde seyahat amaçlarına göre hatları kullanan yolcu profiline yaklaşık %66'sının okula gitmek veya dönmek, %7'sinin alışverişe gitmek veya dönmek, %4'ünün ise diğer amaçlar için toplu taşıma hatlarını kullandığı görülmektedir.

Tablo 2. Hatlara göre seyahat amacı ve yaş ortalamaları (Travel purpose and average age by line)

SEYAHAT AMACI	4 NOLU HAT	8 NOLU HAT	9 NOLU HAT	12 NOLU HAT	18 NOLU HAT
Alışverişe gitmek / alışverişten dönmek	5.38	3.16	10.58	8.61	22.21
Arkadaş / akraba ziyareti	2.56	2.77	25.96	12.9	6.48
Birini bırakmak / almak			1.92	0.54	3.7
Boş zamanını değerlendirmek (Örn: sinema, kafe, spor aktiviteleri vb.)	2.82	6.13	17.31	2.15	16.67
Gezi / Tatil	0.27				
Çocuğunu bırakmak / almak			0.96		
Eve gitmek		0.2	0.97		
Hasta ziyareti			0.96		
İşe gitmek / işten dönmek	6.92	1.38	1.92	9.14	23,15
Kişisel İşler (Örn: banka)	0.51	1.38	12.5	2.15	7,41
Okula gitmek / okuldan dönmek	81.54	84.78	7.69	42.47	10,19
Sağlık		0.2	19.23	18.28	10,19
Diğer				3.76	
Yaş Ortalaması	23	21	34	30	35

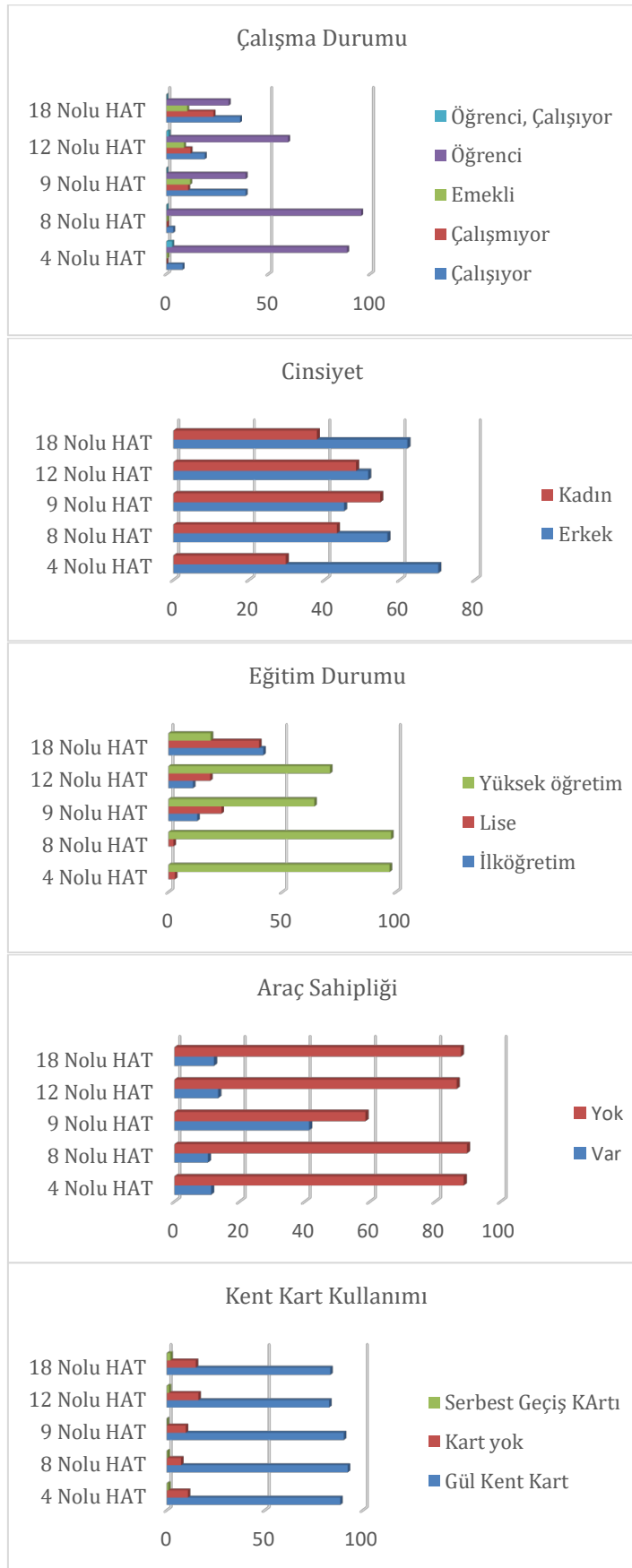
Tablo 2'de yaş ortalamalarının hatlara göre dağılımı da verilmiştir. İncelemede en az 21 yaş ortalamasına 8 nolu hattın sahip olduğu, en fazla 35 yaş ortalamasına 18 nolu hattın sahip olduğu görülmektedir. Bu değerlerin seyahat amacı tercihleri incelendiğinde 8 nolu hattın en fazla okula gitmek ve dönmek, 18 nolu hattın işe gitmek ve dönmek olduğu görülmektedir. Bu durum yaş ve seyahat amacının birbiri ile ilişki olduğunu göstermektedir.

Şekil 1'de yatay eksen değeri % cinsinden ifade edilmiştir. Ankete katılan toplu taşıma kullanıcılarının çoğunluğunun öğrenci olduğu ve özellikle bu değer yüksekliği çalışma durumunda 4 ve 8 nolu hatlarda görülmektedir. Ek olarak cinsiyet değişkeni de incelenmiş ve potansiyel kullanıcılardan her on kişiden yaklaşık altısı erkek dördü kadındır (%58 erkek, %42 kadın). 4,8,9,12 nolu hatlarda eğitim durumunun yüksek öğretim seviyesinde olduğu görülmektedir. Ankete katılanların %86'sı araç sahibi değildir ve yaklaşık %87'si Kent kart kullanmaktadır.

20 gidiş 20 dönüş yönünde olmak üzere toplam 40 durağı bulunan 4 Nolu hattın durak konumları ve güzergahı görülmektedir. Hat uzunluğu yaklaşık 8.021 km gidiş 8.564 km dönüş yönünde olmak üzere 16.585 km'dir. Ankete katılan yolculardan elde edilen veriler incelendiğinde yaklaşık %82'sinin okula gitmek veya okuldan dönmek için, yaklaşık %7'sinin işe gitmek veya dönmek için, yaklaşık %5'inin ise alışverişe gitmek veya dönmek için bu hattı kullandığı görülmektedir. Ankete katılanların yaş ortalamaları 23'tür.

Seçilen ikinci hat olan ve 44 durak ile 17 sinyalizasyon kavşak bulunan 8 Nolu hattın uzunluğu yaklaşık olarak gidiş yönünde 8.261 km dönüş yönünde 10.775 km toplam 19.036 km'dir. Ankete katılan yolculardan elde edilen veriler incelendiğinde yaklaşık %85'inin okula gitmek veya dönmek, yaklaşık %6'sının boş zamanını değerlendirmek (Örn: sinema, kafe, spor aktiviteleri vb.), yaklaşık %3'ünün alışverişe gitmek veya dönmek, yaklaşık %3'ünün ise arkadaş/akraba ziyareti için kullandığı tespit edilmiştir. Ankete katılanların yaş ortalaması 21'dir.

Seçilen üçüncü hat olan 9 Nolu hatta 50 durak bulunmaktadır. Hat uzunluğu yaklaşık olarak gidiş yönünde 6.762 km dönüş yönünde 12.871 km olmak üzere toplam 19.633 km'dir. Ankete katılan yolculardan elde edilen veriler incelendiğinde yaklaşık %27'sinin arkadaş/akraba ziyareti, yaklaşık %19'unun sağlık, yaklaşık %17'sinin boş zamanını değerlendirmek (Örn: sinema, kafe, spor aktiviteleri vb.), yaklaşık %12'sinin kişisel işleri ve yaklaşık %11'inin ise alışverişe gitmek-dönmek için kullandığı tespit edilmiştir. Ankete katılan kişilerin yaş ortalaması 34'tür.



Şekil 1. Hatlara ait sosyo-demografik özellikler (Socio-demographic characteristics of the lines)

Seçilen dördüncü hat olan 12 Nolu hatta 43 durak bulunmakta ve 16 sinyalize kavşaktan geçmektedir. Hat uzunluğu gidiş yönünde 9.117 km dönüş yönünde 9.364 km olmak üzere toplam 18.481 km'dir. Ankete katılan yolculardan elde edilen veriler incelendiğinde yaklaşık %42'sinin okula gitmek veya okuldan dönmek, %18'inin sağlık (hastane ve acil servis), yaklaşık %13 arkadaş/akraba ziyareti ve yaklaşık %9 ise işe gitmek-dönmek için kullandığı görülmektedir. Ankete katılanların yaş ortalaması 30'dur.

Seçilen son hat olan 18 Nolu hatta ise 69 durak bulunmakta 18 sinyalize kavşaktan geçmektedir. Hat uzunluğu gidiş yönünde yaklaşık olarak 9.025 km dönüş yönünde ise 13.358 km olmak üzere toplam 22.383 km'dir. Ankete katılan 67 erkek 41 kadın toplam 108 kişiden elde edilen veriler incelendiğinde %23'ünün işe gitmek veya dönmek, %22'sinin alışverişe gitmek veya dönmek ve %17'sinin boş zamanını değerlendirmek (Örn: sinema, kafe, spor aktiviteleri vb.) için kullandığı belirlenmiştir. Ankete katılan kişilerin yaş ortalamaları 35'tir.

Ankete katılanların sosyo-demografik özelliklerinin yanı sıra niteliksel verilere de yer verilmiştir. Ankete katılanların bu konudaki algılarına dayalı ortalama değerler ve standart sapmaları Tablo 3'de hesaplanmıştır. Bu durum otobüs işletmesinin sunduğu hizmetin katılımcıların algılarına göre ortalama olduğu anlamına gelmektedir. Tablo 2'de erişilebilirlik süresi kullanıcıların duraklara kaç dakika yürüdüklerini ifade etmektedir. Durakta bekleme süreleri ve kullanıcılara göre seyahat ettikleri sürelerin ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir. Bu değerler nitel verilerin ortalama değerlerini temsil etmektedir. Hizmete ilişkin algılarına göre belirlenmektedir.

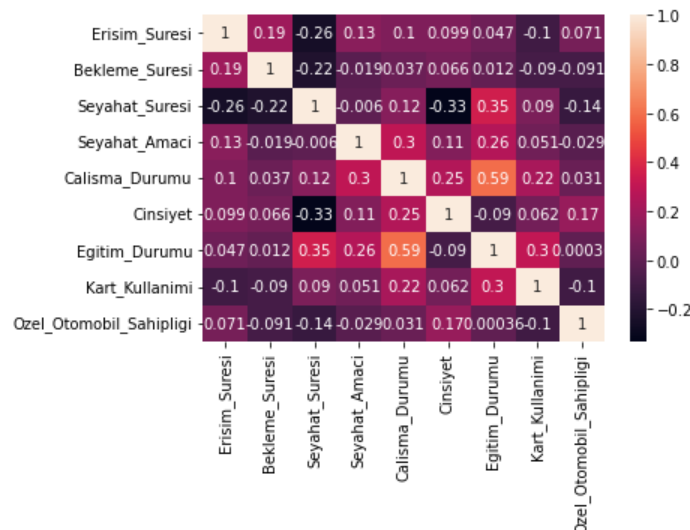
Tablo 3. Bağımsız değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri (Mean and standard deviation values of independent variables)

	ERİŞİLEBİLİRLİK SÜRESİ (dk)		BEKLEME SÜRESİ (dk)		SEYAHAT SÜRESİ (dk)	
	Ort	StdS	Ort	StdS	Ort	StdS
4 NOLU HAT	6.182	4.914	7.023	5.956	18.392	6.783
8 NOLU HAT	5.758	4.393	5.011	3.833	16.237	5.976
9 NOLU HAT	7.606	4.501	5.644	3.631	16.125	5.983
12 NOLU HAT	5.859	3.495	5.338	3.592	19.627	5.970
18 NOLU HAT	4.704	4.107	4.435	3.253	22.759	7.130

Tablo 3 incelendiğinde standart sapma değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum bağımsız değişkenlere verilen cevapların kişiden kişiye farklılık gösterdiği anlamına gelmektedir. Bu nedenle çalışmada yolcuların algılarındaki farklılıkları etkileyen sosyo-demografik özellikler incelenmiştir.

Kullanıcılar tarafından istenen kalite algılanan kaliteden farklıdır çünkü kullanıcıların günlük deneyimlerini temsil etmektedir. Bu nedenle istenen kaliteyi incelemek önemlidir (Dell'Olivo vd., 2011). Bekleme süresi, duraklara erişim süreleri ve seyahat süreleri kullanıcıların en çok tercih ettiği değişkenlerdir. Hizmet kalitesini artırmak ve genel olarak toplu taşımaya daha fazla yolcu çekmek için, bu metodoloji yararlı bilgiler sağlamaktadır.

Toplu taşıma hatlarının Pearson modeli ile elde edilen korelasyon tablosu, değişkenler arasında farklı değerler olduğu, birbirleri ile olan ilişkileri incelendiğinde potansiyel kullanıcıların algı değerlerinin farklılaştığı görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Değişkenler arasındaki Pearson modeli korelasyonu (Pearson model correlation between variables)

Çok terimli logit model için ikiden fazla değeri olan çalışma durumu ve eğitim durumu bağımlı değişkenler olarak seçilmiştir. Diğer değişkenler düşük istatistiksel anlamlılıkları nedeniyle dikkate alınmamıştır.

Tablo 4. Hatlara göre ilişkisellik-anlamlılık dereceleri (Relevance-significance degrees according to lines).

HATLAR	Bağımlı Değişkenler		ÇALIŞMA DURUMU	EĞİTİM DURUMU
	Bağımsız Değişkenler			
4 NOLU HAT	Erişilebilirlik Süresi		.184*	.050
	Bekleme Süresi		-.010	-.076
	Seyahat Süresi		.050	-.053
8 NOLU HAT	Erişilebilirlik Süresi		.238*	.216**
	Bekleme Süresi		.19	.142**
	Seyahat Süresi		-.079	-.064
9 NOLU HAT	Erişilebilirlik Süresi		.046	.157
	Bekleme Süresi		-.053	-.050
	Seyahat Süresi		-.077	.020
12 NOLU HAT	Erişilebilirlik Süresi		.059	.022
	Bekleme Süresi		.076	.114*
	Seyahat Süresi		-.125**	-.036
18 NOLU HAT	Erişilebilirlik Süresi		.100	.022
	Bekleme Süresi		.037	.114*
	Seyahat Süresi		.0118	-.036

* P<0,01, ** P>0,05

Tüm örneklem alanlarında bağımlı değişkenler, çalışma durumu ve eğitim durumu olarak, bağımsız değişkenler erişilebilirlik süresi, bekleme süresi ve seyahat süresi olarak seçilmiştir (Tablo 4).

Çalışma kapsamında öncelikle toplu taşıma kullanıcılarının çalışma durumu ve eğitim seviyesi değişkenleri için durağa erişim süresi, durakta bekleme süresi ve seyahat süresi algılarının değerleri arasında Pearson modeli ile korelasyon yapılmıştır. İkinci aşamada, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkileri ölçmek için kullanılan çok değişkenli logit regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu kapsamda bağımsız değişkenler erişim süresi, bekleme süresi ve seyahat süresi, bağımlı değişkenler de çalışma durumu ve eğitim seviyesi olarak belirlenmiştir. Aralarındaki açıklanabilir bir ilişki olduğunu ifade etmek için; anlamlılık açısından, güven aralığı 0.010'dan büyük (%90'ın altında) çıkan sonuçlar ve güven aralığı 0.05'dan büyük (%50'ın altında) çıkan sonuçlar, iki değişken arasındaki bağıntının anlamsız olduğunu, doğrusal bir ilişki olmadığını tanımlamaktadır.

Pearson korelasyonu sonucu eğitim durumu ve çalışma durumu ile ikili ilişkilerin değişkenlerle daha yakın olması nedeniyle ve bu değişkenlerin kategorik bağımlı değişken olması ayrıca ikili değişkenlerin yanı sıra sürekli değişkenlerin de bulunmasından dolayı modelin çok terimli logit regresyon olarak oluşturulmasının uygun olacağı ön görülmüştür. Bu nedenle en fazla ilişkinin bulunduğu anket verilerindeki eğitim durumu ve çalışma durumu ile bekleme süresi, erişim süresi ve seyahat süresi ilişkisi incelenmiştir.

Tablo 5. Çalışma durumu ve eğitim durumu etkileşimlerini dikkate alan çok terimli logit (Multi nomial logit considering working status interactions and education status)

BAĞIMLI DEĞİŞKEN	BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER	KATSAYILAR(β)	STANDART HATA	P> t
ÇALIŞMA DURUMU	Erişilebilirlik Süresi	0.0808	0.0342	0.0181
	Bekleme Süresi	-0.0709	0.0326	0.0294
	Seyahat Süresi	0.1246	0.0195	0.0000
EĞİTİM DURUMU	Erişilebilirlik Süresi	0.0518	0.0638	0.4173
	Bekleme Süresi	-0.1963	0.0764	0.0102
	Seyahat Süresi	-0.1711	0.0354	0.0000

Tablo 5 incelendiğinde bekleme süresi ile çalışma ve eğitim durumu arasında ters ilişki olduğu görülmektedir. Seyahat süresi algısı çalışma durumu ile doğru orantılı iken eğitim durumu ile ters orantılı olarak değişmektedir. Erişilebilirlik süresinin çalışma ve eğitim durumundan en az etkilenen bağımsız değişken olduğu görülmektedir. Seyahat süresi en az standart hata değerine sahiptir.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Toplu taşıma seçim davranışını etkileyen parametreler ile ilgili yapılan çalışmalar kullanıcıların tutum ve algılarını dikkate almaktadır. Bekleme süresi yolcu seçim davranışını etkileyen en önemli unsurlardan biridir (Pan vd., 2022). Durakta bekleme süresi, yolcunun geliri, araç sahipliği, seyahat amacı ve meslek, toplu taşıma hizmetlerinde tutum ve tercihlerin belirlenmesinde önemlidir (Javid vd., 2021).

Bu araştırma toplu taşıma sisteminin güvenilir ve verimli bir sistem olması için arzu edilen ve yolcular tarafından değer verilen değişkenlerin belirlenmesini hedeflemektedir. Verimli ve yüksek kaliteli bir toplu taşıma hizmeti için erişilebilirlik süresi, bekleme süresi ve seyahat süresi ağırlıklarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu hedef doğrultusunda beklenen kaliteyi araştırmak için potansiyel toplu taşıma kullanıcıları ile anket yapılmıştır. Anket tasarımında hizmet kalitesini etkileyen en önemli unsurlar olan erişilebilirlik süresi, bekleme süresi ve seyahat süresi bilgilerine ve kullanıcıların sosyo-demografik özelliklerine yer verilmiştir.

Ulaşım hizmetinin kalitesini artıracak bu değişkenlerin fayda fonksiyonuna katkısı oldukça yüksektir. Bu nedenle çalışmada sosyo-demografik özelliklerin bağımsız değişkenlere olan etkisi belirlenmiştir. Seçilen belirleyicilere göre toplu taşıma sisteminden beklenen kaliteyi ölçmek için duraklara erişim süresi, durakta bekleme süresi ve seyahat süresi parametreleri bağımsız değişkenler olarak değerlendirilmiştir.

Pearson modeli çerçevesinde elde edilen korelasyon tablosu incelendiğinde eğitim durumu ve çalışma durumunun en yüksek korelasyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle çok terimli logit regresyon modelinde bağımlı değişkenler olarak çalışma durumu ve eğitim durumu seçilmiştir. Potansiyel kullanıcılar tarafından değerlendirilen bu değişkenler toplu taşıma koşullarını iyileştirmede faydalı bilgiler sağlamaktadır. Standart sapma değerlerinin yüksek olması algı düzeylerinin kullanıcılara göre değişkenlik gösterdiğini ifade etmektedir.

Çalışma, kullanıcıların en çok değer verdiği değişkenlerin bekleme süresi ve seyahat süresi olduğunu göstermektedir. Eğitim durumu ile bekleme ve seyahat süresi algısı arasında ters orantı olduğu görülmektedir. Erişilebilirlik süresi en az önemli olan değişken olarak görülmektedir. Bunun nedeni duraklara erişim süresinin toplu taşıma sistemine değil kişiye bağlı olarak değişiklik göstermesi olarak yorumlanabilir. Bekleme süresi toplu taşıma sistemlerinde fayda fonksiyonlarında en fazla ağırlığa sahiptir. Çünkü yolcular için bu süre kayıp zaman olarak görülmektedir ve rahatsız edicidir. Verimli ve yüksek kaliteli toplu taşıma hizmeti için bekleme süresinin ağırlığı önemli faktörlerden biridir. Seyahat süresi toplu taşıma hizmet kalitesinin belirlenmesindeki en önemli anahtardır.

Son olarak bu çalışmada incelenen bilgi ve özelliklerden hareketle otobüs işletmeleri hizmet kalitesini arttırmayı amaçlayan politikalar belirleyebilir. Bu çalışmada oluşturulan model, kullanıcılara arzu edilen hizmet kalitesini en çok sağlayacak olan değişkenlerin ağırlıklarını belirlemektedir. Çalışmanın bulguları, belediyelere, işletmelere ve ulaşım planlayıcılara, toplu taşıma hizmet kalitesini iyileştirmek ve nihayetinde toplu taşıma kullanımını teşvik etmek için yardımcı olacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma kapsamında anket çalışmasına izin veren Isparta Belediyesi ve Özel Halk Otobüsü firmasına teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Bates, J., Polak, J., Jones, P., Cook, A., 2001. The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2-3), 191-229. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(00\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00011-9)
- Beimborn, E. A., Greenwald, M. J., Jin, X., 2003. Accessibility, connectivity, and captivity: impacts on transit choice. *Transportation Research Record*. 1835(1), 1-9.
- Beirão, G., Sarsfield Cabral, J. A., 2007. Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. *Transport Policy*, 14(6), 478-489. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.04.009>
- Bohte, W., Maat, K., van Wee, B., 2009. Measuring attitudes in research on residential self-selection and travel behaviour: A review of theories and empirical research. In *Transport Reviews* (Vol. 29, Issue 3, pp. 325-357). <https://doi.org/10.1080/01441640902808441>

- Brownstone, D., Small, K., Brownstone, D., Small, K., 2005. Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(4), 279–293. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:transa:v:39:y:2005:i:4:p:279-293>
- Carrel, A., Halvorsen, A., Walker, J., 2013. Passengers' perception of and behavioral adaptation to unreliability in public transportation. *Transportation Research Record*, 2351, 153–162. <https://doi.org/10.3141/2351-17>
- Carrus G., Passafaro P., Bonnes M., 2008. Emotions, habits and rational choices in ecological behaviours: The case of recycling and use of public transportation. *Journal of Environmental Psychology*, 28, 51–62.
- Chauhan, V., Gupta, A., Parida, M., 2021. Demystifying service quality of Multimodal Transportation Hub (MMTH) through measuring users' satisfaction of public transport. *Transport Policy*, 102, 47–60. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2021.01.004>
- Cheng, Y. H., 2010. Exploring passenger anxiety associated with train travel. *Transportation*, 37(6), 875–896. <https://doi.org/10.1007/s11116-010-9267-z>
- Cox, T., Houdmont, J., Griffiths, A., 2006. Rail passenger crowding, stress, health and safety in Britain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(3), 244–258. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.07.001>
- de Oña, J., de Oña, R., Calvo, F. J., 2012. A classification tree approach to identify key factors of transit service quality. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 11164–11171. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.037>
- de Vos, J., Waygood, E. O. D., Letarte, L., 2020. Modeling the desire for using public transport. *Travel Behaviour and Society*, 19, 90–98. <https://doi.org/10.1016/J.TBS.2019.12.005>
- Dell'Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P., 2011. The quality of service desired by public transport users. *Transport Policy*, 18(1), 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.08.005>
- DESA., 2018. *68% of the World Population Projected to Live in Urban Areas by 2050*. Says UN United Nations Department of Economic and Social Affairs (2018).
- Eboli, L., Mazzulla, G., Eboli, L., 2015. *Relationships between rail passengers' satisfaction and service quality: a framework for identifying key service factors*. 7, 185–201. <https://doi.org/10.1007/s12469-014-0096-x>
- Fellesson, M., Friman, M., 2008. Perceived Satisfaction with Public Transport Service in Nine European Cities. In *Source: Journal of the Transportation Research Forum* (Vol. 47, Issue 3).
- Fu, L., 2007. A New Performance Index for Evaluating Transit Quality of Service. In *Journal of Public Transportation* (Vol. 10, Issue 3, pp. 47–69).
- Golob, t. F., Canty, E. T., Gustafson, R. L., Vitt, J. E., 1972. *Analysis of consumer preferences for a public transportation system*. 6(1), 81–102.
- Habib, K. M. N., Kattan, L., Islam, T., 2011. Model of personal attitudes towards transit service quality. *Journal of Advanced Transportation*, 45(4), 271–285. <https://doi.org/10.1002/atr.106>
- Hensher, D. A., Stopher, P., Bullock, P., 2003. Service quality—developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(6), 499–517. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00075-7)
- Ikhtrata, H., Michell, P., 1997. *Technical Report of Southern California Association of Governments' Transportation Performance Indicators*.
- Islam, N., 2021. A Review of Methodological Approaches and Modeling Techniques in Service Quality Evaluation of Surface Transportation during the Last Decade. *Journal of Engineering Advancements*, 197–202. <https://doi.org/10.38032/jea.2021.04.005>
- Javid, M. A., Ali, N., Hussain Shah, S. A., Abdullah, M., 2021. Travelers' Attitudes Toward Mobile Application–Based Public Transport Services in Lahore. *SAGE Open*, 11(1). <https://doi.org/10.1177/2158244020988709>
- Joewono, T. B. ve Kubota H., 2007. User Perceptions of Private Paratransit Operation in Indonesia. *Journal of Public Transportation*, 10(4), 99–118.
- Johnson, R. A. ve Wichern, D. W., 2002. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ No. 8.
- Katz, D. ve Rahman, M. M., 2010. Levels of overcrowding in bus system of Dhaka, Bangladesh. *Transportation Research Record*, 2143, 85–91. <https://doi.org/10.3141/2143-11>
- Kutlu Gündoğdu, F., Duleba, S., Moslem, S., Aydın, S., 2021. Evaluating public transport service quality using picture fuzzy analytic hierarchy process and linear assignment model. *Applied Soft Computing*, 100, 106920. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2020.106920>
- Lin, C.-Y., Ephen Kennedy, S., Chen, L.-J., Chen, Y.-Y., Lee, W.-C., 2010. *A Comfort Measuring System for Public Transportation Systems Using Participatory Phone Sensing*.
- Malekzadeh, A. ve Chung, E. (2019). *International Journal of Sustainable Transportation A review of transit accessibility models: Challenges in developing transit accessibility models A review of transit accessibility models: Challenges in developing transit accessibility models*. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1625087>
- Mohd Mahudin, N. D., Cox, T., Griffiths, A., 2011. Modelling the spillover effects of rail passenger crowding on individual well being and organisational behaviour. *Transactions on The Built Environment*, 116, 1743–3509. <https://doi.org/10.2495/UT110>
- Mokhtarian, P. L., Salomon, I., Singer, M. E., 2015. What Moves Us? An Interdisciplinary Exploration of Reasons for Traveling. *Transport Reviews*, 35(3), 250–274. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1013076>
- Nassereddine, M. ve Eskandari, H., 2017. An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 106, 427–439. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2017.10.013>
- Pan, L., Waygood, E. O. D., Patterson, Z., 2022. Would You Wait? Bus Choice Behavior Analysis Considering Various Incentives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119812210768. <https://doi.org/10.1177/03611981221076843>

- Prashker, J. N., 1979. Direct Analysis of The Perceived Importance of Attributes of Reliability of Travel Modes in Urban Travel. *Transportation (Netherlands)*, 8(4), 329–346. <https://trid.trb.org/view/159718>
- Proffitt, D. G., Bartholomew, K., Ewing, R., Miller, H. J., 2019. Accessibility planning in American metropolitan areas: Are we there yet? *Urban Studies*, 56(1), 167–192. <https://doi.org/10.1177/0042098017710122>
- Sarkar, P. P. ve Mallikarjuna, C., 2018. Effect of perception and attitudinal variables on mode choice behavior: A case study of Indian city, Agartala. *Travel Behaviour and Society*, 12, 108–114. <https://doi.org/10.1016/J.TBS.2017.04.003>
- TÜİK. (2021a). *Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi*. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2020-37210>
- TÜİK. (2021b). *Motorlu Kara Taşıtları*. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ekim-2021-37432>
- Wang, D., Brown, G., Mateo-Babiano, I., 2013. *Beyond Proximity: an Integrated Model of Accessibility for Public Parks*. www.ajssh.leena-luna.co.jp
- Wardman, M., 2004. Public transport values of time. *Transport Policy*, 11(4), 363–377. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2004.05.001>



KÖPÜK DOLGULU HAFİFLETİLMİŞ DONATILI ZEMİN PANELLERİNİN DAVRANIŞI

Burak EVİRGEN^{1*}, Onur TUNABOYU¹, Barış BÜYÜK², Gizem Tuğçe ÇİL²

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² İstanbul Teknik İnşaat A.Ş., Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Prekast Panel,
Donatılı Zemin,
Kaplama Elemanı,
Hafif Panel,
Eps Köpük.

Öz

Eğimli veya dik arazilerdeki yanal toprak basıncı ve yüzey duraylılığı gibi etkilere karşı kullanılan ağır prekast betonarme paneller hem şantiyeye iletim hem de yerleştirme sırasında ciddi sorunlara neden olmaktadır. Üretim aşamasında daha hafif elemanların kullanılması arazideki montaj kolaylığına ek olarak işçilik gereksinimini azaltmakta ve uygulama hızını arttırmaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında, gerçek boyutlu donatılı beton numuneler ve genişletilmiş polistren köpük (EPS) elemanlar yardımıyla boşluklu kesitlerle üretilen hafif numunelerin deneysel davranışı incelenmiştir. Özel olarak tasarlanan deneysel düzeneklerde söz konusu numuneler üzerinde düzlem içi diyagonal kesme testleri (panel testleri) ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirildikten sonra yük - deplasman değişimleri sunulmuştur. Çelik donatılı numunelere kıyasla yaklaşık %13 mertebesinde daha hafif olan EPS köpüklü numuneler eğilme testlerinde benzer davranış sergilerken, panel testlerinde farklı göçme durumları ön plana çıkmaktadır. Alternatif hafif kompozit panellerin kullanılmasıyla konvansiyonel donatılı beton panellerin toplam maliyetinin düşürülebileceği açıkça görülmektedir. Çalışma sonucunda mekanik stabilize donatılı duvarlarda ve donatılı zeminlerde kullanılan konvansiyonel kaplama elemanlarına alternatif özgün bir ürün önerilmiştir.

BEHAVIOR OF THE LIGHTENED REINFORCED SOIL PANELS FILLED WITH POLYSTYRENE FOAM

Keywords

Prekast Panel,
Reinforced Soil,
Facing Member,
Lightweight Panel,
Eps Foam.

Abstract

Heavy precast reinforced concrete panels, which are used against the effects of active lateral earth pressure and surface stability on inclined or vertical slopes, cause serious problems during both transportation to the construction site and installation. The use of lighter elements in the production phase reduces the requirement of workmanship and increases the speed of application in addition to the ease of installation in site. Therefore, the experimental behavior of real-sized reinforced concrete specimens and lightweight specimens were investigated, which have been produced with hollow sections via expanded polystyrene foam (EPS). The load-displacement changes of specimens were presented after the completion of in-plane diagonal shear tests (panel tests) and three-point bending tests on mentioned specimens in specially designed experimental setups. EPS foam included specimens are lighter than steel-reinforced ones around 13%, which showed similar behavior in bending tests, but different failure modes stood out in panel tests. It is clearly seen that the total cost of conventional reinforced concrete panels can be reduced by a usage of alternative lightweight composite panels. As a result of the study, an alternative unique product was proposed to the conventional facing members used in mechanically stabilized earth walls and reinforced soils.

Alıntı / Cite

Evirgen, B., Tunaboyu, O., Büyük, B., Çil, G.T., (2022). Köpük Dolgulu Hafifletilmiş Donatılı Zemin Panellerinin Davranışı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1315-1324.

* İlgili yazar / Corresponding author: burakevirgen@eskisehir.edu.tr, +90-222-213-8171

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
B. Evirgen, 0000-0003-4202-5479	Başvuru Tarihi / Submission Date	29.12.2021
O. Tunaboyu, 0000-0001-6858-4290	Revizyon Tarihi / Revision Date	30.06.2022
B. Büyük, 0000-0002-1988-8260	Kabul Tarihi / Accepted Date	09.08.2022
G.T. Çil, 0000-0001-6899-5188	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Eğimli veya dik açılı şevlerin teşkil edildiği karayolu ve demiryolu kenarlarında sıklıkla kullanım alanı bulan donatılı zeminlerde hem yanal toprak basınçlarının karşılanması hem de geosentetik veya çelik zemin donatılarının sabitlenmesi amacıyla prekast betonarme paneller kullanılmaktadır. Prekast betonlar; darbe, aşınma ve yıpranma etkilerine karşı dayanıklı olmasının yanı sıra minimum onarım ve bakım gerektirmesi sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Ancak konvansiyonel betonarme panellerin ağır olması, yerleştirilmesi sürecinde can ve mal güvenliği açısından riskler meydana getirmektedir. Ayrıca zati ağırlığı sebebiyle uzun dönemde yüzeyden kopma ve sıyılmalar görülebilmektedir. Bu yüzden yapısal elemanların imalatlarında kullanılan beton ve çelik gibi ağır bileşenler yerine genişletilmiş polistren köpük (EPS) gibi daha hafif malzemelerle üretilen elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde yapı yükünün azaltılmasının yanı sıra yalıtım özelliklerine de katkı sağlayan malzemelerden biri olan EPS ile üretilmiş beton veya harçların kullanıldığı deneysel çalışmalara rastlanmaktadır (Sayil ve Gürdal 1999; Ferrándiz-Mas vd. 2014; Chen vd. 2015). Babu ve Babu (2003) tarafından EPS küreleri ve silis dumanı kullanılarak üretilen 1500 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında yoğunluğa sahip beton numunelerinde; beton yaşı, EPS hacmi, EPS küre boyutu, hafif agrega dayanımı ve normal agrega boyutları gibi değişkenlere bağlı etkiler incelenmiştir. Kan ve Demirboğa (2009) tarafından geri dönüştürülmüş EPS köpükler beton içerisinde agrega olarak kullanılmış ve silindirik numuneler ile yapılan deneysel çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Assaad ve El Mir (2020) EPS köpüklü ve stiren-butadiyen kauçuk lateks numunelerle 1870 kg/m^3 ile 2360 kg/m^3 arasında değişen yoğunlukta üretilmiş hafif betonun dayanıklılığını incelemişlerdir.

Malzeme özelliklerinin belirlendiği aksenal basınç deneyleri dışında, kesit ve yükleme tipine bağlı davranış özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. O'Hegarty ve Kinnane (2020) kompozit veya kompozit olmayan prekast beton panellerin yük taşıma davranışını incelemek için literatürdeki en yaygın testlerin üç noktalı veya dört noktalı eğilme testleri ile diyagonal yükleme uygulanan kesme testleri olduğunu belirtmektedir. Beton dayanımının artırılması ve aynı zamanda yoğunluğun azaltılmasına yönelik çeşitli köpük, polimer, fiber ile kimyasal katkı içeren kiriş, plak ya da panel tipi kompozit beton elemanlarda katkı oranları, kür koşulları, geometrik özellikler gibi değişkenlerin incelendiği eğilme deneyleri, bu tip narin elemanların noktasal yükleme koşulları altındaki davranışlarını yansıtmaktadır (Chen ve Liu, 2004; Chen ve Liu 2007; Lee vd. 2018; Hou vd. 2019; Saheed vd. 2021). Ayrıca katkı beton veya harçlar ile fiber donatılarla güçlendirilmiş betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi sürecinde de eğilme testleri yapılmaktadır (Cengiz vd. 2020; Acar vd. 2020). Wibowo vd. (2017) bambu ve strafor köpük kullanarak ürettikleri numunelerde yaptıkları eğilme deneylerinde %20 daha hafif bir tasarımla birlikte dayanımda %15'lik bir azalmanın verimlilik açısından iyi bir performans olduğunu belirtmişlerdir.

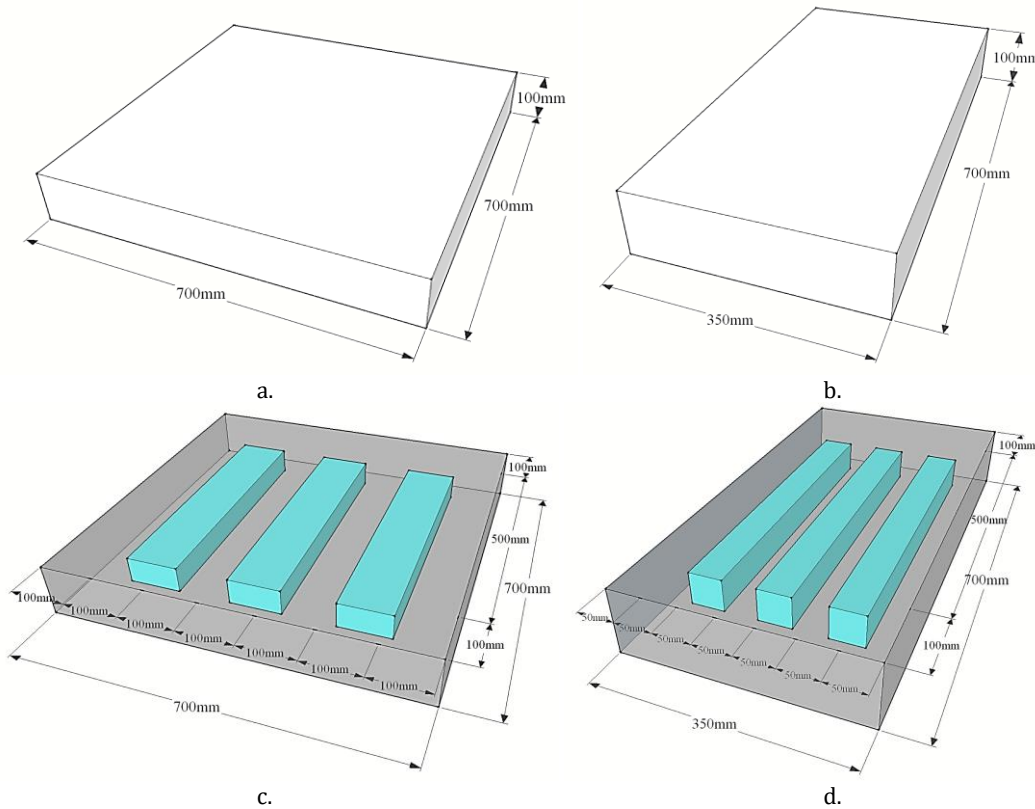
Sandviç panellerdeki deneysel çalışmalarda ise rüzgar yükleri ve sismik yükler (Assaad vd. 2018) ile düzlem içi davranışın (Benayoune vd. 2007; Mohamad vd. 2011; Ahmad ve Singh 2021) dikkate alındığı aksenal basınç ve panel deneyleri yapılmaktadır. Morales-Alonso vd. (2011) tarafından betonarme panellerde ani yükleme etkisi altında oluşan hasarlarda, basınç dayanımı yerine çekme dayanımının belirleyici etken olduğu belirtilerek patlama ve çarpma gibi ani yüke maruz kalabilecek elemanlarda yüksek mukavemetli beton kullanmak yerine çekme dayanımını artıracak şekilde tasarımlar yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Naito vd. (2012) içinde EPS bulunan sandviç panellerde kesme bağları kullanarak numunelerin kesme performanslarına etkilerini belirlemek için deneysel metod geliştirmişlerdir. Xiong vd. (2018) deneysel çalışmalarla doğrulanan iki boşluklu prekast panellere dayalı yeni bir beton perde duvar sistemi önermişlerdir. Corradi vd. (2008) tarafından yapılan $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ boyutlarındaki panellerdeki kesme etkilerini içeren diyagonal basınç testleri sonucunda depremler sırasında kompozit duvarlarda görülen tipik hasarın katmanlar arasındaki bağın yitilmesiyle dış kaplamanın parçalanması biçiminde olduğu belirtilmektedir. Sorunun çözümüne yönelik çimento - su şerbeti enjeksiyonu farklı bir güçlendirme tekniği olarak sunulmaktadır. Farklı tipteki harçlarla inşa edilen yığma panel duvarların kesme kapasitesinin GFRP ile güçlendirilmesi durumunda yanal yük kapasitesinde %7 ile %117 arasında bir artış sağlarken, kesme kapasitesinde ise %57 ile %115 arasında arttığı bildirilmiştir (Borri vd. 2016). Del Zoppo vd. (2019) literatürdeki farklı duvar özellikleri, donatı tipi, güçlendirme düzeni ve harç özelliklerine göre inorganik kompozitlerle güçlendirilmiş donatısız yığma duvarların düzlem içi kesme kapasitesini konu alan diyagonal basınç testlerine ilişkin çalışmaları incelemişlerdir. Buna göre basınç dayanımı 10-15 MPa seviyesine ulaşan kompozit yapıların kesme kapasitesindeki artışın diğer sistemlere kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Longo vd.

(2020) tarafından hafif geopolimer esaslı harçların farklı katkıları ve tekstil donatıları ile birlikte binalarda yapısal açıdan güçlendirme amaçlı kullanıma yönelik yapılan deneysel çalışmada, yapısal elemanların zati ağırlığının %40 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir. Corradi vd.'nin (2021) duvar panellerinin düzlem içi göçme durumunda kesme donatısı üzerine yaptıkları çalışmada; epoksi reçineyle kaplanan tekstil, bazalt, bambu, kenevir fiber donatılı harç, mineral esaslı kompozitler veya hasırlarla panellerin güçlendirilmesi durumunda sismik performanslarının artırıldığı vurgulanmıştır.

Literatürde farklı güçlendirme elemanlarıyla sargılanan kompozit panel veya çok katmanlı prekast elemanların mekanik davranışlarına yönelik deneysel çalışmalarla karşılaşılmamasına rağmen, donatılı zemin panel üretimi sırasında beton içine yerleştiren köpüklerle boş hacim oluşturulmasını içeren bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, donatılı zeminlerle inşa edilen mekanik stabilize istinat yapılarının yüzey kaplaması olan standart betonarme panellere ek olarak, ağırlığın azaltılabilmesi için genişletilmiş polistren köpük (EPS) dolgu kullanılarak üretilen prekast elemanların panel ve eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. İmalat aşamasında kullanılan daha hafif elemanların hem iş gücünü azaltarak maliyeti düşürmesi hem de şantiyedeki imalat hızını artırması beklenmektedir.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Donatılı zeminlerde genellikle çelik şeritlerin sabitlendiği betonarme paneller şeritlerin bağlantı noktalarından eğilme davranışına maruz kalırken, birbirlerine temas yüzeyleri doğrultusunda kesme gerilmeleri oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu iki davranışın tespitine yönelik yapılan düzlem içi diyagonal yükleme testleri (panel testleri) ve eğilme testlerinde farklı boyutta iki tip numune kullanılmıştır. Panel testleri için 700 mm × 700 mm boyutlarında ve 100 mm kalınlığında betonarme prekast panel elemanları hazırlanırken, eğilme testlerinde kullanılmak üzere 350 mm × 700 mm boyutlarında ve 100 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir (Şekil 1). Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) kriterlerine göre donatılı betondan üretilen numuneler Tip-1 olarak adlandırılırken, çalışmanın ana hedefini ortaya koyan hafiflik unsurunu sağlamak amacıyla Tip-2 numunelerde panel ve eğilme testleri için numune boyutuna oranla sırasıyla 100 mm ve 50 mm genişliğinde EPS köpükleri kullanılarak boşluklar bırakılmıştır. Bu çalışmada test edilen toplam 12 adet numuneye ait detaylar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Numune boyutları (Dimensions of the specimens)

2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of the test specimens)

Numunelerin hazırlanmasında kolaylık sağlanması için modüler çelik kalıplar kullanılmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) esaslarına uygun biçimde üretilen kalıplar içerisine tabandan 2,50 cm pas payı bırakılmıştır

(Şekil 2). Q131/131 tipi tek sıra hasır çelik donatı ve C30 beton ile üretilen Tip-1 numunelerinin donatılı zemin uygulama projelerinde kullanılan standart numuneler olması amaçlanmıştır. Buna ek olarak, sahadaki prekast panellerin ağırlıklarını azaltmak için beton kütlesi içerisinde boşlukların oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, Tip-2 numunelerin alt ve üst kısımlarından yine 2,50 cm boşluk bırakılarak pas payı oluşturulmuş ve Şekil 3'te görüldüğü gibi kalıplar hazırlanmış, hasır çeliklerin üzerinde öngörülen konumlara 5,00 cm kalınlığında 16-18 dansite EPS köpükler sabitlenerek beton dökümü sağlanmıştır.



Şekil 2. Standart numunelerin modüler çelik kalıpları (Modular steel molds of standard specimens)

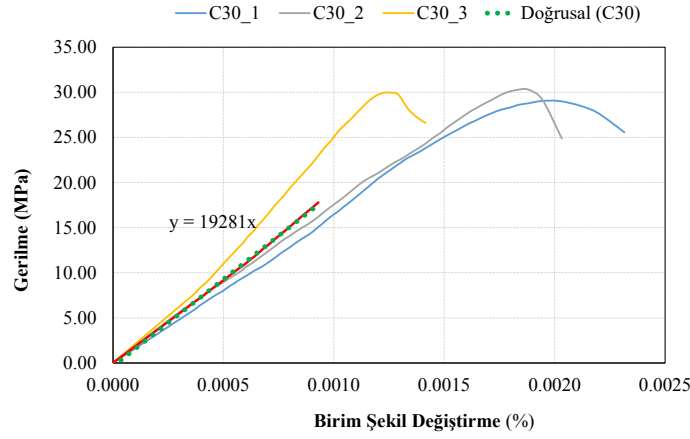


Şekil 3. EPS dolgulu numunelerin modüler çelik kalıpları (Modular steel molds of EPS infilled specimens)

Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2013) göre donatılı zeminlerde kullanılan standart paneller için verilen kriterler doğrultusunda beton firmasından temin edilen C30 sınıfındaki hazır beton kullanılmıştır. Kalıplara dökülen betonlar vibratör ile yerleştirilmiş ve sonrasında masterlama ile perdelama işlemleri uygulanmıştır. Dökülen betonun karakteristik basınç dayanımının tespit edilebilmesi için döküm esnasında numuneler alınmıştır. Şartname uyarınca 12 MPa beton basınç dayanımı değerine ulaşması için gereken 3 günün sonunda kalıplardan çıkarılan tüm numuneler toplam 28 gün aynı koşullar ve kür şartlarında bekletilmiştir. 28 günün ardından havuzlardan çıkarılıp kuruması beklenen 100 mm x 200 mm boyutlarındaki silindirik numuneler, 0,6 MPa/sn yükleme hızıyla beton basınç testlerine tabii tutulmuş ve gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri elde edilerek öngörülen C30 beton dayanımı doğrulanmıştır (Şekil 4). FEMA 356'ya (2000) göre nihai gerilme değerinin %60'ı mertebesine kadar olan ortalama değerlerin doğrusal eşdeğer eğilim çizgisi çizdirilmiş ve eğim değeri hesaplanmıştır. Bu doğrultuda betona ait elastisite modülü 19300 MPa civarında hesaplanırken, betonun ortalama karakteristik basınç dayanımı 29,52 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Üretilen numune detayları (Details of the test specimens)

NUMUNE TİPİ	DENEY TİPİ	NUMUNE SAYISI	DETAY
TİP1	Panel deneyi	3	Donatılı beton panel
TİP2		3	EPS köpük dolgulu donatılı beton panel
TİP1	Eğilme deneyi	3	Donatılı beton panel
TİP2		3	EPS köpük dolgulu donatılı beton panel



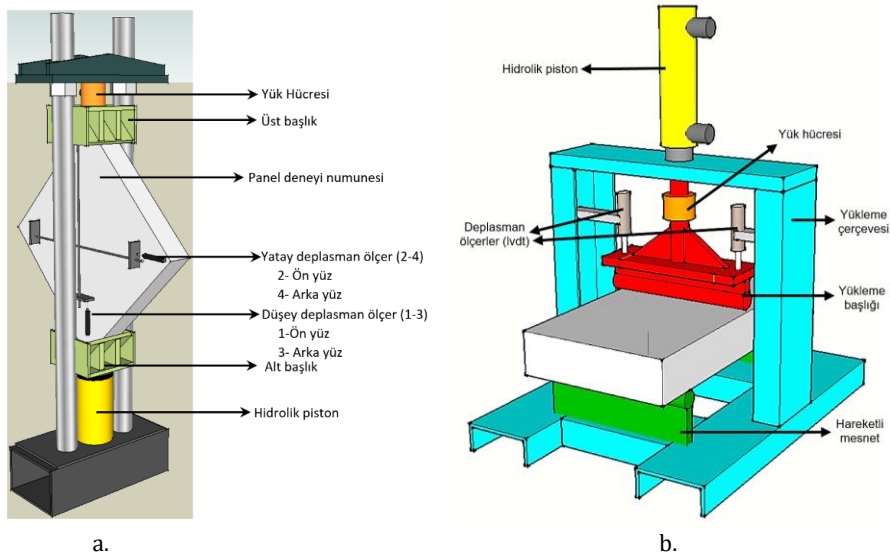
Şekil 4. Betonun aksel gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri (Axial stress - strain curves of concrete)

2.2. Panel Deneyleri (Panel tests)

Donatılı zeminlerde yüzey kaplaması olarak kullanılan prekast panellerin statik veya dinamik yükleme koşullarına maruz kalması durumunda komşu panel üzerinde zorlanmalara sebebiyet vermektedir. Söz konusu etki neticesinde panellerde meydana gelen kesme davranışının tespitine yönelik ASTM E519/E519M-21 (2021) standardında yer alan düzlem içi diyagonal yükleme testleri yapılmaktadır. Çalışmadaki panellerin diyagonal yükleme testlerindeki yük-deformasyon davranışını belirlemek için literatürde kompozit paneller, prekast betonarme plaklar veya yığma duvarlarda kullanılan ilgili deney düzeneği ve yükleme başlıkları üretilmiştir (Corradi vd., 2008; Roca ve Araiza, 2010; Tunaboyu, 2017; Longo vd., 2021; Manos vd., 2021). Düzenek 1000 kN kapasiteli yük hücresi, 300 kN kapasiteli hidrolik piston ve 4 adet 25 mm'lik deplasman ölçerlerden (LVDT) oluşmaktadır (Şekil 5.a). Prekast panel numunelerinin köşegenlerinden uygulanan basınç kuvveti doğrultusundaki kılma ve buna karşı diğer doğrultudaki uzama miktarları sisteme bağlanan yük hücresi ve deplasman ölçerler ile belirlenmiştir. Panel numuneleri üzerine epoksi tamir harcı ile sabitlenen civatalar arasında ortalama 600 mm net açıklık bırakılarak şekil değiştirme ölçümleri kaydedilmiştir.

2.3. Eğilme Deneyleri (Bending tests)

İki uçtan 500 mm net açıklığa sahip hareketli mesnetler üzerine yerleştirilen prekast deney numunelerine, orta kısımda tek noktadan düşey yük uygulanmış ve dolayısıyla 3 noktalı eğilme testi prosedürü gerçekleştirilmiştir (ASTM C293/C293M - 16, 2016). Deney sırasında pistonla sabitlenen 100 kN kapasiteli yük hücresi sayesinde yük verileri toplanırken, sabit platforma monte edilen 2 adet 50 mm kapasiteli deplasman ölçer vasıtasıyla deplasman verileri eş zamanlı kaydedilmiştir (Şekil 5.b).

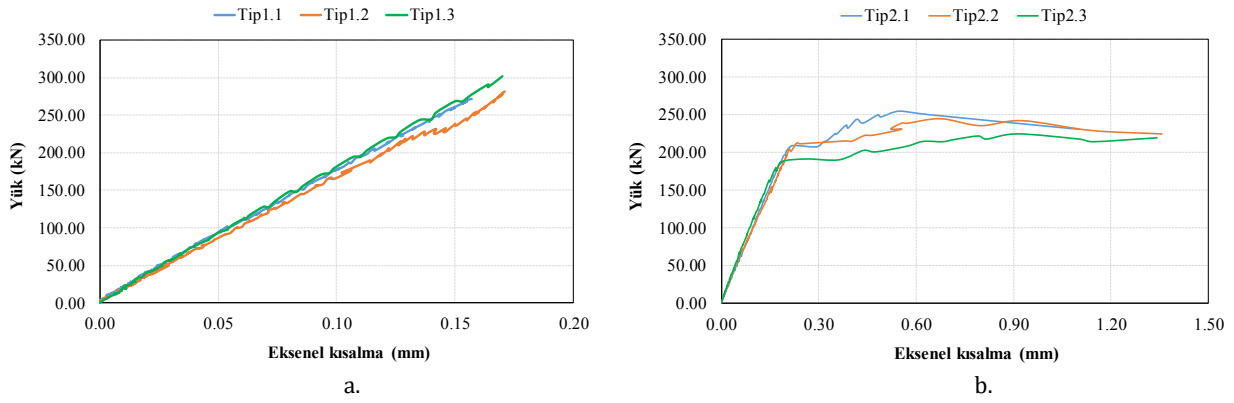


Şekil 5. Test düzenekleri; a. Panel deneyi düzeneği ve b. Eğilme deneyi düzeneği (Test setups; a. Panel test setup and b. Bending test setup)

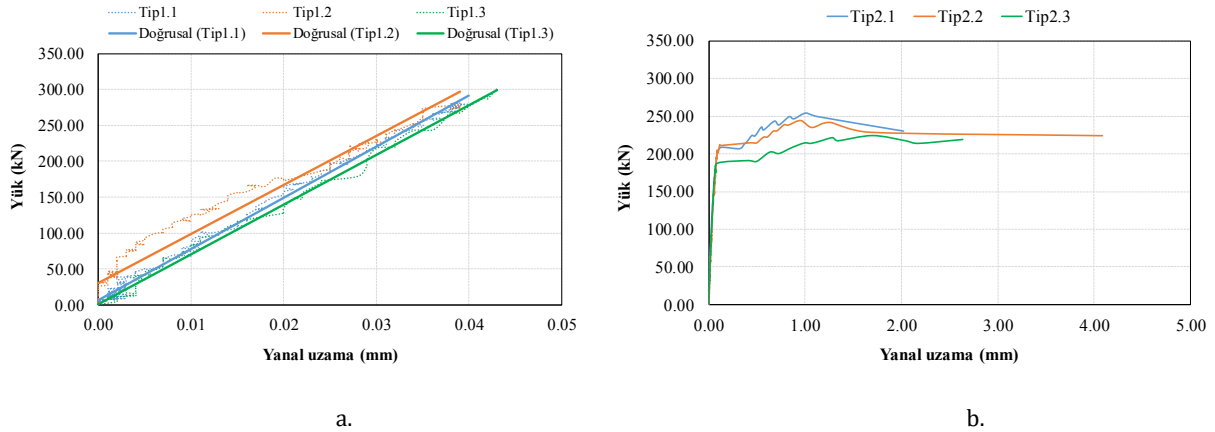
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Panel Deneyi Sonuçları (Results of panel tests)

Panel testleri tamamlandıktan sonra, hem aksel kılma (Şekil 6) hem de yanal uzamayı içeren yük - deplasman grafikleri hazırlanmıştır (Şekil 7). Tip-1 ve Tip-2 numunelerin panel performans testlerinde hem aksel kılma hem de yanal uzama açısından rijit bir davranış ile numuneler arasında tutarlı veriler elde edilmiştir. Tip-1 numunelerde başlıklarda meydana gelen ciddi beton ezilmelerinden dolayı 300 kN civarındaki yük değerlerine ulaşıldığında deneyler kesilmiş olmakla birlikte bu seviyeye kadar doğrusal artış görülmüştür. Her ne kadar Tip-1 numunelerdeki düzlem içi diyagonal kesme kapasitesine ulaşamamış olsa da donatılı zeminlerde çelik şeritlerin sabitleneceği bu panellerin köşe noktalarındaki ezilmeler, çelik şerit - panel bağlantısı açısından sorun teşkil edeceği için yorumlar bahsi geçen göçme durumuna göre yapılmıştır. EPS köpük dolgu Tip-2 numunelerinde ise yaklaşık 200 kN yük değerine kadar doğrusal ve elastik bir artış, sonrasında kısmi artış gözlenen yataya yakın bir davranış elde edilmiştir. Anlamlı grafiklerin çizilebilmesi amacıyla Tip-1 numunelerinin yanal uzama grafiklerinde eşdeğer eğilim çizgileri eklenmiştir.



Şekil 6. Panel testleri için yük-eksel kılma eğrileri; a. Standart numuneler, b. EPS dolgu numuneler (Load-axial shortening curves of the panel tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled specimens)



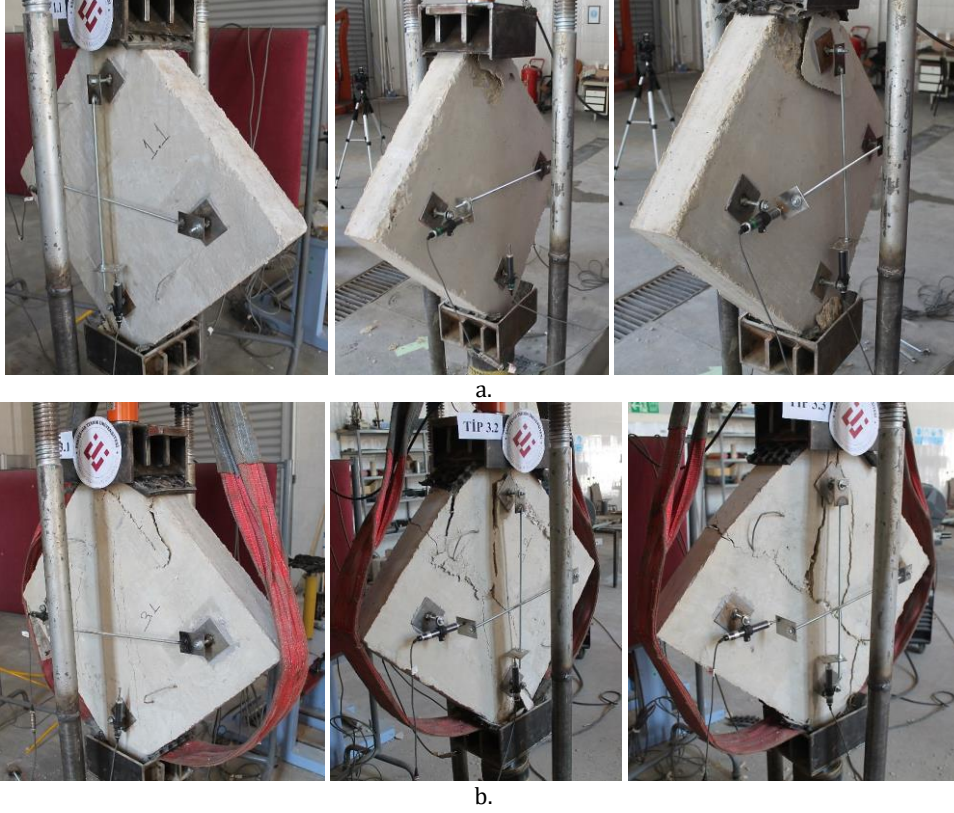
Şekil 7. Panel testleri için yük-yanal uzama eğrileri; a. Standart numuneler, b. EPS dolgu numuneler (Load-lateral elongation curves of the panel tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled specimens)

Panel testlerine ait genel sonuçlar ve gözlenen numune göçme davranışları sırasıyla Tablo 2 ve Şekil 8'de verilmiştir. Elastik sınırlar içerisinde ciddi ezilmeler meydana geldiği için Tip-1 numunelerinde 0,17 mm aksel kılma miktarına karşılık düzlem içi diyagonal kesme kapasitesi 288,01 kN olarak değerlendirilmiştir. Tip-2 numuneleri için ilgili aksel kılma seviyesinde ortalama 173,63 kN yük mertebesine ulaşılrken, maksimum basınç yükü 241,06 kN olarak belirlenmiştir. Önceki çalışmalarda düzlem içi diyagonal basınç testlerinde panel tipi elemanlarda katmanlar arasındaki bağın yitilmesiyle dış kaplamanın parçalanması, dönme, mesnet kayması, diyagonal ve çoklu çatlak oluşumu ve ezilme türü göçme tiplerinin görülebileceği belirtilmiştir (Corradi vd., 2008; Roca ve Araiza, 2010; Longo vd., 2021). Köpük içermeyen Tip-1 panel numunelerinin başlık bölgelerinde gözlenen ciddi ezilme ve kopmalar modüler panelleri kullanılamaz hale getirmiştir. Tip-2 numuneleri ise aksel yüklemeye doğrultusunda aşamalı çatlak oluşumu sonrasında çapraz çatlak gelişimiyle birlikte taşıma kapasitesinde kısmen azalma göstermiş ve daha sünek bir davranış sergilemiştir. Manos vd. (2021) tarafından belirtildiği gibi panellerde geniş çapraz çatlakların oluşma seviyesine kadar beton ve köpük arasında ayrışmanın gözlenmediği tespit

edilmiştir. Tip-2 panellerde yanıl uzama miktarının 1 mm'yi aşmasından sonra bu seviyeye ulaşılmaktadır. Diğer taraftan, projenin temel amacı olan ağırlık faktörü göz önüne alındığında panel numuneleri içerisinde EPS köpük eklenmesiyle birlikte prekast elemanlar %14,6 seviyesinde hafifletilmiştir.

Tablo 2. Panel testlerine ait genel sonuçlar (Average ultimate values obtained in panel tests)

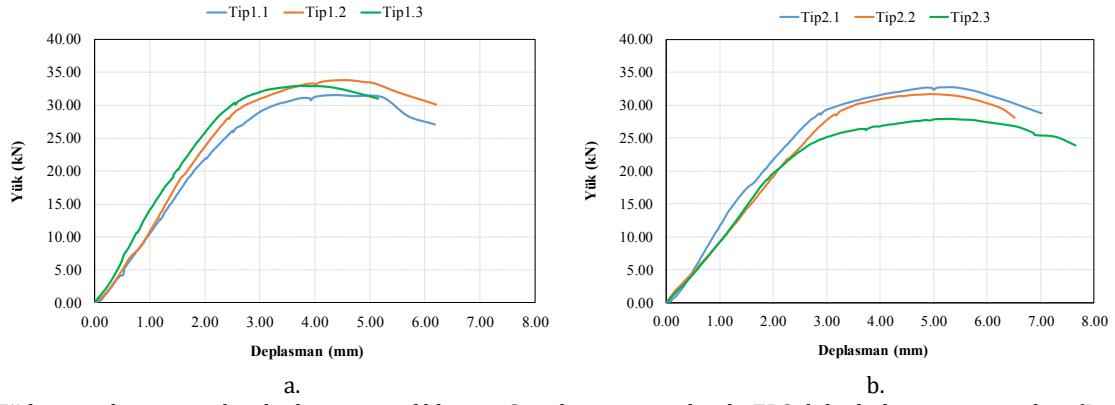
NUMUNE TİPİ	AĞIRLIK (kg)	DİYAGONAL BASINÇ YÜKÜ (kN)	EKSENEL KISALMA (mm)	YANAL UZAMA (mm)
TİP-1	122,38	288,01	0,169	0,040
TİP-2	104,44	241,06	0,712	1,221



Şekil 8. Panel testlerinde gözlenen numune göçme davranışları; a. Standart panel numuneleri, b. EPS dolgulu panel numuneleri (Featured failure modes of specimens after panel tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled panel specimens)

3.2. Eğilme Deneyi Sonuçları (Results of Bending Tests)

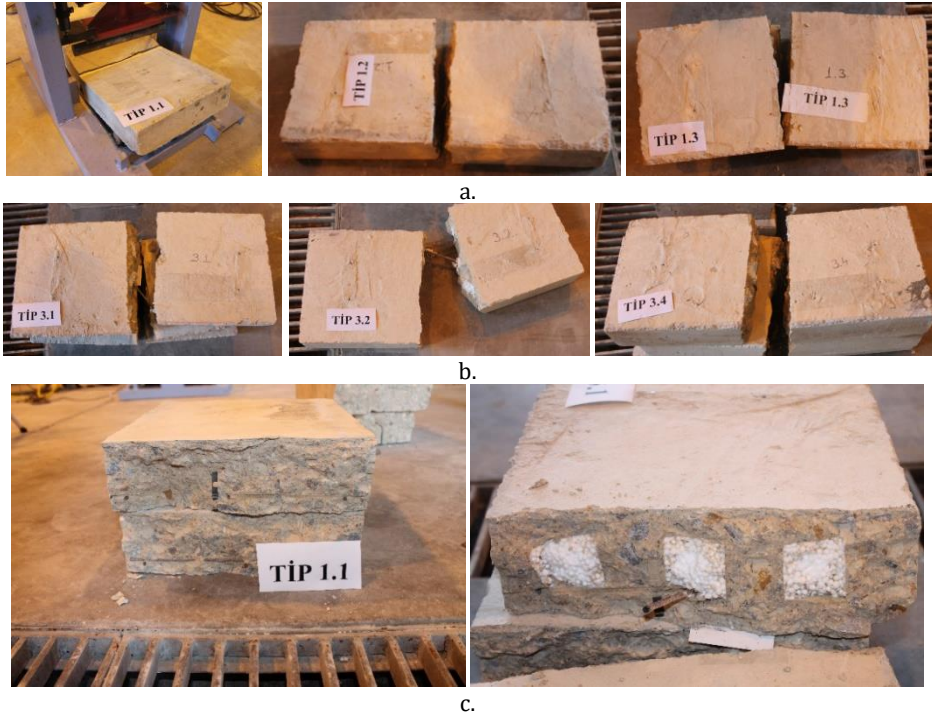
Şekil 9'da verilen Tip-1 ve Tip-2 numunelerine ait sonuçlarının benzer çıkması, EPS köpüğün eğilme davranışı açısından yaklaşık %12'lik bir ağırlık avantajı ile benzer performans değerine ulaştığını göstermektedir. Eğilme testlerine ait genel sonuçlar ve gözlenen numune göçme davranışları sırasıyla Tablo 3 ve Şekil 10'da verilmiştir. Standart ve EPS köpüklü numunelerin eğilme kapasiteleri arasındaki 2 kN'luk farkın EPS köpüklerle bırakılan boşluklar nedeni ile olduğu yorumlanmaktadır. Eğilme deneyi sonucunda Tip-1 ve Tip-2 numunelerde Şekil 10.c'de görüldüğü gibi çelik donatıların kopmasıyla göçme durumu oluşmakta ve kapasite sınırına ulaşılmaktadır. Maksimum eğilme yüküne karşılık gelen deplasmanlar dikkate alındığında EPS köpüklü Tip-2 numuneleri Tip-1 numunelerine kıyasla %23,5 daha fazla deplasman göstererek, daha sünek bir davranış sergilemiştir.



Şekil 9. Eğilme testleri için yük - deplasman grafikleri; a. Standart numuneler, b. EPS dolgulu beton numuneleri (Load-axial deformations curves of the bending tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled concrete specimens)

Tablo 3. Eğilme testlerine ait genel sonuçlar (Average ultimate values obtained in bending tests)

NUMUNE TİPİ	AĞIRLIK (kg)	MAKSİMUM EĞİLME YÜKÜ (kN)	DEPLASMAN (mm)
TİP-1	59,75	32,77	4,21
TİP-2	52,63	30,78	5,20



Şekil 10. Eğilme testlerinde gözlenen numune göçme davranışları; a. Standart numuneler, b. EPS dolgulu beton numuneleri ve c. Hasar sonrası kesitler (Featured failure modes of specimens after bending tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled concrete specimens and c. Damaged cross sections.)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Söz konusu çalışma ile karayolları veya demiryolları bünyesinde inşa edilen yol, köprü, tünel veya donatılı zemin projelerinde kullanım yeri bulan betonarme prekast panellerin yerine geçebilecek ikame ürün niteliğinde daha hafif ve benzer performanslı panellerin üretilmesi amaçlanmıştır. Sahaya nakil ve sahada daha kolay bir şekilde yerine yerleştirebileceği seviyede hafif ve şartname koşullarını sağlayan panellerin üretilmesi hedeflenmiştir.

Literatürde bir ilk niteliğinde olan bu özgün çalışma kapsamında, beton içerisine EPS köpükler yerleştirilerek üretilen modüler prekast paneller sayesinde, ağır betonarme paneller yerine donatılı zemin projelerindeki farklı yük mertebelerinde kullanılacak yeterli performansa sahip hafif paneller üretilerek gerçekleştirilen performans testleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- C30 beton kullanılan EPS dolgulu numuneler (Tip-2), Karayolu Teknik Şartnamesinde önerilen çelik donatılı ve C30 beton sınıfına sahip numuneler (Tip-1) ile kıyaslandığında ağırlık açısından ortalama %13,0 kazanç sağlamaktadır.
- Panel testlerinde Tip-1 numunelerde 0,17 mm eksenel kısalma seviyesinde 288,01 kN düzlem içi diyagonal kesme kapasitesi elde edilmiştir. Aynı eksenel kısaltma için Tip-2 numunelerde ortalama 173,63 kN yük mertebesine ulaşılırken, göçme seviyesindeki maksimum basınç yükü 241,06 kN olarak belirlenmiştir.
- Tip-1 panel numuneleri yaklaşık 0,04 mm yanal deplasmana maruz kaldığında başlık bölgelerinde ciddi ezilme ve kopma tipi lokal göçme seviyelerine ulaşarak modüler paneller kullanılamaz hale gelmiştir. Tip-2 panellerde ise eksenel yükleme doğrultusunda aşamalı çatlak ve çapraz çatlak gelişimiyle birlikte yanal uzama miktarının 1 mm'yi aşmasından sonra parçalanma gözlenmiştir.
- Üç noktalı eğilme testlerinde Tip-1 ve Tip-2 numunelerinde sırasıyla 32,77 kN ve 30,78 kN maksimum eğilme yükü altında göçme seviyesine ulaşılmaktadır. EPS köpük içeren Tip-2 numuneler %23,5 oranında daha fazla deplasman göstererek, daha sünek davranmaktadır.
- Sonuç olarak hem düzlem içi diyagonal kesme kapasitesi hem de eğilme performansı açısından EPS köpüklü kompozit panellerin yukarıda bahsi geçen limit değerlere kadar geoteknik proje ihtiyaçları doğrultusunda alternatif yüzey kaplaması olarak kullanılabilmesi kanıtlanmıştır. Ayrıca, gelecek çalışmalarda panellerdeki çarpma etkilerini sönmek için araçların olası çarpma yüksekliğine kadar harici donatılarla güçlendirilmesi, farklı özelliklerdeki köpüklerin beton içerisine farklı konumlarda yerleştirilmesi, katkılı bitüm veya kauçuk esaslı elastomer ile kaplanarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma üniversite-sanayi iş birliği kapsamında Eskişehir Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik A.Ş. ile birlikte yapılan 62177 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Acar, M.C., Şener, A., Özbayrak, A., Çelik, A.I., (2020). The Effect of Zeolite Additive on Geopolymer Mortars. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 8(3), 820-832.
- Ahmad, A., Singh, Y., (2021). In-plane Behaviour of Expanded Polystyrene Core Reinforced Concrete Sandwich Panels. *Construction and Building Materials*, 269, 121804.
- Assaad, J., Chakar, E., Zéhil, G.P., (2018). Testing and Modeling the Behavior of Sandwich Lightweight Panels Against Wind and Seismic Loads. *Engineering Structures*, 175, 457-466.
- Assaad, J.J., El Mir, A., (2020). Durability of Polymer-Modified Lightweight Flowable Concrete Made Using Expanded Polystyrene. *Construction and Building Materials*, 249, 118764.
- ASTM C293/C293M - 16, (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- ASTM E 519 - 15, (2021). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- Babu, K.G., Babu, D.S., (2003). Behaviour of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Containing Silica Fume. *Cement and Concrete Research*, 33, 755-762.
- Benayoune, A., Samad, A.A.A., Abang Ali, A.A., Trikha, D.N., (2007). Response of Pre-cast Reinforced Composite Sandwich Panels to Axial Loading. *Construction and Building Materials*, 21, 677-685.
- Borri, A., Corradi, M., Sisti, R., Buratti, C., Belloni, E., Moretti, E., (2016). Masonry Wall Panels Retrofitted with Thermal-Insulating GFRP-Reinforced Jacketing. *Materials and Structures*, 49, 3957-3968.
- Cengiz, S., Kamanlı, M., Ünal, A., (2020). Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Produced with Self Compacting and Normal Concrete. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 8(2), 429-438.
- Chen, B., Liu, J., (2004). Properties of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Reinforced with Steel Fiber. *Cement and Concrete Research*, 34, 1259-1263.
- Chen, B., Liu, J., (2007). Mechanical Properties of Polymer-Modified Concretes Containing Expanded Polystyrene Beads. *Construction and Building Materials*, 21, 7-11.
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., Li, Z.X., (2015). Static and Dynamic Mechanical Properties of Expanded Polystyrene. *Materials & Design*, 69, 170-180.
- Corradi, M., Mustafaraj, E., Speranzini, E., (2021). Sustainability Considerations in Remediation, Retrofit, And Seismic Upgrading of Historic Masonry Structures. *Environmental Science and Pollution Research*, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17490-7>.

- Corradi, M., Tedeschi, C., Binda, L., Borri, A., (2008). Experimental Evaluation of Shear and Compression Strength of Masonry Wall Before and After Reinforcement: Deep Repointing. *Construction and Building Materials*, 22, 463-472.
- Del Zoppo, M., Ludovico, M.D., Prota, A., (2019). Analysis of FRCM and CRM Parameters for The In-Plane Shear Strengthening of Different URM Types. *Composites Part B*, 171, 20-33.
- FEMA356, (2000). Prestandards and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Virginia: Federal Emergency Management Agency.
- Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., Cheeseman, C.R., (2014). Lightweight Mortars Containing Expanded Polystyrene and Paper Sludge Ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285-292.
- Hou, H., Ji, K., Wang, W., Qu, B., Fang, M., Qiu, C., (2019). Flexural Behavior of Precast Insulated Sandwich Wall Panels: Full-Scale Tests and Design Implications. *Engineering Structures*, 180, 750-761.
- Kan, A., Demirboğa, R., (2009). A Novel Material for Lightweight Concrete Production. *Cement and Concrete Composites*, 31, 489-495.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Lee, J.H., Kang, S.H., Ha, J.Y., Hong, S.G., (2018). Structural Behavior of Durable Composite Sandwich Panels with High Performance Expanded Polystyrene Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, 21.
- Longo, F., Cascardi, A., Lassandro, P., Aiello, M.A., (2021). Thermal and Seismic Capacity Improvements for Masonry Building Heritage: A Unified Retrofitting System. *Sustainability*, 13, 1111.
- Longo, F., Lassandro, P., Moshiri, A., Phatak, T., Aiello, M.A., Krakowiak, K.J., (2020). Lightweight Geopolymer-Based Mortars for The Structural and Energy Retrofit of Buildings. *Energy & Buildings*, 225, 110352.
- Manos, G.C., Melidis, L., Katakalos, K., Kotoulas, L., Anastasiadis, A., Chatziastrou, C., (2021). Masonry Panels with External Thermal Insulation Subjected to In-Plane Diagonal Compression. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00538.
- Mohamad, N., Omar, W., Abdullah, R., (2011). Precast Lightweight Foamed Concrete Sandwich Panel (PLFP) Tested under Axial Load: Preliminary Results. *Advanced Materials Research*, 250-253, 1153-1162.
- Morales-Alonso, G., Cendón, D.A., Gálvez, F., Erice, B., Sánchez-Gálvez, V., (2011). Analysis of the Fracture of Reinforced Concrete Flat Elements Subjected to Explosions. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 28, 433-438.
- Naito, C., Hoemann, J., Beacraft, M., Bewick, B., (2012). Performance and Characterization of Shear Ties for Use in Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *Journal of Structural Engineering*, 138, 52-61.
- O'Hegarty, R., Kinnane, O., (2020). Review of Precast Concrete Sandwich Panels and Their Innovations. *Construction and Building Materials*, 233, 117145.
- Roca, P., Araiza, G., (2010). Shear Response of Brick Masonry Small Assemblages Strengthened with Bonded FRP Laminates for In-Plane Reinforcement. *Construction and Building Materials*, 24, 1372-1384.
- Saheed, S., Amran, Y.H.M., El-Zeadani, M., Aziz, F.N.A., Fediuk, R., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., (2021). Structural Behavior of Out-of-plane Loaded Precast Lightweight EPS-Foam Concrete C-Shaped Slabs. *Journal of Building Engineering*, 33, 101597.
- Sayil, B., Gürdal, E., (1999). The Physical Properties of Polystyrene aggregated Gypsum Blocks. *Durability of Building Materials and Components*, 8, 496-504.
- Tunaboyu, O., (2017). Kısa Kolon Oluşumuna Neden Olabilecek Boşluksuz Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve Davranışının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle İrdelenmesi. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi, Türkiye.
- Wibowo, A., Wijatmiko, I., Nainggolan, C.R., (2017). Bamboo Reinforced Concrete Slab with Styrofoam Lamina Filler as Solution of Lightweight Concrete Application. *Matec Web Conferences*, 101, 05012.
- Xiong, C., Chu, M., Liu, J., Sun, Z., (2018). Shear Behavior of Precast Concrete Wall Structure Based on Two-Way Hollow-Core Precast Panels. *Engineering Structures*, 176, 74-89.



FARKLI ALTTAŞ BİRİKTİRME SICAKLIKLARINDA KAPLANMIŞ NİTi KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet POYRAZ*

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Triboloji,
NiTi Film Kaplama,
RF Magnetron Saçtırma.*

Öz

Ticari saf titanyum; dental ve ortopedik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen, hafif, biyouyumlu, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanıklı bir implant malzemesidir. Bu çalışmanın amacı; dental implant malzemelerinden ticari saf titanyumun metallerle temasında göstermiş olduğu yüksek kararsız sürtünme katsayılarını önlemek ve malzemenin sürtünme, aşınma özelliklerinin iyileştirilmeye çalışılmasıdır. Bu maksatla Ti alttaş numunelere farklı biriktirme sıcaklıklarında RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak NiTi film kaplamalar uygulanmıştır. NiTi kaplamaların kaplama malzemesi olarak seçilmesinin sebebi; literatür incelemelerinde bu kaplamaların uygulanan stresi elastik deformasyona dönüştürebilmesi, düşük sertlik, yüksek mukavemet vermesi ve implant malzemeleri üzerinde biyouyumlu ve yapışkan olduğunun gösterilmesidir. Kaplamalar sonrası Taramalı Elektron Mikroskopunun EDS dedektörü kullanılarak filmlerin yüzeyinden kimyasal kompozisyonlar belirlenmiştir. XRD cihazı kullanılarak farklı alttaş biriktirme sıcaklıklarında biriktirilen filmlerin X-Işınları kırınım ölçümleri gerçekleştirilmiştir. NiTi film kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının alttaş biriktirme sıcaklıklarındaki değişimle nasıl etkilendiğini belirlemek için, nano tribometre aşınma cihazında bu filmler teste tabii tutulmuştur.

INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COATED NİTi COATINGS AT DIFFERENT SUBSTRATE DEPOSITING TEMPERATURES

Keywords

*Tribology,
NiTi Film Coating,
RF Magnetron Sputtering.*

Abstract

Commercial pure titanium; It is a lightweight, biocompatible, high-strength and corrosion-resistant implant material that is widely preferred in dental and orthopedic applications. The aim of this study; It is an attempt to improve the friction and wear properties of the material in order to prevent the high unstable friction coefficients of commercial pure titanium, which is one of the dental implant materials, in contact with metals. For this purpose, NiTi film coatings were applied to Ti substrate samples at different deposition temperatures by RF magnetron sputtering method. The reason for choosing NiTi coatings as coating material; literature review shows that NiTi coatings can convert the applied stress into elastic deformation, give low hardness, high strength, and are biocompatible and sticky on implant materials. After coatings, chemical compositions were determined from the surface of the films using the EDS detector of the Scanning Electron Microscope. X-Ray diffraction measurements of the films deposited at different substrate deposition temperatures were carried out using the XRD device. How the friction coefficient and wear rates of NiTi film coatings are affected by the change in substrate deposition temperatures has been revealed as a result of testing in the nano tribometer wear device.

Alıntı / Cite

Poyraz, M., (2022). Farklı Alttaş Biriktirme Sıcaklıklarında Kaplanmış NiTi Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1325-1332.

* İlgili yazar / Corresponding author: mpoyraz@mu.edu.tr, +90-252-211-1129

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. Poyraz, 0000-0002-9469-8037	Başvuru Tarihi / Submission Date	25.05.2022
	Revizyon Tarihi / Revision Date	20.07.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	11.08.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Ticari saf Ti, 316 L, kobalt-krom-molibden ve Ti6Al4V alaşımları yaygın olarak kullanılmakta olan dental implant malzemelerindendir (Cortada 2000). Bunlar arasında ticari saf Ti; düşük maliyetli, biyoyumlu, korozyona dayanıklı, yüksek mukavemetli olan hafif ve dayanıklı bir implant malzemesidir. Ancak ticari saf Ti, yüksek kararsız sürtünme katsayılarına sahip olduğundan, diğer metallerle temasında şiddetli aşınmaya uğramaktadır. Üzerindeki koruyucu TiO₂ filminin çıkarılması da alerjik reaksiyon ve enfeksiyon gibi sorunlara yol açmaktadır (Agains, 1988).

Literatürde yer alan NiTi kaplamaların; uygulanan stresi elastik deformasyona dönüştürebildiği, implantlarda düşük sertlik, yüksek mukavemet, yüksek geri kazanılabilir gerilimler verdiği, Ti üzerinde biyoyumlu ve yapışkan kaplamalar oluşturduğu gösterilmiştir. Bu nedenle NiTi kaplamalar önerilen bir kaplama malzemesi olarak karşımıza çıkmıştır.

Ticari saf titanyum metallerle temasa geçtiğinde yüksek kararsız sürtünme katsayıları sergilediği için, bu çalışmada malzemenin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi maksadıyla RF Magnetron Sputter yöntemiyle NiTi kaplamalar farklı parametrelerde biriktirilmiştir. Literatür araştırmalarında Ti altaşlar üzerinde kaplama yapışması ve biyoyumluluk olarak en uygun kaplamanın NiTi filmler olduğu önerilmiştir (Lepule, 2015). Literatürde genellikle NiTi kaplamalar büyütülürken, kaplama parametresi olarak Ag'nin değişik oranlarda kaplama içine dahil edilmesinin tribolojik özelliklere etkisi incelenmişken, çalışmamızda NiTi içerisine başka bir katkı kaplaması yapılmadan, altaş biriktirme sıcaklığı değişiminin tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın içeriği aşağıdaki başlıklar altında sunulmuştur. İkinci bölümde kaynak araştırması bulunmaktadır. Üçüncü bölümde film kaplamaların yapılmasında hangi materyallerin kullanıldığı ve kaplama parametreleri ile kaplamalara uygulanmış analizlerin sırası anlatılmıştır. Dördüncü bölümde analizlerde kullanılmış cihazlar doğrultusunda elde edilen araştırma bulguları verilmektedir. Son bölüm tartışma ve sonuç bölümünde ise NiTi filmlerden tribolojik olarak elde edilen sonuçlar ortaya konarak, literatürle kıyaslama yapıldığında nasıl bir sonuç elde edildiği tartışılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Biyomalzemeler, insan vücudundaki canlı dokuların işlevlerini yerine getirmek amacıyla kullanılan doğal yada sentetik malzemelerdir. Biyoyumluluk ise kullanım sürecinde malzemenin vücut sistemine uygun cevap verebilme, vücutla uyusabilme, kendini çevreleyen dokuların normal fonksiyonlarına engel olmama ve iltihaplanma oluşturmama yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Güven, 2014). Ticari olarak saf titanyum ve ana tıbbi alaşımı Ti-6Al-4V, biyoyumlulukları, mekanik özellikleri ve modern görüntüleme teknikleri sırasındaki nötr interferans nedeniyle diş hekimliği ve ortopedide klinik olarak yaygın kullanılmaktadır. Hem titanyum hem de Ti-6Al-4V alaşımı havaya veya sulu ortama maruz kaldığında oldukça kararlı bir yüzey oksit tabakası geliştirirler (Lausmaa, 1986). Titanyum implantlar klinik olarak yaygın kullanılmaktadır, ancak implantla ilişkili enfeksiyon en ciddi komplikasyonlardan biri olmaya devam etmektedir. Bu durumun tedavisi zordur ve bazen implantın çıkarılmasını ve tekrarlanan ameliyatları gerektirebilir (Zhao, 2009). İmplantlar yaşam boyunca bakteri istilasına karşı savunmasızdır. Bu nedenle normal işlevleri sürdürmek ve implantlar üzerinde bakteri kolonizasyonu ile mücadele etmek için uzun vadeli yetenek elde etmek önemlidir (Monteiro, 2009).

NiTi kaplamalar, metal implant malzemeleri üzerinde yapışkan ve biyoyumlu kaplamalar oluşturmaktadır. Bu nedenle, NiTi kaplamaların biyoyumluluğu ve korozyon davranışları ile ilgili çok sayıda çalışma son zamanlarda literatürde yer almaktadır (Lepule, 2015). İmplantlarda biyofilm oluşumunu önlemek için antibakteriyel kaplamalar geniş çapta araştırılmış olsa da, uzun vadeli antibakteriyel kapasiteye sahip olanları üretme girişimleri nispeten azdır, ancak antibakteriyel ajanların biyomedikal implantlardaki kaplamalara dahil edilmesine artan bir ilgi vardır. İmplantla ilişkili enfeksiyonu önlemek için antibakteriyel yeteneğe sahip bir yüzey arzu edilmektedir. Zhao (2011), çalışmada bu amaca ulaşmak için Ti implantlar üzerinde gümüş nanoparçacıkları ile birleştirilmiş titanyumdioksit nanotüpler (TiO₂-NT) üretmiştir. Uzun vadeli antibakteriyel yetenek ve iyi doku entegrasyonu sağlayan bu kontrol edilebilir NT-Ag yapısı; ortopedi, diş hekimliği ve diğer biyomedikal cihazlarda umut verici uygulamalara sahiptir.

Metal biyomalzemelerin yüzeyinde kaplamalar hazırlamak için plazma püskürtme, elektro biriktirme, sol-jel, daldırma kaplama, kimyasal buhar biriktirme ve fiziksel buhar biriktirme gibi birçok yöntem vardır (Wang, 1998). PVD teknolojisinde kaplama gerektiren nesne üzerinde biriktirilen bir hedef malzemenin buharını üretmek için fiziksel işlem kullanılır (Su, 2018). PVD teknolojisi tarafından sağlanan kaplama, mükemmel korozyon direncine, süper sert yüzey sertliğine, iyi biyouyumluluğa, alt tabaka ile güçlü bir bağlama kuvvetine sahiptir ve film tabakası, insan vücudu için iyi bir koruma sağlayan yoğunlukta ve homojendir (Ye, 2014). PVD yöntemlerinden RF Magnetron Saçtırma Tekniği kullanılarak MoS₂ ince film kaplama malzemesi, AISI440C alttaşı üzerinde biriktirilmiştir. Elde edilen katı yağlayıcının kayma sırasında düşük sürtünme sergilediği tespit edilmiştir (Poyraz, 2016).

Thangavel (2019), çalışmasında NiTi/Ag kaplı Cp-Ti alttaşları hazırlamıştır ve kapsamlı bir analize tabi tutmuştur. Değişken %Ag içeren NiTi-Ag alaşımı, radyo frekans (RF) saçtırma yöntemi ile Cp-Ti üzerine kaplanmıştır. Ortaya çıkan malzeme, sito-uyumluluk, korozyon davranışı ve aşınma direnci için karakterize edilmiştir. Korozyon direnci, uyarılmış bir biyolojik sıvıda test edilmiştir. Aşınma özellikleri, sürtünme katsayısı ve aşınmış yüzeyin elementel bileşimi açısından değerlendirilmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Alttaşların ve Saçtırma Hedefinin Temini (Obtaining Substrates and Sputtering Targets from the Company)

Ticari saf titanyum 35 mm çap ve 500 mm uzunluklu çubuk olarak tedarik edilmiştir. İnce film kaplamalarda kullanılmış olan ticari saf titanyum alttaşlar (30 mm çaplı) ve (2 mm kalınlıklı) olacak şekilde hassas kestirilmiştir. Çubuk çapının 35 mm'den 30 mm'e indirilmesi işlemi (JML-6630) torna tezgahında ve 2 mm et kalınlıklı diskler şeklinde kestirilmesi işlemi (JBS-200T) testere makinesinde gerçekleştirilmiştir. Kaplamalarda kullanılmış olan NiTi saçtırma hedefleri (%99.9 saflıkta, 50,8 mm çap ve 3,18 mm kalınlıklı) olacak şekilde temin edilmiştir.

3.2. RF Magnetron Saçtırma Kaplama İşlemlerinin Yapılması (Performing RF Magnetron Sputter Coating Processes)

NiTi film kaplamalar Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemlerinden RF Magnetron Saçtırma ile (Vaksis PVD-MT/1M4T) film kaplama cihazı kullanılarak üretilmiştir. Ticari saf titanyum alt taşlar eşit sürelerde 500, 800, 1200 ve 4000 meshlik SiC zımpalarla ince zımparalamaya tabi tutulmuştur. Ticari saf titanyum alttaşlar üzerine alkol içinde ultrasonik temizleme ve kurutma işlemleri uygulanmıştır. Kaplamaların ilk grubunda; Cp-Ti alttaş üzerinde, NiTi filmler (1.1 kaplama parametresinde); ikinci grubunda ise (1.2 kaplama parametresinde) biriktirilmiştir. Her iki gruptaki kaplamalara; 250 W RF saçtırma gücü uygulanmış olup, kaplamaların alttaş biriktirme sıcaklıkları sırasıyla oda sıcaklığı ve 550 °C seçilmiştir. Farklı alttaş biriktirme sıcaklıklarının biriktirilen filmin yapısal özelliklerine etkisini anlamak için, birbirine uzak iki alttaş biriktirme sıcaklığı seçilmiştir. Biriktirmelerde en yüksek 550 °C seçilmesinin sebebi kaplamaların gerçekleştirildiği PVD-MT/1M4T film kaplama cihazının manualinde alttaşları biriktirmek için müsaade edilen en yüksek sıcaklığın 600 °C olmasıdır. Bu nedenle cihazın sıcaklık PID kontrol edicisinin set edilen sıcaklıkta emniyetle çalışabilmesi için en yüksek 550 °C biriktirme sıcaklığı seçilmiştir. Kaplama biriktirme odası turbo moleküler ve mekanik pompa vasıtasıyla (5x10⁻⁵ mbar) taban basıncına pompalanmıştır. Kaplamalar sırasında yüksek saflıktaki argon (%99.999), (50 sccm'de) akışı sağlanmış olup, akış kontrollü bir MKS kütle akış kontrolü ile kontrol edilmiştir. Kaplamaların biriktirilmesi sırasında uygulanan parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kaplamaların RF Magnetron Biriktirme Parametreleri (RF Magnetron Deposition Parameters of Coatings)

Kaplama Parametre	Kaplama Malzeme	RF saçtırma gücü (W)	Alttaş Sıcaklık (°C)	Kaplama Süre (dk)
1.1.	NiTi	250	Oda	60
1.2.	NiTi	250	550	60

3.3. Film Kaplanmış Numunelerin Elektron Mikroskopi Görüntülerinin Alınması (Electron Microscope Images of Film Coated Samples)

Kaplamalar sonrasında NiTi filmlerin yüzeyi Taramalı Elektron Mikroskobu (JEOL JSM-7600F SEM) kullanılarak gözlemlenmiştir. Kaplamanın kompozisyon ve yapısı Enerji Dağılım Spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Böylece yüzey görüntüsünden alınan spektrum ile kaplama malzemenin kimyasal kompozisyonu belirlenmiştir.

3.4. Film Kaplamaların Sertlik Ölçümlerinin Yapılması (Hardness Measurements of Film Coatings)

Bir nanoindentation sistemi kullanılarak, kaplanmış örneklerin yüzeylerine dik olacak şekilde maksimum bir yük değerine ulaşılmış sonra tekrar dereceli olarak geri yükleme yapılmıştır. Bu şekilde 1.1. ve 1.2. kaplama parametrelerinde biriktirilmiş olan NiTi filmlerin sertlik değerleri elde edilmiştir.

3.5. Film Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi için XRD Kullanılması (Using XRD to Determine Film Structural Properties)

Oda sıcaklığı ve 550 °C alttaş biriktirme sıcaklıklarında RF magnetron saçtırma yöntemiyle kaplanmış filmlerin farklı alttaş biriktirme sıcaklıklarının yapısal özelliklerine etkisini araştırmak için X-Işınları Difraktometresi (Rigaku Smartlab X-Işınları XRD) cihazı kullanılmıştır. Örnek üzerinden kırınıma uğrayan X-ışınları aralıklardan geçerek dedektöre ulaşmış ve bragg yasasına göre numuneye ait kırınım desenleri alınabilmektedir. Filmlerin X-Işını Kırınım Ölçümleri oda sıcaklığında $20^{\circ} \leq 2\theta \leq 80^{\circ}$ aralığında, 0.5 der/dak tarama hızında yapılmıştır.

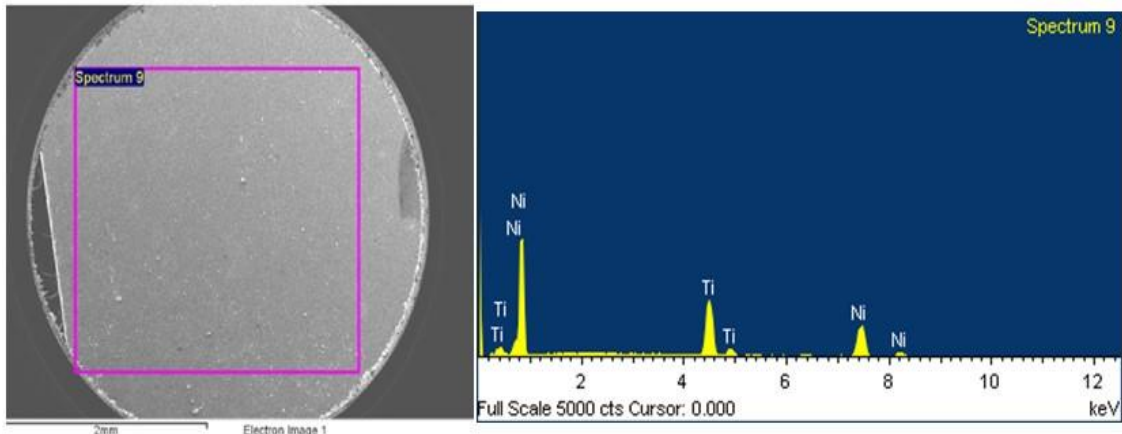
3.6. Film Kaplamalara Tribolojik Testlerin Uygulanması (Application of Tribological Tests to Film Coatings)

NiTi kaplanmış filmlerin tribolojik özelliklerini belirlemek için numunelere; kuru atmosfer ortamında nano-tribometre aşınma test cihazında (Anton Paar Tribometer NTR³), 50 mN yük ve 0.3 mm/s hız altında tribolojik testler uygulanmıştır. Toplamda 1 metre mesafe yol aldırılarak, 25 °C ortam sıcaklığında ve 2500 çevrimde aşınma testleri uygulanmıştır. Tribolojik testlerde aşındırıcı olarak 2 mm çaplı, AISI420 çeliğinden üretilmiş bilya kullanılmıştır. Herbir örnek için 2500 çevrim sonucunda bir ortalama sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Örnekler için minimum 3 test yapılmıştır. Bu 3 testten her bir 2500 çevrim sonucunda elde edilen 3 farklı ortalama sürtünme katsayılarının ortalaması alınarak, farklı parametrelerde biriktirilen kaplamaların ortalama sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Tribolojik testler neticesinde, NiTi filmlerin sürtünme katsayısı-yol grafikleri belirlenerek, kaplamaların aşınma oranları grafikleri sunulmuştur. Kaplamalara ait ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranları değerleri tablolaştırılmıştır. Kaplamaların aşınma oranları bu kaplamalar için gözlemlenen aşınma derinlikleri kullanılarak hesaplanmıştır (Archard 1961).

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. NiTi Kaplamalı Alttaş Malzemenin Yüzey EDS Bulguları (Surface EDS Results of NiTi Coated Substrate Material)

NiTi kaplama yapılmış Cp-Ti alttaşın yüzeyinden alınan taramalı elektron mikroskop görüntüsü Şekil 1 ile gösterilmiştir. Malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 1. NiTi Kaplamalı Cp-Ti Alttaş Yüzey Görüntüsü ve EDS Spektrumu (Surface Image and EDS Spectrum of NiTi Coated Cp-Ti Substrate)

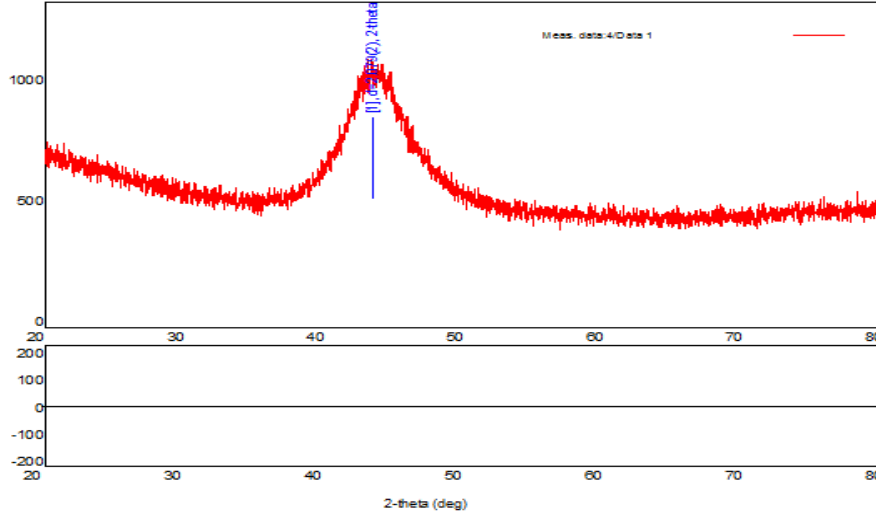
Tablo 2. NiTi Kaplamalı Cp-Ti Alttaş Yüzey EDS Spektrum Sonuçları (Surface EDS Spectrum Results of NiTi Coated Cp-Ti Substrate)

Element	Ağırlık %	Atomik %
Ti K	36.13	40.65
Ni K	63.87	59.35

Tablo 2'den elde edilen EDS sonuçları incelendiğinde NiTi filmlerinin RF magnetron saçırma yöntemi ile üretilebildiği ve bileşimde herhangi bir safsızlık elementine rastlanılmadığı görülmüştür.

4.2. Filmlerin X-Işınları Kırınım Analizi Bulguları (Findings of X-Rays Diffraction Analysis of Films)

Oda sıcaklığında ve 550 °C'de biriktirilmiş NiTi filmlerin kırınım açısına karşılık kırınım yoğunluğunu gösteren spektrumları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Böylece kırınım desenindeki her bir pik bir kristalografik düzleme karşılık gelmiştir.

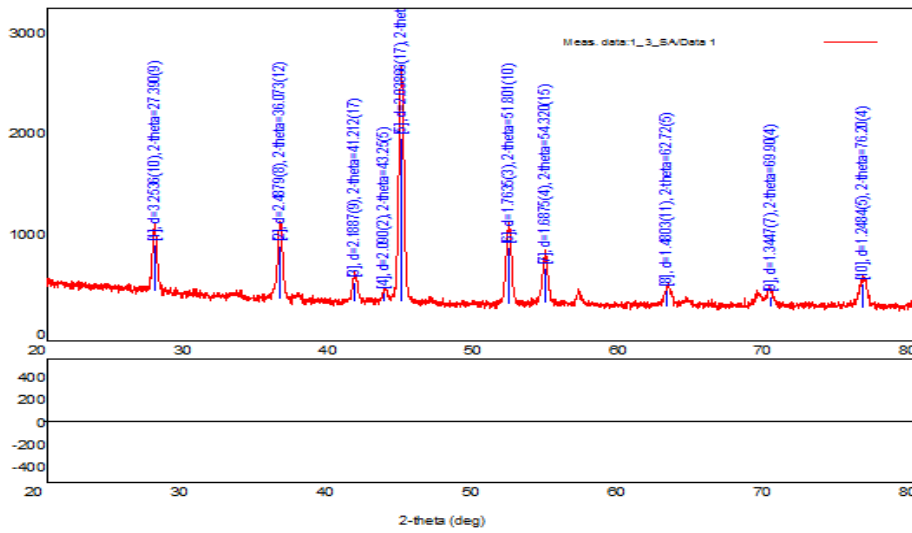


Şekil 2. Oda Sıcaklığında Biriktirilmiş NiTi Kaplamalı Filmin XRD Deseni (XRD Pattern of NiTi Coated Film-Deposited at Room Temperature)

Tablo 3. Oda Sıcaklığında Biriktirilmiş NiTi Kaplamalı Filmin XRD Deseni Pik Listesi (Peak List of XRD Pattern of NiTi Coated Film-Deposited at Room Temperature)

2-theta(deg)	d (Å)	Height(cps)	Int. I(cps deg)	FWHM(deg)	Size
43.49(5)	2.079(2)	337(17)	1984(17)	5.19(5)	17.21(16)

Şekil 2'den elde edilen XRD sonucu ile oda sıcaklığında biriktirilen NiTi filmlerin yapısının amorf olduğu görülmüştür. Altaş üzerinde biriken atomik yığınların kristalleşme durumu ortaya çıkmamıştır.



Şekil 3. 550 °C'de Biriktirilmiş NiTi Kaplamalı Filmin XRD Deseni (XRD Pattern of NiTi Coated Film-Deposited at 550 °C Temperature)

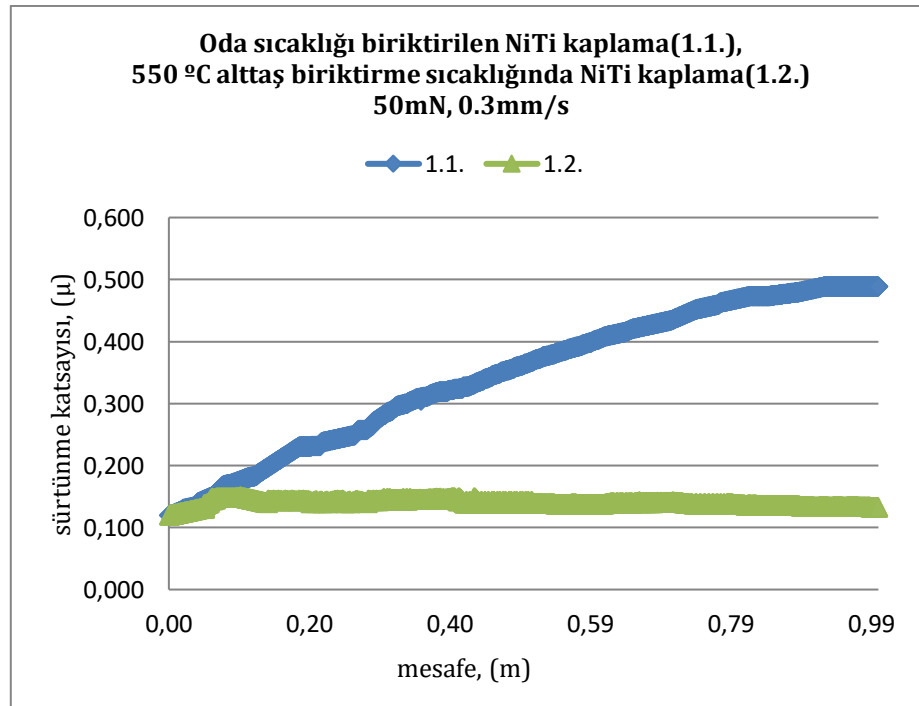
Tablo 4. 550 °C'de Biriktirilmiş NiTi Kaplamalı Filmin XRD Deseni Pik Listesi (Peak List of XRD Pattern of NiTi Coated Film Deposited at 550 °C)

2-theta(deg)	d (Å)	Height(cps)	Int. I(cps deg)	FWHM(deg)	Size
27.390(9)	3.2536(10)	457(20)	193(4)	0.341(7)	251(5)
36.073(12)	2.4879(8)	525(21)	233(5)	0.369(9)	236(6)
41.212(17)	2.1887(9)	190(13)	74(3)	0.366(13)	242(9)
43.25(5)	2.090(2)	77(8)	30(2)	0.29(6)	308(62)
44.400(4)	2.03866(17)	1611(37)	666(5)	0.374(3)	239.5(18)
51.801(10)	1.7635(3)	547(21)	236(4)	0.406(7)	227(4)
54.320(15)	1.6875(4)	336(17)	146(4)	0.399(11)	234(6)
62.72(5)	1.4803(11)	148(11)	93(4)	0.41(5)	236(27)
69.90(4)	1.3447(7)	96(9)	135(7)	1.16(6)	87(4)
76.20(4)	1.2484(5)	226(14)	190(5)	0.55(4)	193(13)

Şekil 3'ten elde edilen XRD sonucu ile 550 °C atış biriktirme sıcaklığında biriktirilen NiTi filmlerin yapısının kristal hale geldiği görülmüştür. Daha önce amorf yapıda olan filmlerin B2 austenite kristal yapıya sahip olduğu görülmüştür.

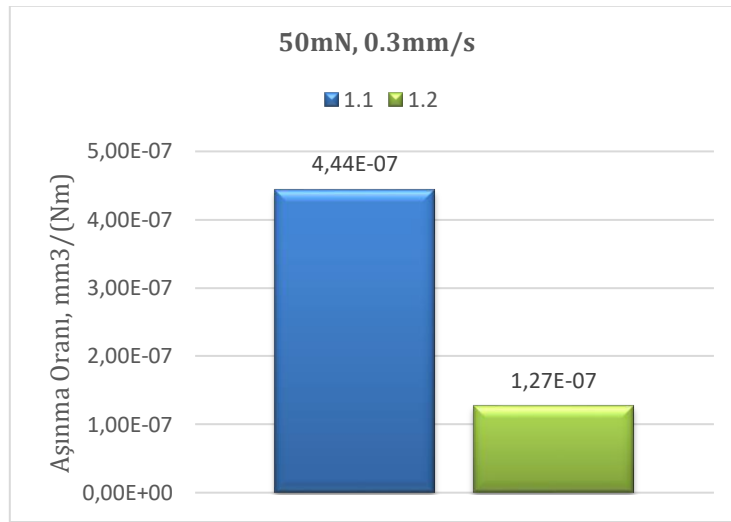
4.3. NiTi Kaplamaların Tribolojik ve Sertlik Bulguları (Tribological and Hardness Findings of NiTi Coatings)

Kaplamalar; Cp-Ti altaşlar üzerinde, RF=250 W saçtırma gücünde kaplanmıştır. Tribolojik testlere, 1.1 kaplama parametrelili oda sıcaklığında biriktirilmiş NiTi kaplama ve 1.2 kaplama parametrelili 550 °C altaş biriktirme sıcaklığında biriktirilmiş NiTi kaplamalar tabii tutulmuştur. Kaplamaların 50 mN yük ve 0.3 mm/s hız altında, sürtünme katsayısı-yol ve aşınma oranları grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Kaplamaların ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Biriktirilen NiTi Kaplamaların Karşılaştırmalı Sürtünme Katsayısı-Yol Grafiği (Comparative Coefficient of Friction-Distance Graphs of NiTi Coatings)

Şekil 4'te 1.1. kaplama parametrelili oda sıcaklığında biriktirilmiş NiTi kaplamadan tribolojik testler neticesinde kararsız bir eğri ile yaklaşık 0.346 sürtünme katsayısı elde edilmiştir. 1.2. kaplama parametrelili 550 °C altaş biriktirme sıcaklığında biriktirilmiş NiTi kaplamanın tribolojik testleri neticesinde yaklaşık 0.140 gibi çok düşük ve kararlı bir sürtünme katsayısı elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5. Biriktirilen NiTi Kaplamaların karşılaştırmalı Aşınma Oranları Grafiği (Comparative Wear Rates Graphs of NiTi Coatings)

Şekil 5'ten 1.1 ve 1.2 kaplama parametrelili NiTi kaplamaların ortalama aşınma oranları sırasıyla $4,44 \times 10^{-7}$ ve $1,27 \times 10^{-7}$ mm³/Nm elde edilmiştir. NiTi kaplamaların Cp-Ti alttaşlar üzerinde RF magnetron saçırma biriktirilmesinde, alttaş biriktirme sıcaklıklarının artmasıyla kaplama sürtünme katsayısı ve aşınma oranının düştüğü grafiklerden belirlenmiştir.

1.1 ve 1.2 kaplama parametrelili filmlerin nanoindentasyon testleri neticesinde sırasıyla filmlerden 9.2 ve 11.4 GPa sertlik değerleri elde edilmiştir. Filmlerden alttaş biriktirme sıcaklığı artışıyla daha sert kaplamalar elde edilmiştir. 1.1. kaplama parametresinde 3.5 µm olan kaplama kalınlığı, 1.2. kaplama parametresinde 4.3 µm'ye yükselmiştir. Dolayısıyla filmlerde alttaş biriktirme sıcaklıkları arttıkça kaplama kalınlıklarının arttığı, kaplama sertliklerinin yükseldiği ve bu da filmlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarına azaltıcı yönde etki ettiği gösterilmiştir.

Tablo 5. NiTi Kaplamaların Tribolojik Test Sonuçları (Tribological Test Results of NiTi Coatings)

Parametre	Kaplama Malzeme	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı mm ³ /(Nm)
1.1.	NiTi (T=Oda)	0.346	4.44×10^{-7}
1.2.	NiTi (T=550 °C)	0.140	1.27×10^{-7}

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada dental ve ortopedik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmekte olan ticari saf titanyum malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla RF magnetron saçırma yöntemi kullanılarak, farklı alttaş biriktirme sıcaklıklarında NiTi kaplamalar ticari saf titanyum alttaşlar üzerinde biriktirilmiştir.

NiTi filmler; ticari saf titanyum üzerinde, (RF=250 W saçırma gücünde, oda sıcaklığı ve 550 °C alttaş biriktirme sıcaklıklarında) olmak üzere iki farklı kaplama parametresinde biriktirilmiştir.

NiTi film kaplanmış ticari saf titanyum malzeme yüzeyinden alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri vasıtasıyla EDS sonuçlarından, malzemenin NiTi film kaplanabildiği kesinleşmiştir. Kaplama yüzey EDS verilerinden yapı içerisine atomik olarak (%40.65 Ti K ve %59.35 Ni K) girdiği görülmüştür.

Filmlerden elde edilen XRD sonucu ile 550 °C alttaş biriktirme sıcaklığında biriktirilen NiTi filmlerin yapısının kristal hale geldiği görülmüştür. Oda sıcaklığında biriktirilen ve amorf yapıda olan NiTi filmlerin yapısının 550 °C'de biriktirilen filmlerde B2 austenite kristal yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Oda sıcaklığı ve 550 °C alttaş biriktirme sıcaklıklarında biriktirilmiş NiTi filmlere; 50 mN yükte tribolojik testler uygulanmıştır. Tribolojik testler sonucunda, en düşük ortalama sürtünme katsayısını (0.140) ve en düşük aşınma oranını (1.27×10^{-7} mm³/Nm) ile 1.2 kaplama parametrelili, T=550 °C alttaş biriktirme sıcaklığında biriktirilmiş filmler göstermiştir. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı (0.346) ve en yüksek aşınma oranı (4.44×10^{-7} mm³/Nm) ile 1.1 kaplama parametrelili oda sıcaklığında biriktirilmiş NiTi filmler göstermiştir. Böylece filmlerin

ticari saf titanyum alt taşlar üzerinde RF magnetron saçırma kaplanması sırasında; filmlere aynı RF saçırma güçleri uygulanırken alt taş biriktirme sıcaklıklarının artırılmasıyla film yapısının amorf kristal yapıya dönüştüğü ve bunun NiTi filmlerde sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarını azaltıcı yönde etki yaptığı gösterilmiştir. Alttaş biriktirme sıcaklığı artışıyla NiTi filmde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı azalmış ve dolayısıyla filmin aşınma oranı da azalmıştır.

1.1. kaplama parametrelili oda sıcaklığında biriktirilmiş 3.5 µm kalınlıklı ve 1.2. kaplama parametrelili 550 °C'de biriktirilmiş 4.3 µm kalınlıklı NiTi filmlerin nanoindentasyon testlerinden sırasıyla 9.2 ve 11.4 GPa sertlik değerleri elde edilmiş olup, kaplama biriktirme sıcaklığı arttıkça kaplamaların kalınlık ve sertlik değerinin yükseldiği gösterilmiştir. Literatürde NiTi filmlerin biriktirilmesi için RF magnetron saçırma tekniği kullanılmış olup, film kalınlığının 0.6 µm'den 1.7 µm'ye artışı ile kaplama sertliğinin 5 GPa'dan 8.2 Pa'a çıktığı gösterilmiştir (Choudhary, 2011).

Literatür araştırmalarında ticari saf titanyum üzerinde biriktirilmiş NiTi filmlerin sürtünme katsayısını azaltmak için genelde farklı oranlarda Ag ilavesi yapılarak sürtünme katsayısı iyileştirmeleri yapılmıştır. Bu çalışmalara alternatif olabilecek çalışmamız; alt taş biriktirme sıcaklıklarının artırılmasıyla da tribolojik iyileştirmenin sağlanabileceğinin gösterilmesi açısından önemlidir. Literatürde 150 W RF saçırma gücünde biriktirilmiş %3 Ag katkılı NiTi filmin ortalama sürtünme katsayısı 0.1 ve aşınma oranı 0.69×10^{-7} mm³/Nm elde edilmişken (Thangavel, 2019), çalışmamızda 250 W RF saçırma gücünde ve 550 °C alttaş biriktirme sıcaklığında elde edilen 0.140 ortalama sürtünme katsayısı ve 1.27×10^{-7} mm³/Nm aşınma oranı literatürle bir uyum olduğunu göstermiştir. Çalışmamız NiTi filmlere Ag ilavesi yerine, alttaş sıcaklık değişimleriyle sürtünme katsayılarının azaltılabilmesi açısından literatüre alternatif oluşturulmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Agins, H.J., Alcock, N.W., Bansal, M., Salvati, E.A., Wilson, P.D., Pellicci, P.M., Bullough, P.G., 1988. Metallic Wear in Failed Titanium-Alloy Total Hip Replacements. A Histological and Quantitative Analysis. *J. Bone Joint Surgery*, 70, 347-356.
- Archard, J.F., 1961. Single Contacts and Multiple Encounters. *J. Appl. Phys.*, 32, 1420-1425.
- Cortada, M., Giner, L., Costa, S., Gil, F.J., Rodriguez, D., Planell, J.A., 2000. Galvanic Corrosion Behavior of Titanium Implants Coupled to Dental Alloys. *J. Materials Science Materials in Medicine*, 11, 287-293.
- Güven, Ş.Y., 2014. Biyouyumluluk ve Biyomalzemelerin Seçimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3), 303-311.
- Choudhary, N., Kharat, D.K., Kaur, D., 2011. Structural, Electrical and Mechanical Properties of Magnetron Sputtered NiTi/PZT/TiO_x Thin Film Heterostructures. *Surface and Coatings Technology*, 205(11), 3387-3396.
- Lausmaa, J., Mattson, L., Rolander, U., Kasemo, B., 1986. Chemical Composition and Morphology of Titanium Surface Oxides. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 55, 351-359.
- Lepule, M., Obadele, B., Andrews, A., Olubambi, P., 2015. Corrosion and Wear Behaviour of ZrO₂ Modified NiTi Coatings on AISI 316 Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology*, 261, 21-27.
- Monteriro, D.R., Gorup, L.F., Takamiya, A.C., Ruvollo, E.R., Camargo, E.R., Barbosa, D.B., 2009. The Growing Importance of Materials that Prevent Microbial Adhesion: Antimicrobial Effect of Medical Devices Containing Silver. *International Journal Antimicrob Agents*, 34, 103-110.
- Poyraz, M., Tunay, R.F., 2016. RF Magnetron Saçırma Tekniği ile AISI 440C Çelik Alttaşlar Üzerine MoS₂ İnce Film Kaplama Uygulaması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(2), 75-84.
- Su, Y.M., Wang, W.P., He, J., 2018. Research and Development of Plasma Physical Vapor Deposition Equipment. *Hot Working Technology*, 47, 21-26.
- Thangavel, E., Dhandapani, V.S., Dharmalingam, K., Marimuthu, M., Veerapandian, M., Kim, S., Kim, B., Ramasundaram, S., Kim, D.E., 2019. RF Magnetron Sputtering Mediated NiTi/Ag Coating on Ti-Alloy Substrate with Enhanced Biocompatibility and Durability. *Materials Science*, 99, 304-314.
- Wang, Y.L., Wan, Y.Z., Tao, H.M., 1998. Bioactive Calcium Phosphate Ceramic Coatings Prepared by Electrodeposition. *Plating and Finishing*, 20, 20-23.
- Ye, Y.Y., 2014. High-End Manufacturing Technology and Life Science Combined with Implantable Medical Instruments Malignant New Trend. *Magnetic Element and Power Supply*, 150-153.
- Zhao, L., Wang, H., Huo, K., Cui, L., Zhang, W., Ni, H., Zhang, Y., Wu, Z., Chu, P., 2011. Antibacterial Nano-Structured Titania Coating Incorporated with Silver Nanoparticles. *Biomaterials*, 32(24), 5706-5716.
- Zhao, L., Chu, P.K., Zhang, Y., Wu, Z., 2009. Antibacterial Coatings on Titanium Implants. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, 91, 470-480.



TOZ AKTİF KARBONUN NİTRİK ASİT VE SÜLFONİK ASİT İLE KİMYASAL MODİFİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU

Betül AYKUT ŞENEL^{1*}, Şehnaz Şule KAPLAN BEKAROĞLU², Nuray ATEŞ³

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Aktif Karbon,
Fonksiyonel Grup,
Karakterizasyon,
Modifikasyon,
Yüzey Kimyası.*

Öz

Kirleticilerin giderimi için adsorpsiyon prosesinde aktif karbon yaygın olarak kullanılan adsorbenttir. Aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini arttırmak için fiziksel, kimyasal ve biyolojik modifikasyonlar yapılmaktadır. Bu çalışmada nitrik asit ve sülfonik asit kullanılarak yapılan kimyasal modifikasyonunun aktif karbonun yapısal ve kimyasal özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Orijinal, nitrik asit ve sülfonik asit ile modifiye edilmiş adsorbentlerinin karakterizasyon analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), brunauer–emmett–teller (BET), fourier transform kızılötesi spektrofotometre (FTIR) analizleri ile belirlenmiştir. Yüzey özelliklerine modifikasyonun etkilerini belirlemek için pH_{pzc} ve yüzey asidik bazik gruplar tespit edilmiştir. Hem nitrik asit hem de sülfonik asit modifikasyonu BET yüzey alanını, por hacmi ve genişliğinde artışa, pH_{pzc} ve yüzey asit gruplarının miktarında ise azalmaya yol açmıştır. Özellikle sülfonik asit ile modifikasyondan sonra yüzey alanı 273,56 m²/g'dan 868,48 m²/g'a toplam gözenek hacmi; 0,22 cm³/g değerinden 0,88 cm³/g değerine artışı önemli bir sonuçtur. Nitrik asit modifikasyonu sonucu –OH, C=O grupları, sülfonik asit modifikasyonu sonucu ise SO₃H, S=O ve C-S fonksiyonel gruplarının yapıya eklendiği gözlenmiştir.

CHEMICAL MODIFICATION AND CHARACTERIZATION OF POWDER ACTIVATED CARBON WITH NITRIC ACID AND SULFONIC ACID

Keywords

*Activated Carbon,
Functional Group,
Characterization,
Modification,
Surface Chemistry.*

Abstract

Activated carbon is a widely used adsorbent in the adsorption process for the removal of toxic pollutants. Physical, chemical and biological modifications are necessary to increase the adsorption capacity of activated carbon. In this study, the effects of chemical modification of activated carbon on its structural and chemical properties were investigated using nitric acid and sulfonic acid. Characterization analysis of original, nitric acid modified and sulfonic acid modified activated carbons, scanning electron microscope (SEM), brunauer–emmett–teller (BET), fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) were determined by their analysis. The effects of modification on surface properties were explained by pH_{pzc} and surface acidic-basic group experiments. Both nitric acid and sulfonic acid modifications led to an increase in BET surface area, pore volume and width, and a decrease in the amount of pH_{pzc} and surface acid groups. Especially in sulfonic acid modification, the total pore volume from 273.56 m²/g to 868.48 m²/g; An increase from 0.22 cm³/g to 0.88 cm³/g is an important result. It was observed that –OH, C=O groups were added as a result of nitric acid modification, and SO₃H, S=O and C-S functional groups were added to the structure as a result of sulfonic acid modification.

Alıntı / Cite

Aykut Şenel, B., Kaplan Bekaroğlu, S.S., Ateş, N., (2022). Toz Aktif Karbonun Nitrik Asit ve Sülfonik Asit İle Kimyasal Modifikasyonu ve Karakterizasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1333-1340

* İlgili yazar / Corresponding author: betulaykut32@gmail.com, +90-246-211-1286

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
B. Aykut Şenel, 0000-0003-3674-5525	Başvuru Tarihi / Submission Date	01.06.2022
Ş.Ş. Kaplan-Bekaroğlu, 0000-0003-0917-7219	Revizyon Tarihi / Revision Date	09.08.2022
N. Ateş, 0000-0002-8923-4852	Kabul Tarihi / Accepted Date	13.08.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Modifikasyon yaklaşımlarıyla adsorbentlerin adsorpsiyon kapasitelerini artırılması son yıllarda önemli bir araştırma konusunu oluşturmuştur. Çeşitli adsorbentler arasında aktif karbon (AK) geniş yüzey alanı, yüzey fonksiyonel grupları, gözenekliliği ve iyi gelişmiş iç por yapısı (mikro, mezo ve makroporlar) gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Mariana vd., 2021; Zhou vd., 2021) Ayrıca, küçük partikül boyutları, maksimum iç yüzey alanı ve aktif serbest değerliklerinden kaynaklanan yüksek adsorpsiyon kapasitesi kirletici gideriminde AK'yı öne çıkaran en önemli özelliktir (Angın vd., 2017). AK, sıvı ve gaz fazlarındaki çeşitli kirleticilerin gideriminde su, atıksu ve gaz arıtım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Heidarinejad vd., 2020). AK (adsorban) ve hedeflenen kirleticiler arasında çekimi geliştirerek daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesiyle sonuçlanan yüzey modifikasyonları gereklidir (Abdulasheed vd., 2018). Modifikasyon ile adsorpsiyon özellikleri üzerinde oldukça etkili olan yüzey fonksiyonel gruplarının miktarı ve çeşitliliği değişmektedir (Demiral vd., 2021).

AK performansını arttırmak amacıyla yüzey fonksiyonel grupları uygun kimyasal işlemlerle modifiye edilebilmektedir (Bhatnagar vd., 2013). Yüzey fonksiyonel gruplarının, AK'nın gözeneklilik ve adsorpsiyon özelliklerini etkilemekte ve adsorpsiyon kapasitesinin artmasında etkili olduğu bilinmektedir. Çeşitli çalışmalarda modifiye edilmiş adsorbanların adsorpsiyon kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı bildirilmiştir (Gupta vd., 2015; Nekouei vd., 2015). Özellikle Ni(II), Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ gibi ağır metallerin (Yu vd., 2013; Ding vd., 2016; Su vd., 2019), doğal organik maddelerin (Cheng vd., 2005; Godini vd., 2011) ve mikrokirleticilerin (Maussavi vd., 2013; Manjunath vd., 2020) gideriminde etkili olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Kimyasal modifikasyon yöntemleri arasında yaygın olarak kullanılan nitrik asit ve yeni bir metot olan sülfonik asit ile modifikasyonun AK yapısına ve dolayısıyla adsorpsiyon kapasitesine etkisinin araştırılması literatüre katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada nitrik asit ve klorosülfonik asit kullanılarak kimyasal modifikasyon yöntemi ile aktif karbonun adsorpsiyon özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır. Modifikasyon amacıyla kullanılan asitlerin yüzey morfolojisi ve kimyası üzerindeki etkisi, çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Modifikasyon işleminden kaynaklanan gözenek yapılarındaki değişiklikler, N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermeleri ve Brunauer-Emmett-Teller (BET) spesifik yüzey alanı teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. Modifikasyonun fonksiyonel gruplar üzerindeki etkisi Boehm titrasyonu ve FTIR analizi ile araştırılmıştır. Orijinal ve modifiye edilmiş aktif karbonun gözenek yapılarındaki değişimler SEM görüntüleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda pH_{pzc} ve yüzey asidik ve bazik grupların miktarlarındaki değişimler belirlenmiştir. Son olarak modifikasyon sonrası adsorbentlerin karakterizasyon sonuçları orijinal AK adsorbenti ile karşılaştırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde AK'nın adsorpsiyon kapasitesini arttırmak için fiziksel, kimyasal ve biyolojik modifikasyon dâhil olmak üzere farklı yöntemler araştırılmıştır (Shafeeyan vd., 2010; Rivera-Utrilla vd., 2011; Xu vd., 2019; Mariana vd., 2021). Fiziksel modifikasyon genellikle aktif karbonun iç ve dış yapısını değiştirirken, kimyasal modifikasyon hem yapısını hem de yüzey özelliklerini değiştirmektedir. Özellikle AK'nın asit, baz ve metal nanopartiküllerle kaplanarak yapılan kimyasal modifikasyonu, adsorpsiyon kapasitesine olumlu etkisinden dolayı öne çıkmaktadır (Sultana vd., 2022). Yüzey kimyasal modifikasyonunun temel amacı, AK yüzey asidik ve bazik özelliklerini değiştirmek, AK'nın adsorpsiyon veya katalitik özelliklere sahip olması için bazı yüzey fonksiyonel grupları yapıya eklemek veya çıkarmaktır (Liu ve Xiao, 2018) . Nitrik asit veya nitrik ve sülfürik asit karışımının, esas olarak karboksilik, lakton ve fenolik hidroksil gruplarını içeren önemli sayıda oksijenli asidik grupların karbon yüzeyine eklenmesini sağlamalarından dolayı çok etkili oksitleyici ajanlar olduğu bildirilmiştir (Shafeeyan vd., 2010).

Nitrik asit ile modifikasyon, gözenek hacmini ve yüzey alanını arttırmakta ve/veya azaltmakta ve yüzeye asit karakteri veren karbonil, karboksil, fenolik ve lakton gruplarının miktarını arttırmaktadır (Cao, 2017; İnal vd., 2020). Yüzeyde bu fonksiyonel grupların artışı adsorbanın elektro-negatifliği arttırmakta, diğer bir deyişle, yüzey polarizasyonu azalmaktadır. Bu duruma bağlı olarak adsorbanın kirleticilere olan ilgisi azalır ve böylece AK adsorpsiyon kapasitesi artar. Modifikasyonda kullanılan saf karbona göre yüzeyde bazik karakter azalırken, yüzeyi daha asidik olan AK'lar üretilmektedir (Demiral vd., 2021). AK yapısına -SO₃H gibi sülfonatlı gruplarının eklenmesi ile yüzey kimyasının değişmesi ve adsorpsiyon kapasitesinin gelişmesinde etkili kuvvetli bir asit olan klorosülfonik asit ile AK modifikasyonu, sadece bir çalışmada (Goswami ve Phukan, 2017) karşımıza çıkan yeni

bir modifikasyon yöntemidir. Bu durum dikkate alındığında yeni bir yöntem olan sülfonik asit ile toz aktif karbon modifikasyonunun adsorbent karakterizasyonuna etkisinin değerlendirilecek olması literatüre yeni bir bakış açısı sunacaktır.

Nitrik asit, sülfonik asit gibi benzer modifikasyon ajanlarının kullanıldığı çeşitli çalışmalarda kimyasal modifikasyonun AK'nın adsorpsiyon kapasitesine etkisinin olumlu olduğu bildirilmiştir. Goswami ve Phukan (2017) sülfonik asit modifikasyonu kullanılarak boya (RhB ve Orange G) giderimini araştırdıkları çalışmada sülfonik asit ile modifiye edilen AK (MTLAC-SA) kullanılarak adsorpsiyon kapasitesinin 318,5 mg/g değerinden 757,6 mg/g değerine arttığını gözlemlemişlerdir. .Boya gideriminin araştırıldığı başka bir çalışmada ise kimyasal modifikasyonun (HCl ile arıtım) metilen mavisi adsorpsiyon kapasitesini %24,24 arttığı bildirilmiştir (Tan vd., 2008).Liu vd. (2007), nitrik asit ile AK modifikasyonu sonucu Cr(VI) adsorpsiyon kapasitesinin 7,61 mg/g'dan 13.74 mg/g'ye yükseldiğini gözlenmiştir. Başka bir çalışmada ise orijinal AK ile bakır iyonunun adsorpsiyon kapasitesinin 24,86 mg/g değerinden nitrik asit ile modifikasyon sonucu 54,74 mg/g değerine artışı önemli bir sonuçtur (Chen vd., 2022).

Hassan vd. (2017) diazinon giderimini araştırdığı çalışmasında demir ile modifiye ettiği Fe-AK'nın adsorpsiyon kapasitesinin modifiye edilmemiş AK'dan üç kat daha (67,3 mg/g AK); 191,1 mg/g (Fe-AK) yüksek olduğunu belirtmiştir. Modifiye edilmiş ve orijinal AK'nın adsorpsiyon kapasitesinin değerlendirildiği bir çalışmada Charleston ve Spartanburg İçme Suyu Arıtma Tesisi çıkış suyunda maksimum adsorpsiyon kapasiteleri ham granüler aktif karbon (GAK) ve amonyak ile modifiye edilmiş AK için sırasıyla 21 mg/g ve 38 mg/g olarak verilmiştir (Cheng vd., 2005). Hümik asit gideriminin araştırıldığı bir çalışmada , demir ile modifikasyon sonucu adsorpsiyon kapasitesinin (60,72 mg/g), modifiye edilmemiş AK'nın adsorpsiyon kapasitesinden (40,56 mg/g) daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Godini vd., 2011). Kimyasal modifikasyon tekniğinin karşılaştırıldığı araştırmada CO₂ ve H₃PO₄ ile modifiye edilmiş AK'ların tek tabakalı adsorpsiyon kapasitesin, optimize edilmiş koşullar altında sırasıyla 110 ve 345 mg/g olarak belirlemiştir. En yüksek BET yüzey alanına sahip H₃PO₄ ile modifiye edilmiş AK için en yüksek metilen mavisi adsorpsiyon kapasitesinin ise 455 mg/g olduğunu bildirmiştir (Reddy vd., 2012).

Kimyasal modifikasyon yönteminde tercih edilen ajanın türü AK performansını ve uygulanabilirliğini kontrol eden önemli bir adımdır. (Heidarinejad vd., 2020). Birçok çalışmada AK yüzeyine çeşitli özelliklerin kazandırılmasında tercih edilen modifikasyon ajanının türü, en iyi AK'nın seçiminde araştırmacılar için oldukça öne çıkan bir konudur (Chen vd., 2003; Li vd., 2016; Bayat vd., 2018). Bu nedenle giderim çalışmaları öncesinde modifiye edilmiş AK seçiminde modifikasyonun ve karakterizasyonun üzerine detaylı bir çalışma yapmak önemlidir. Yapılan literatür araştırmalarında toz aktif karbonun nitrik asit ve sülfonik asit ile modifikasyonunun karşılaştırıldığı güncel bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma ile orjinal ve modifiye edilmiş AK'ların yapısal ve kimyasal karakterizasyonunun belirlenmesi literatüre katkı sunacaktır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Modifikasyon Uygulamaları (Modification Applications)

Modifikasyon çalışmaları için Sigma-Aldrich marka orijinal toz aktif karbon AC Puriss (AK) tercih edilmiştir. AK, nitrik asit ve sülfonik asit ile ayrı ayrı modifikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Modifikasyon amacıyla kullanılan konsantre nitrik asit (özellikler 1,43 g/m³, %65 saflıkta) yüksek saflıktadır ve Merck firmasından tedarik edilmiştir. Klorosülfonik asit ise (özellikler 1,48 g/m³, %99 saflıkta) sigma aldrich'ten satın alınmıştır. Diğer kullanılan yardımcı kimyasallar ise Hidroklorik asit (HCl), Diklorometan (CH₂Cl₂) ve Ethanol'dür. HCl; özgül ağırlığı 1,19 g/m³, %37 saflıktadır, CH₂Cl₂ 1.33 g/cm³ (20 °C) yoğunluğa sahip bir kimyasaldır. Nitrik asit ile modifikasyon için Guha vd. (2007)'nin çalışmasında uyguladığı yöntem modifiye edilerek uygulanmıştır. Nitrik asit modifikasyonu sonucu numune AK-N olarak kodlanmıştır. AK'nın sülfonik asit ile modifikasyonunda ise Goswami vd. (2017)'nin çalışmasında uyguladığı yöntem kullanılmıştır. Modifikasyon sonucunda numune AK-S şeklinde kodlanmıştır.

3.2. Karakterizasyon Analizleri (Characterization Analysis)

Modifikasyon öncesi (orijinal) ve sonrasında elde edilen AK'ların yüzey özellikleri, gözenek boyut dağılımları ve yapısal özellikleri analizler ile belirlenmiştir. AK'ların yüzey kimyası, nötral yük noktası (pHpzc) ile pH denge durumuna ulaştırma metodu ile belirlenmiştir (Karanfil, 1995). Toplam yüzey asidik grupları (NaOH adsorpsiyonu) ve toplam yüzey bazik grupları (HCl adsorpsiyonu), küçük modifikasyonlarla Boehm metodu (alkalimetrik titrasyon) uygulanarak ölçülmüştür. Adsorbentlerin yüzey morfolojisi Zeiss Evo LS10 scanning electron microscope (SEM) ile belirlenmiştir.

Fourier dönüşümü kızılötesi spektrofotometre (FTIR) analizleri ise Perkin Elmer 400 Ft-IR/FT-FIR spektrometresi ile 400 - 4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında ölçülmüştür. Adsorbentlerin yüzey alanları ve toplam gözenek hacimleri micromeritics gemini VII surface area and porosity surface analyzer cihazı ile belirlenmiştir. Adsorbentlerin yüzey alanının belirlenmesinde N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi kullanılmıştır. BET analizleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde hizmet alımı şeklinde yapılmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. Adsorbentlerin Karakterizasyon Analiz Sonuçları (Characterization Analysis Results of Adsorbents)

Modifikasyonun yüzey alanı ve gözenek özelliği üzerinde meydana getirdiği değişiklikleri anlamak için N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi kullanılmıştır. Bu izoterm sonucunda elde edilen BET yüzey alanı, por hacmi ve genişliği Tablo 1'de verilmiştir. Nitrik asit modifikasyonu sonucu BET yüzey alanında, por hacminde ve genişliğinde artış gözlenmiştir. AK-N yüzey alanı 273,56 m^2/g 'dan 822,48 m^2/g 'a; por hacmi ise 0,22 cm^3/g değerinden 0,76 cm^3/g 'a artış göstermiştir. Aguiar vd. (2016) ticari AK'nın nitrik asit ile modifikasyonu sonucu BET yüzey alanında %7,6 toplam por hacminde ise %13 artış gözlemlenmiştir. Su vd. (2019) nitrik asit ile toz AK modifikasyonu sonucu yüzey alanının 682,1 m^2/g değerinden 770,0 m^2/g değerine ve toplam por hacminin 0,372 cm^3/g 'dan 0,429 cm^3/g 'a arttığını ve bu durumun nikel gibi kirleticiler için daha fazla adsorpsiyon alanı sağlayacağını bildirmiştir. Benzer şekilde, modifikasyon sonrası yüzey alanı artışı ile adsorpsiyon alanında ki artışın Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} ve Ni^{2+} gibi ağır metallerin gideriminde etkili olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Yu vd., 2013; Ding vd., 2016). Bayat vd. (2018)'de modifikasyon sonrası daha uygun adsorpsiyon bölgeleri sağlayan spesifik yüzey alanının 1076 m^2/g değerinden, 1434 m^2/g değerine genişlemesinin diazinon gideriminde etkili olduğunu gözlemlenmiştir. Bazı araştırmacılar ise farklı olarak nitrik asit modifikasyonu sonucu porların bloke, tahrip olması sonucu por hacminin ve yüzey alanının azaldığını gözlemlenmişlerdir (Kasnejad vd., 2012; de Oliveira Ferreira vd., 2019).

Tablo 1. Orijinal ve modifiye edilmiş adsorbentlerin por yapı karakterizasyonu (Pore structure characterization of original and modified adsorbents)

Adsorbent	BET Yüzey Alanı (m^2/g)	Toplam Por Hacmi (cm^3/g)	Por Genişliği (nm)
AK	273,56	0,22	3,24
AK-N	822,48	0,76	3,71
AK-S	868,48	0,88	4,18

*Por genişliği: Adsorpsiyon ortalama por genişliğini BET 4V/A noktasını temsil etmektedir.

Sülfonik asit modifikasyonu sonucu ise AK-S adsorbentinin yüzey alanında 273,56 m^2/g 'dan 868,48 m^2/g 'a toplam gözenek hacmi; 0,22 cm^3/g değerinden 0,88 cm^3/g değerine artışı önemli bir sonuçtur. Literatürde sadece Goswami ve Phukan, (2017) klorosülfonik asit ile AK modifikasyonu araştırmış ve BET yüzey alanının ve por hacminin azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Literatürü incelediğimizde sülfonik asit ile AK modifikasyonuna yönelik başka araştırma olmadığı görülmüştür. Bu durum dikkate alındığında AK-S karbonuna ait por yapı sonuçları literatüre yeni veriler sunacaktır. Yüzey alanı ve por hacmine benzer şekilde her iki modifikasyon sonrasında da por genişliğinde artış gözlenmiştir. Özellikle sülfonik asit modifikasyonu sonrası por genişliği 4,18 nm değerine daha yüksek bir artış göstermiştir.

pHpzc; bir adsorbantın net yüzey yükünün sıfır olduğu pH değeri olarak tanımlanmaktadır. Modifikasyona bağlı olarak pHpzc değerlerinin orijinal AK adsorbentinden daha düşük pHpzc değerlerine ulaştığı gözlenmiştir (Tablo 2). AK-S adsorbentine benzer bir azalmayı Goswami ve Phukan, (2017) aktif karbon (MTLAC) ve sülfonik asit modifiye aktif karbon (MTLAC-SA) pHpzc değerleri sırasıyla 5,18 ve 2,4 gözlemlenmiştir. Bu durum asidik özelliklerin AK-N ve AK-S adsorbentlerinde daha baskın olduğunu göstermektedir. pHpzc değerini düşük olması asidik özelliklerin yüksek olması ve daha fazla sayıda zayıf asidik fonksiyonel grup ile ilişkilendirilmiştir (Chingombe vd., 2005). Karboksil, lakton, fenolik hidroksil, kinon ve karboksilik anhidrit grupları, yaygın olarak yüzeyde bulunan oksijen içeren fonksiyonel gruplardır. Oksijen içeriği ne kadar yüksekse yüzeyin o kadar asidik olduğu belirtilmiştir (Gökçe ve Aktaş, 2014). Boehm titrasyonu ile belirlenmiş toplam asidik-bazik gruplar Tablo 2'de verilmiştir.

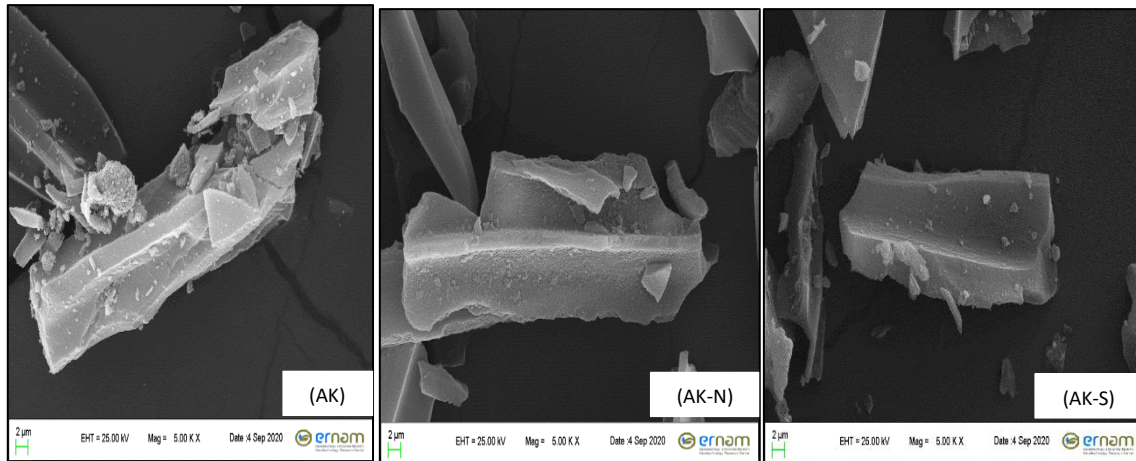
Tablo 2. Adsorbentlerin pH_{pzc} değerleri ve toplam asidik, bazik gruplarının miktarı (pH_{pzc} values of adsorbents and the amount of total acidic and basic groups)

Adsorbent	pH _{pzc}	Toplam Asidik Gruplar		Toplam Bazik Gruplar	
		(meq/g)	(meq/m ²)	(meq/g)	(meq/m ²)
AK	7,09	3,8	0,014	3,90	0,014
AK-N	2,92	4,775	0,006	3,675	0,004
AK-S	2,95	3,900	0,004	3,725	0,004

Boehm titrasyon sonuçları, AK yüzeyinin toplam asitliğinin nitrik asit ve sülfonik asit modifikasyonundan sonra arttığını göstermiştir. Özellikle nitrik asit modifikasyonu sonrası AK-N adsorbentlerinin toplam asit grup miktarı 4,77 meq/g değerine artış gözlenmiştir. Asit fonksiyonel gruplar için literatürde bildirilen sonuçlar incelendiğinde, HNO₃ kullanımının, karboksilik grup oluşumu üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Pietrzak vd., 2009). En belirgin azalma AK adsorbentinde 0,014 meq/m² değerinde AK-S adsorbentinde 0,004 meq/m² değerine ölçülmüştür. Bu durum AK-S adsorbentinin yüzey alanının yüksek olması ile ilişkilidir.

4.2. SEM Analiz Sonuçları (SEM Analysis Results)

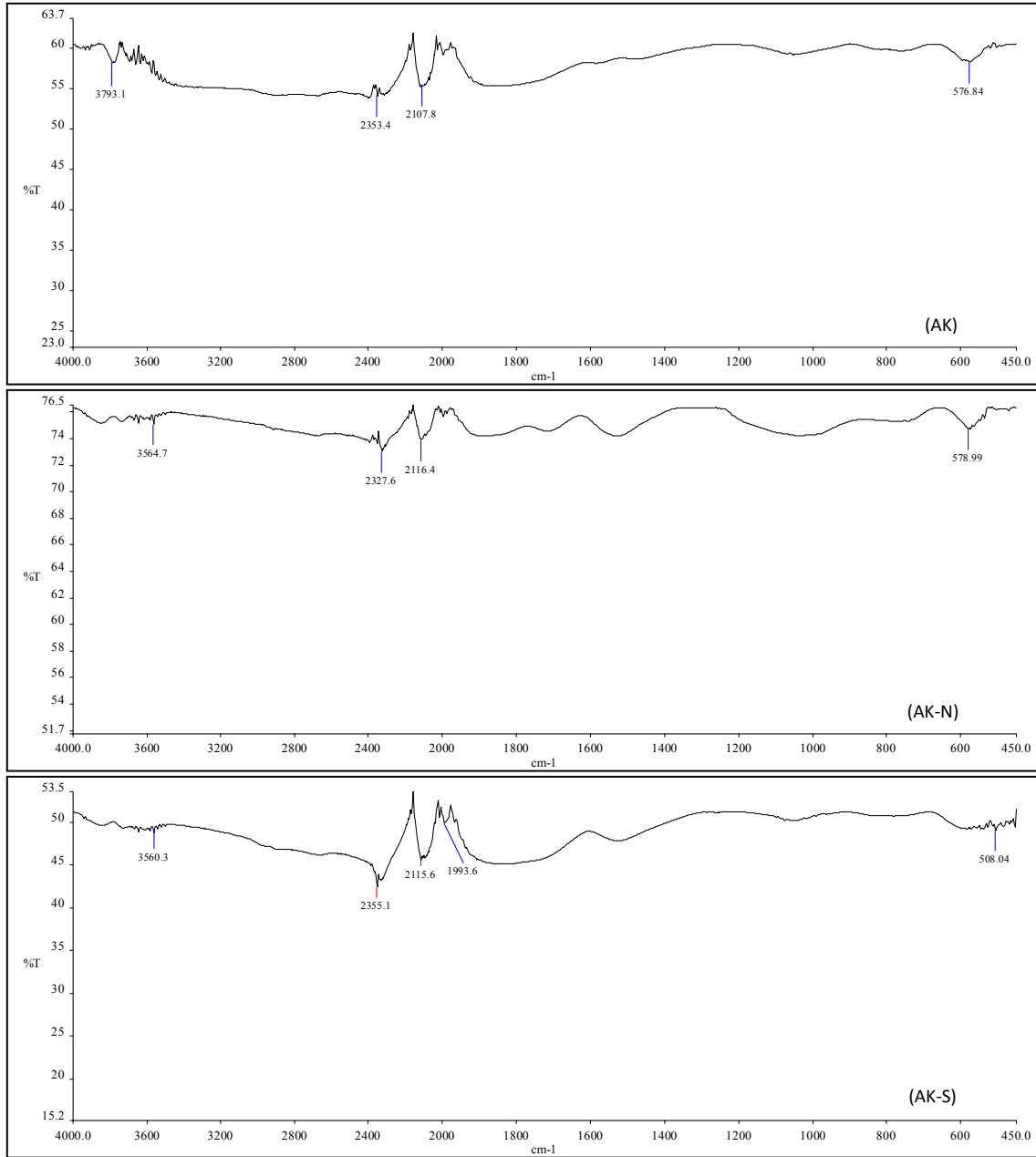
Orijinal AK, nitrik asit ve sülfonik asit ile modifiye edilen numunelerin 2 µm boyutunda 500 KX büyütme ölçeğinde SEM analizi görüntüleri Şekil 1'de sunulmuştur. Orijinal AK ise özelliğiz bir yüzey göstermiş ve yüzeyde belirgin ve düzenli bir gözenek oluşumu fark edilememektedir. Nitrik asit ve Sülfonik modifikasyonu sonrası adsorbentlerin yüzey morfolojisinde minimum farklılıklar vardır. AK-4 ve AK-S orijinal AK ile karşılaştırıldığında modifikasyon sonrası daha temiz ve pürüzsüz bir yapının oluştuğu görülmüştür. Bazı araştırmacılar modifikasyon sonrası adsorbentlerin SEM görüntülerini incelediğinde nitrik asitin adsorbentlerin yüzey morfolojisinde önemli belirgin bir değişiklik yapmadığını bildirmiştir (Chingombe vd., 2005; Yu vd., 2013).



Şekil 1. Orijinal (AK), Nitrik asit ile modifiye edilen (AK-N) ve sülfonik asit ile modifiye edilen (AK-S) adsorbentlerin SEM görüntüleri (SEM images of the original (AK), nitric acid modified (AK-N), and sulfonic acid modified (AK-S) adsorbents)

4.3. FTIR Analizi Sonuçları (FTIR Analysis Results)

Orijinal ve modifiye edilmiş adsorbentlerin FTIR spektrumu Şekil 2'de gösterilmiştir. FTIR spektrumlarında x eksenini cm⁻¹ cinsinden ışının dalga sayısını, y eksenini ise geçen ışının şiddetiyle ilgili olarak %T (% geçirgenlik) değerini ifade etmektedir. Orijinal AK ve modifiye edilmiş AK-N adsorbentlerinin FTIR spektrumunu incelendiğinde 3793 cm⁻¹ bandının kaybolduğunu ve yerine 3564 cm⁻¹ pikinin oluştuğu gözlenmiştir. Yaklaşık 3700-3500 cm⁻¹ deki pikler -OH gruplarından kaynaklanmaktadır (Lüle, 2011; Goswami ve Phukan, 2017). AK, AK-N ve AK-S adsorbentlerine ait FTIR spektrumlarında 2100-2355 cm⁻¹ arasında pikler yer almaktadır. Shamsijazeyi ve Tahereh Kaghazchi, (2010) yaklaşık 2300 cm⁻¹'de yer alan çok zayıf bantların keton gruplarını temsil ettiğini bildirmiştir. Başka bir çalışmada ise 2250-2400 cm⁻¹'deki tepe noktaları çift bağlı C=O gruplarına atfedilmiştir (Chen ve Wu, 2004). Orijinal AK ve AK-N karbonunun FTIR spektrumunda 570-590 cm⁻¹ pikleri yer almaktadır. Literatürde 400-900 cm⁻¹ arasında yer alan piklerin aromatik orta ve zayıf C-C ve C-H gruplarından kaynaklandığı belirtilmiştir (Parlayıcı, 2016).



Şekil 2. Orijinal ve modifiye edilmiş adsorbentlerin FTIR spektrumları (FTIR spectra of the original and modified adsorbents)

Orijinal AK, spektrumunda yer alan 3793 cm^{-1} bandı sülfonik asit ile modifikasyon sonucu AK-S adsorbentinde kaybolmuş ve yerine $3560,3\text{ cm}^{-1}$ bandı oluşmuştur. AK-S adsorbentinin FTIR spektrumunda orijinal AK'dan farklı olarak yapıya $1993,6\text{ cm}^{-1}$ bandının eklendiği görülmüştür. Bu pik, AK yüzeyinin sülfonik gruplarla işlevsel hale getirildiğini gösteren S=O gruplarını ve SO_3H grubunu göstermektedir. Benzer şekilde, Kamari vd. (2019), yaklaşık $1649\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$ arasındaki pikleri sırasıyla S=O grupları ve SO_3H grubunun OH germe absorpsiyonu ile ilişkilendirmiştir. AK-S karbonunun spektrumlarında da yer alan $2115,6\text{ cm}^{-1}$ ve $2355,1\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepe noktaları çift bağlı C=O gruplarının varlığını göstermektedir (Chen ve Whu, 2004). AK - S adsorbentinde $576,84\text{ cm}^{-1}$ pikinin yok olmasıyla $508,04\text{ cm}^{-1}$ oluşmuştur. Düşük frekans aralığındaki, 520 cm^{-1} pikleri literatürde sülfonik asit gruplarının varlığını ifade eden C-S germe bantları ile ilişkilendirilmiştir (Yu vd., 2008).

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Aktif karbonun adsorpsiyon performansını iyileştirmek için fiziksel, kimyasal ve biyolojik teknikleri kullanarak aktif karbonun yüzey özelliklerini değiştirmek üzerine son zamanlarda araştırmalar artmıştır. Çalışmalarda modifiye edilmiş aktif karbonların özellikle toksik kirleticilerin gideriminde yüksek adsorpsiyon kapasiteleri göstermektedir. Asit, baz ve yabancı materyaller ile kaplama gibi arıtım yöntemleri için kimyasal modifikasyon, aktif karbonların yüzey özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Bu çalışmada nitrik asit ve sülfonik asit kullanılarak yapılan kimyasal modifikasyonun aktif karbonun yapısal ve kimyasal özellikleri üzerine etkileri

araştırılmıştır. Orijinal ve modifiye edilen (AK-N, AK-S) adsorbentlerin karakterizasyon analizleri sonucunda her iki kimyasal modifikasyon tekniğinin de aktif karbonların yüzey ve kimyasal özelliklerini değiştirmede etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda hem nitrik asit hem de sülfonik asit modifikasyonu BET yüzey alanını, por hacmi ve genişliğinde artışa, pH_{pzc} ve yüzey asit gruplarının miktarında ise azalmaya yol açmıştır. Özellikle sülfonik asit ile modifikasyondan sonra yüzey alanı 273,56 m²/g'dan 868,48 m²/g'a toplam gözenek hacmi; 0,22 cm³/g değerinden 0,88 cm³/g değerine artışı önemli bir sonuçtur. Modifikasyon sonrası pH_{pzc} değerlerini incelediğimizde asidik özelliklerin baskın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. SEM analizi sonucu aktif karbonların modifikasyon sonrası yüzeylerinin daha temiz ve pürüzsüz yapıda olduğu görülmüştür. Nitrik asit modifikasyonu sonucu -OH, C=O grupları, sülfonik asit modifikasyonu sonucu ise SO₃H, S=O ve C-S fonksiyonel gruplarının yapıya eklendiği gözlenmiştir. Kimyasal modifikasyon tekniği kullanımı ile aktif karbon yüzeyi üzerinde tasarlanan yüzey fonksiyonel gruplarının oluşturulması kirleticilerin adsorpsiyonunda önemli bir konudur.

Literatürü incelediğimizde sülfonik asit ile AK modifikasyonuna yönelik sınırlı sayıda araştırma olduğu görülmüştür. Bu durum dikkate alındığında sülfonik asit ile modifiye edilmiş aktif karbona ait karakterizasyon sonuçları literatüre yeni veriler sunacaktır. İlerleyen çalışmalarda adsorpsiyon özelliklerinin geliştirilerek daha yüksek kirletici arıtımı için kullanılan modifikasyon ajanının öneminin artacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 118Y402 Proje Numarası ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdulrasheed, A. A., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Zaini, M. A. A., Gambo, Y., Ibrahim, M., 2018. Surface modification of activated carbon for adsorption of SO₂ and NOX: A review of existing and emerging Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1067-1085.
- Aguiar, C. R., Fontana, É., Valle, J. A., Souza, A. A., Morgado, A. F., Souza, S. M., 2016. Adsorption of Basic Yellow 28 onto chemically-modified activated carbon: Characterization and adsorption mechanisms. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(5), 947-955.
- Angın, D., Sarikulce, S., 2017. The effect of activation temperature on properties of activated carbon prepared from wine industry pressing waste.
- Bayat, M., Alighardashi, A., Sadeghasadi, A., 2018. Fixed-bed column and batch reactors performance in removal of diazinon pesticide from aqueous solutions by using walnut shell-modified activated carbon. *Environmental Technology & Innovation*, 12, 148-159.
- Cao, Y., 2017. Activated carbon preparation and modification for Adsorption. South Dakota State University.
- Chen, X., Farber, M., Gao, Y., Kulaots, L., Suuberg, E. M., Hurt, R. H., 2003. Mechanisms of surfactant adsorption on non-polar, air-oxidized and ozone-treated carbon surfaces. *Carbon*, 41(8), 1489-1500.
- Chen, J. P., Wu, S., 2004. Acid/base-treated activated carbons: characterization of functional groups and metal adsorptive properties. *Langmuir*, 20(6), 2233-2242.
- Chen, W. S., Chen, Y. C., Lee, C.H., 2022. Modified activated carbon for copper ion removal from aqueous solution. *Processes*, 10(1), 150.
- Cheng, W., Dastgheib, S.A., Karanfil, T., 2005. Adsorption of dissolved natural organic matter by modified activated carbons. *Water Reserach*, 39, 2281-2290.
- Chingombe, P., Saha, B., Wakeman, R. J., 2005. Surface modification and characterisation of a coal-based activated carbon. *Carbon*, 43(15), 3132-3143.
- Ding, Z., Hu, X., Wan, Y., Wang, S., Gao, B., 2016. Removal of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 33, 239-245.
- de Oliveira Ferreira, M. E., Vaz, B. G., Borba, C. E., Alonso, C. G., Ostroski, I. C., 2019. Modified activated carbon as a promising adsorbent for quinoline removal. *Microporous and Mesoporous Materials*, 277, 208-216.
- Demiral, İ., Samdan, C., Demiral, H., 2021. Enrichment of the surface functional groups of activated carbon by modification method. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100873.
- Godini, H., Khorramabady, G.S., Mirhosseini, S.H., 2011. The Application of Iron-Coated Activated Carbon in Humic Acid Removal From Water, 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IACSIT Press, Singapore
- Goswami, M., Phukan, P., 2017. Enhanced adsorption of cationic dyes using sulfonic acid modified activated carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(4), 3508-3517.
- Gökce, Y., Aktas, Z., 2014. Nitric acid modification of activated carbon produced from waste tea and adsorption of methylene blue and phenol. *Applied Surface Science*, 313, 352-359.

- Gupta, V. K., Nayak, A., Agarwal, S., 2015. Bioadsorbents for remediation of heavy metals: current status and their future prospects. *Environmental engineering research*, 20(1), 1-18.
- Hassan, A.F., Elhadidy, H., Abdel-Mohsen, A.M., 2017. Adsorption and photocatalytic detoxification of diazinon using iron and nanotitania modified activated carbons. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 75, 299-306.
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., Sillanpää, M., 2020. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393-415.
- İnal, İ. İ. G., Gökçe, Y., Yağmur, E., Aktaş, Z., 2020. Nitrik asit ile modifiye edilmiş biyokütle temelli aktif karbonun süperkapasitör performansının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1243-1256.
- Kamari, M., Shafiee, S., Salimi, F., Karami, C., 2019. Comparison of modified boehmite nanoplatelets and nanowires for dye removal from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 161, 304-314.
- Kasnejad, M. H., Esfandiari, A., Kaghazchi, T., Asasian, N., 2012. Effect of pre-oxidation for introduction of nitrogen containing functional groups into the structure of activated carbons and its influence on Cu (II) adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(5), 736-740.
- Li, K., Jiang, Y., Wang, X., Bai, D., Li, H., Zheng, Z., 2016. Effect of nitric acid modification on the lead (II) adsorption of mesoporous biochars with different mesopore size distributions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(3), 797-805.
- Liu, M., Xiao, C., 2018. Research progress on modification of activated carbon. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 38, p. 02005). EDP Sciences.
- Liu, S. X., Chen, X., Chen, X. Y., Liu, Z. F., Wang, H.L., 2007. Activated carbon with excellent chromium (VI) adsorption performance prepared by acid-base surface modification. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 315-319.
- Manjunath, S.V., Baghel, R.S., Kumar, M., 2020. Antagonistic and synergistic analysis of antibiotic adsorption on *Prosopis juliflora* activated carbon in multicomponent systems. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122713.
- Mariana, M., HPS, A. K., Mistar, E. M., Yahya, E. B., Alfatah, T., Danish, M., Amayreh, M., 2021. Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102221.
- Maussavi, G., Hosseini, H., Alahabadi, A., 2013. The investigation of diazinon pesticide removal from contaminated water by adsorption onto NH₄Cl-induced activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 214, 172-179.
- Nekouei, F., Nekouei, S., Tyagi, I., Gupta, V. K. 2015. Kinetic, thermodynamic and isotherm studies for acid blue 129 removal from liquids using copper oxide nanoparticle-modified activated carbon as a novel adsorbent. *Journal of Molecular Liquids*, 201, 124-133.
- Parlayıcı, Ş., 2008. Bazı ağır metal iyonlarının uzaklaştırılmasında kullanılacak yeni tabii ve sentetik kompozit adsorbanların geliştirilmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 404s.
- Reddy, K.S.K., Al Shoaibi, A., Srinivasakannan, C., 2012. A comparison of microstructure and adsorption characteristics of activated carbons by CO₂ and H₃PO₄ activation from date palm pits. *N. Carbon Mater.* 27, 344-351.
- Pietrzak, R., Nowicki, P., Wachowska, H., 2009. The influence of oxidation with nitric acid on the preparation and properties of active carbon enriched in nitrogen. *Applied Surface Science*, 255(6), 3586-3593.
- Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Gómez-Serrano, V., Álvarez, P. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Dias, J. M., 2011. Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *Journal of hazardous materials*, 187(1-3), 1-23.
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Houshmand, A., Shamiri, A., 2010. A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide Adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143-151.
- Shamsijazeyi, H., Kaghazchi, T., 2010. Investigation of nitric acid treatment of activated carbon for enhanced aqueous mercury removal. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(5), 852-858.
- Su, P., Zhang, J., Tang, J., Zhang, C., 2019. Preparation of nitric acid modified powder activated carbon to remove trace amount of Ni (II) in aqueous solution. *Water Science and Technology*, 80(1), 86-97.
- Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H., Alam, S. N., 2022. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100382.
- Xu, Y., Luo, G., He, S., Deng, F., Pang, Q., Xu, Y., Yao, H., 2019. Efficient removal of elemental mercury by magnetic chlorinated biochars derived from co-pyrolysis of Fe (NO₃)₃-laden wood and polyvinyl chloride waste. *Fuel*, 239, 982-990.
- Tan, I., Ahmad, A., Hameed, B., 2008. Enhancement of basic dye adsorption uptake from aqueous solutions using chemically modified oil palm shell activated carbon. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 318, 88-96.
- Yu, C., Fan, X., Yu, L., Bandoz, T. J., Zhao, Z., Qiu, J., 2013. Adsorptive removal of thiophenic compounds from oils by activated carbon modified with concentrated nitric acid. *Energy & fuels*, 27(3), 1499-1505.
- Yu, H., Jin, Y., Li, Z., Peng, F., Wang, H., 2008. Synthesis and characterization of sulfonated single-walled carbon nanotubes and their performance as solid acid catalyst. *Journal of Solid State Chemistry*, 181(3), 432-438.
- Zhou, Y., Li, W., Qi, W., Chen, S., Tan, Q., Wei, Z., Gong, L., Chen, J., Zhou, W., 2021. The comprehensive evaluation model and optimization selection of activated carbon in the O₃-BAC treatment process. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101931.



AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN BİR VOLANIN PARAMETRİK OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE TASARIMININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Mehmet Yalçın SIRMALILAR^{1*}, Murat HAKTANIR², Nurşen SAKLAKOĞLU³, Caner EŞ⁴

¹ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Gates Corporation, Gaziemir, İzmir, Türkiye

³ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

⁴ Dönmez Debriyaj, Kemalpaşa, İzmir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Parametrik Optimizasyon,
Sonlu Elemanlar Analizi,
Volan.*

Öz

Otomotiv endüstrisinde rekabetçi olabilmenin anahtarı ürün geliştirmenin ilk aşamalarında üretim maliyetini ve ürün performansını düşünerek daha iyi yapısal tasarımlar elde etmektir. Son yıllarda sonlu eleman analizindeki gelişmeler daha güvenli ve daha ucuz tasarımların oluşturulmasını sağlamış ve bu yeteneği kazanan firmalar önemli avantajlar elde etmiştir. Bu çalışmada Dönmez Debriyaj firmasında seri üretimi yapılan bir volanın malzeme maliyetini azaltmak üzere boyut optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar destekli sonlu elemanlar yöntemi ile volanın çalışma koşulları simüle edilmiş, parametrik optimizasyon yöntemi ile volan için istenen mekanik özellikleri sağlamanın yanı sıra maliyeti en düşük tutacak şekilde optimizasyon yapılmıştır. Bu çalışma sonunda volan ağırlığı 27,956 kg'dan 26,019 kg'a düşürülerek, toplam volan ağırlığından %6,93 azaltma sağlanmıştır ve ilgili volan, analizlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda talaşlı üretim ile revize edilerek üretilmiş ve araç testine tabi tutulmuştur. Bu test sonucunda hiçbir hasarla karşılaşmamıştır.

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF A FLYWHEEL USED IN HEAVY COMMERCIAL VEHICLES BY USING THE PARAMETRIC OPTIMIZATION METHOD

Keywords

*Parametric Optimization,
Finite Element Method,
Flywheel.*

Abstract

The key to being competitive in the automotive industry is to achieve better structural designs by considering production cost and product performance in the early stages of product development. In recent years, developments in finite element analysis have enabled safer and cheaper designs, and companies that have gained this ability have gained significant advantages. In this study, size optimization was carried out in order to reduce the material cost of a mass produced flywheel at Dönmez Clutch. The operating conditions of the flywheel were simulated with the computer-aided finite element method, and the parametric optimization method was used to provide the desired mechanical properties for the flywheel, as well as the optimization to keep the cost lowest. At the end of this study, the flywheel weight was reduced from 27,956 kg to 26,019 kg, and 6.93% reduction was achieved from the total flywheel weight, and the related flywheel was revised by machining in line with the results obtained from the analysis and subjected to vehicle testing. No damage was encountered as a result of this test.

Alıntı / Cite

Sırmalılar, M.Y., Haktanır, M., Saklakoğlu, N., Eş, C., (2022). Ağır Ticari Araçlarda Kullanılan Bir Volanın Parametrik Optimizasyon Yöntemiyle Tasarımının İyileştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1341-1353.

* İlgili yazar / Corresponding author: mehmet_sirmalilar@iyte.edu.tr, +90 232 750 6718

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. Y. Sırmalılar, 0000-0002-0314-0717	Başvuru Tarihi / Submission Date	27.12.2021
M. Haktanır, 0000-0001-6628-0170	Revizyon Tarihi / Revision Date	19.03.2022
N. Saklakoğlu, 0000-0002-6651-7542	Kabul Tarihi / Accepted Date	09.06.2022
C. Eş, 0000-0002-8982-7789	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Mühendislik biliminde optimizasyon önemli bir yer tutmaktadır. Mühendislerin görevlerinden biri de sistemin çalışmasını sağlamanın yanında en uygun koşullarda çalışmasını sağlamaktır. Gerek işverenin yükünü azaltmak, gerekse hammadde kaynaklarından tasarruf etmek için yaptıkları tasarımlarda maliyet, ham madde ve güvenlik etkilerini ortak paydada buluşturmalıdırlar. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan tasarımlar gerçeğe uygun koşullarda analiz edilebilir, böylece olası başarısızlık durumu önceden görülmüş olur. Ayrıca tasarım ve imalat safhalarında bize istediğimiz kadar deneme yapma şansı sunarak maliyet, işçilik ve zaman tasarrufu yapılmasını sağlamaktadır (Güler, 2015). Her tasarımın mekanik özellikleri veya görülmek istenen diğer özellikleri deneyler yerine sonlu elemanlar yöntemi ile çok daha hızlı şekilde görülebilir, olası başarısızlık durumunda tasarıma müdahale edilebilir; böylece olası maddi kayıpların önüne geçilmiş olur.

Mehmet Murat TOPAÇ ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada (Topaç,Bahar, Kaplan, Sarıkaya, 2017) dört tekerlekten çekişli ve iki akslı bir askeri taşıtın bağımsız ön süspansiyonunda kullanılacak alt salıncağın topoloji optimizasyonu yardımıyla yapısal tasarımını gerçekleştirmiştir. Topoloji optimizasyonu çalışmalarından elde edilen sonuçlarla alt salıncağın üretilebilir tasarımı yapılmış ve sonlu elemanlar analizleri ile kritik yük tipi için salıncağın en düşük emniyet katsayısı belirlenmiştir. Elde edilen nihai tasarımda ön tasarıma göre %19,25 hafifletme sağlanmıştır.

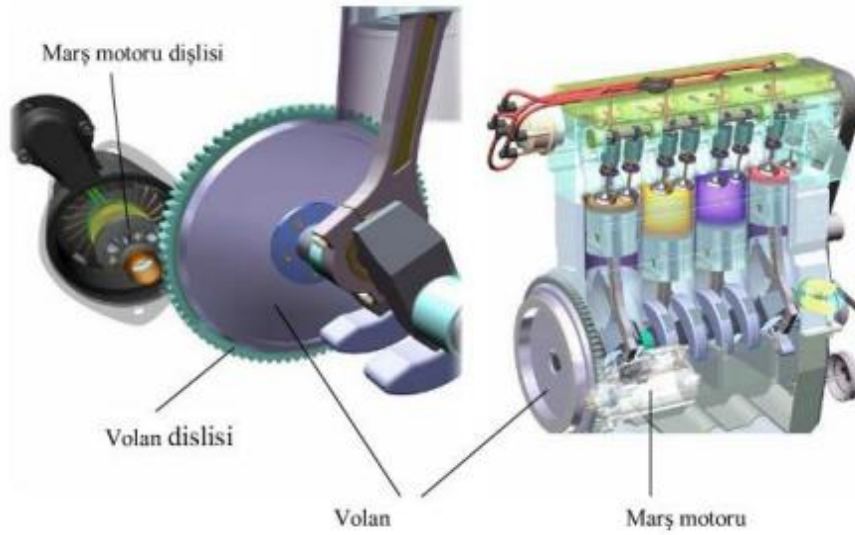
Ali Rıza YILDIZ salıncak kolunun optimum tasarımı için radyal tabanlı fonksiyonlar meta-modelleme yöntemi ve interior arama algoritması kullanmıştır(Yıldız, 2017). Sonlu elemanlar analizleriyle optimum tasarımın ağırlığı % 28 azaltılabilmektedir.

İsmail ÖZTÜRK ve Necmettin KAYA araçlarda güvenlik elemanlarından birisi olan tampon ve darbe emici modeli üzerinde çarpışma analizler yapmış ve darbe emiciler üzerinde burkulma başlatıcı bölgelerin etkisini incelemiştir (Öztürk, Kaya, 2008). Çalışma sonunda, burkulma başlatıcı bölge sayısının absorbe edilen enerji miktarına etkisinin önemsiz mertebelerde olduğu ancak maksimum tepki kuvvetini azalttığı bulunmuştur. Ayrıca düşük araç ağırlıklarına ulaşabilmek üzere optimum sac et kalınlığı belirlenmiştir.

Yunus Güder ve Ali Serhat Ersoyoğlu 100 ton kapasiteli 8x8 mobil vinç için konstrüksiyon tasarımı yapmış ve sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile bu tasarımın statik ve dinamik analizlerini yapmıştır (Güder, Ersoyoğlu, 2015). Analiz sonuçlarına göre tasarımda iyileştirme gerektiren aşamaların model üzerinde uygulanmasına karar verilmiştir.

Görüldüğü gibi, günümüzde sonlu elemanlar yöntemi akışkanlardan yapısal analizlere, ısıl analizlerden manyetizmaya kadar çok geniş bir alanda uygulanmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde tasarım geliştirmede anahtar rol oynamaktadır.

Otomobillerde çok büyük önem taşıyan parçalardan biri volanlardır. Motorların sağladığı döndürme momenti sabit olmamasına rağmen motorlardan sabit döndürme momentleri istenmektedir. Döndürme momentini düzgülendirmek için volan adı verilen silindirik kütle kullanılmaktadır. (Türkmen, 2010,). Dört zamanlı içten yanmalı motorlarda, silindirlerde meydana gelen periyodik patlamalar sonucu krank milinde tork salınımları ve titreşim meydana gelir. Bu salınımlar, motorda üretilen gücün artışı, azalışı oranında değişiklik gösterir. Krank milinde meydana gelen bu hız dalgalanmaları ve titreşimin diğer aktarma organlarına iletilmesi, sürüş konforunu azaltmanın yanında parça ömürlerini hissedilir derecede azaltacaktır. Bunu önlemek için enerji depolama prensibiyle çalışan, ataleti yüksek silindirik bir parça olan volan kullanılmaktadır (Uslugil, 2014). Volanlar sahip oldukları yüksek kütle atalet momenti sayesinde dönerken kinetik enerji depolarlar ve ihtiyaç olduğu zaman sisteme bu enerjeyi verirler. Enerji beslemesine ihtiyaç duyan her mekanik sistemde volan vardır. Volanlar dış makinesinden araba motorlarına kadar birçok sistemde kullanılmaktadır. Araç yeni çalıştırılacağı zaman motorda patlamaların başlayabilmesi için pistonların motor bloğu içinde hareket etmesi gereklidir. Bu hareket pistonlara volanı döndürerek verir. Volan üzerine sıkı geçme ile monte edilen dişli sayesinde marş motoru denilen elektrik motorundan ilk hareketi alır ve pistonlara ilk hareketini vermiş olur. Şekil 1'de marş motoru ve volan görülmektedir.



Şekil 1. Marş motoru ve volan (Starter motor and flywheel) (Türkmen, 2010)

Pistonlar çalışırken krank mili eksantrik bir şekilde dönmektedir. Bu dengesiz dönüş dolayısıyla krank milinde titreşim oluşabilmektedir. Volan, krank mili çapından çok daha büyük olması ve ağır olması sebebiyle krank milinin ürettiği titreşimleri büyük ölçüde dengelemektedir. Bu sayede daha dengeli bir dönüş sağlanır. Teoride bir aracın titreşim karakteristiğini değiştirmeye yol açacak birçok tasarım değişikliği yapılabilir gözükse de, maliyet, dayanım ve bazı diğer kısıtlamalar aslında aktarma organlarının bir çoğunda radikal değişiklikler yapılamayacağını göstermektedir (Uslugil, 2014). Bu çalışmada Dönmez Debriyaj firmasında halihazırda seri üretimi yapılan bir volana, mekanik özellikleri çalışma koşullarını karşılayacak şekilde kütle azaltılarak tasarım iyileştirmesi yapılmıştır. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemi çözücüsü olarak Ansys Workbench programı kullanılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan bir volanın bilgisayar destekli sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon, üzerinde uğraşılacak herhangi bir problem için belirtilen kısıtlamalara uyacak şekilde en iyi çözümü üretme sürecidir (Karakoyun ve Kodaz, 2021).

Optimizasyon yapılırken parametrik optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Parametrik optimizasyonda, analize verilen girdilerin değişiminin çıktıları nasıl etkilediği görülmektedir ve belirlenen kısıtları sağlayan optimum girdi değeri bulunarak yeni tasarım yapılmaktadır. Bu çalışmada ilk önce optimizasyona verilmesi gereken girdiler belirlenmiş ve çeşitli analizler yardımıyla istenilen kısıtlara uygun olarak bu girdilerin optimum değeri bulunmuştur.

2.1. Modelleme ve Değiştirilebilecek Parametreler (Modeling and Modifiable Parameters)

Volanın ağırlığını azaltmak için belirli kesitlerde boyut değişikliği yapılmalıdır. Fakat değiştirilecek kesitler isteğe göre belirlenemez. Volanın dış çap ve iç çapı, baskı ve disk ile bağlantılı olacağından bu boyutları değiştirmek mümkün olmamaktadır. Eğer bu boyutlar değiştirilirse baskı ve disk geometrileri de değiştirilmelidir. Krank miline oturacak kesit hassas olduğundan bu kesitte de değişiklik yapılamayacaktır.

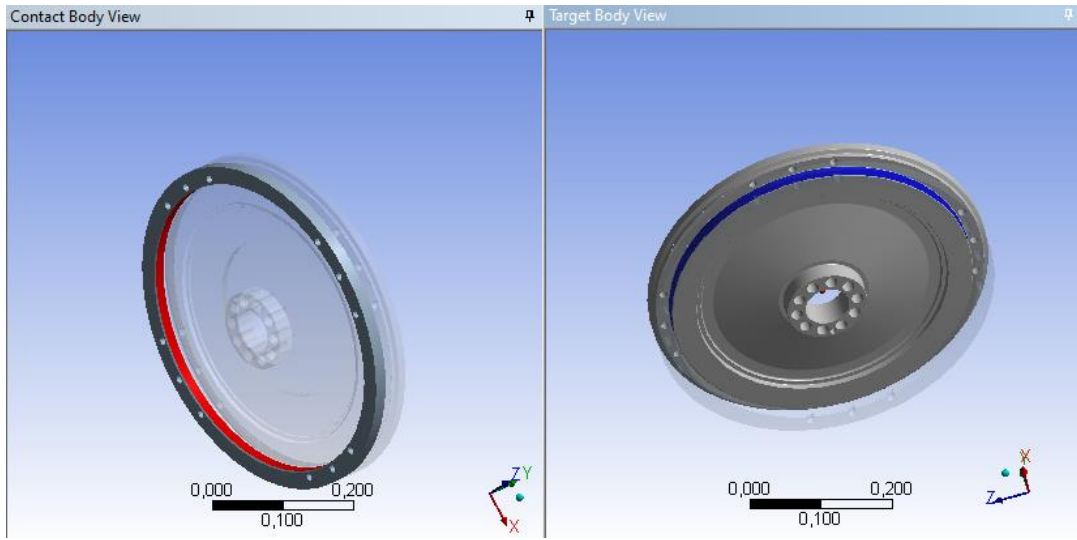
Ağırlık azaltmak için en uygun ölçü, volan kesitinde gözükken Şekil 2'de görülen H62 ile kodlanmış ve sarı renkte gözükken 36,25 mm ölçüsüdür. Bu ölçüyü mümkün olduğunca incelterek dolayısıyla kütleyi düşürerek, hem volanın çalışma koşullarında istenilen mukavemeti göstermeye devam etmesi hem de araç içinde görevini yerine getirmesini sağlamak amaçlanmıştır. Unutulmamalıdır ki volanda ağırlık azaltıldıktan sonra mukavemet açısından bir sorun olmasa da volanın kütle atalet momenti çok düşürülürse volan işlevini kaybedebilir.

üzerinde dişlinin oturacağı çap arasında 0.06 mm fark vardır. Yani volandaki dişlinin oturacağı çap dişlinin iç çapından 0.06 mm daha büyüktür. Bu çap farkı sayesinde dişli ısıtılıp genişince normalde volana oturacağı yüzeyden daha dar bir çap boyutuna sahip olmasına rağmen volana geçecek çap boyutuna ulaşmakta ve soğuyunca da büzüşmektedir, Bu sayede sıkı geçme bağlantısı yapılabilir.

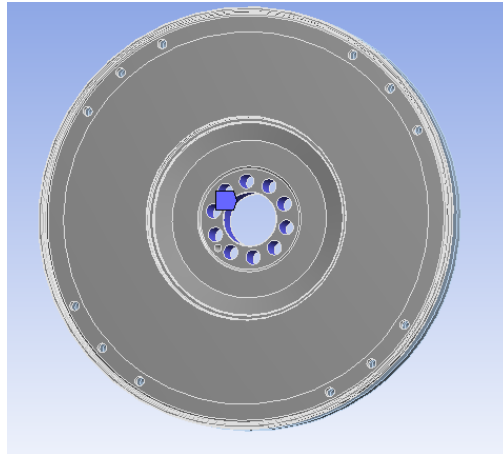
Büyük geometriler içeren ve birden fazla adım içeren analizlerin çözümü çok uzun sürmektedir. Bu projedeki analizde 6 adım olduğu ve ek olarak parametrik analiz dolayısıyla her ölçü değişikliği için ayrı analiz yapılacağı düşünülürse modeli biraz basitleştirmek gereklidir. Bu yüzden volan üzerine sıkı geçme yapılacak dişlide model basitleştirilmiştir. Dişlinin kalınlığı, diş üstü çapı ve geçme çapı değiştirilmemiştir fakat dişli üzerinde 160 tane diş açılmayarak model basitleştirilmiştir.

2.2. Sınır Şartları ve Kontaklar (Boundary Conditions and Contacts)

Analizde volan ve dişli arasına 1 adet kontak tanımlanmıştır. Kontak olarak tanımlanan yüzeyler Şekil 5'te gösterilmiştir. İlgili kontak "frictionless" yani sürtünmesiz kontak olarak seçilmiştir. Bu kontaklar birbirleri üzerinde kayma ve ayrılmaya izin vererek gerçeğe yakın sonuçlar vermektedirler. Volan, gerçekte olduğu gibi krank miline oturacağı yüzeylerden sabitlenmiştir. Sabitlenen yüzeyler Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 5. Sıkı geçme için yapılan kontak(Contact made for Shrink fit)



Şekil 6. Volanda sabitlenen yüzeyler (Surfaces fixed to the flywheel)

2.3. Yapılacak Analizlerin Belirlenmesi (Determination of Analyses to be Made)

Volan üzerinde optimizasyon yapmadan önce volanın çalışma koşulları simüle edilip volan üzerindeki etkilere bakmak gerekmektedir.

Volan üzerinde, üzerine sıkı geçirilen dişliden dolayı oluşan gerilme vardır. Üzerinde bu gerilme varken sürücü gaza bastığında krank mili ile birlikte volanda dönecektir. Daha sonra debriyaj kavrama durumuna getirildiğinde

volan üzerine debriyaj baskısından gelen kuvvet iletilecektir. En son adımda volan belirli bir devirde dönerken aracın kavramadan çıkmış halini de kontrol etmek için üzerindeki baskı kuvveti çekilecektir. Bu çalışma kapsamında bu adımlar incelenmiş ve volanın mukavemet açısından araç içindeki durumu değerlendirilmiştir.

Makine elemanlarında hasar her zaman düşük mukavemet kaynaklı olmamaktadır. Eğer parçanın doğal frekansı ile tahrik frekansı çakışırsa teorik olarak deplasman genliği sonsuza gitmekte, gerçekte ise sönümden dolayı genlikler sonsuza gitmese de çok büyük deplasmanlar oluşmaktadır(Ewins,2010). Bu sebeple volanın optimize edildikten sonra rezonansa girmeyeceğinden emin olmak için modal analiz ile doğal frekanslarına bakılmıştır. Bu sebeple ilk olarak mevcut volanın gerilme analizi yapıp ondan sonra optimizasyon yapılmıştır. Optimize edilen volan tekrar gerilme analizine tabi tutularak kontrol edilmiş ve en son modal analiz ile doğal frekansları incelenmiştir.

3. Gerilme Analizi (Stress Analysis)

Volan araç içinde kavrama halinde çalışırken şu zorlamalara maruz kalmaktadır; volan üzerine marş motorundan ilk hareketi alabilmesi için dişli çakılmaktadır ve bu dişli volan üzerinde çok ciddi bir gerilme oluşturmaktadır. Üzerinde sıkı geçme kaynaklı gerilme varken volana debriyaj kaynaklı baskı kuvveti etki etmektedir. Ayrıca volan 4000 devir/dakika açılmal hızla dönmektedir. Son olarak araç kavrama halinde değilken olan durumu da simüle etmek için son adımda baskı kuvveti volan üzerinden çekilmiştir. Gerilme analizinde bütün bu etkiler toplam 6 adımda programa tanıtılmıştır.

Sıkı geçme analizi yapılırken volan dişlisinin sıcaklığı 22 °C'den 220 °C'ye yükseltip genişletilmiştir, volan dişlisi 220 °C sıcaklığındaiken yani çapı volana geçme çapından büyükken volan üzerine konumlandırılmak üzere hareket verilmiştir. Dişli, volan üzerine geldikten sonra volan dişlisi 22 °C'ye soğutulmuştur ve analiz boyunca bu sıcaklıkta kalmıştır. Dişlinin iç çapı ile volan geçme çapı arasında 0.06 mm fark olduğu için dişli soğuduktan sonra eski çapına geri dönme eğiliminde olacaktır ama dönemeyecektir. Bu sebeple volan üzerinde gerilmeler oluşacaktır. Tablo 1'de volan dişlisinin analiz süresince olan sıcaklığı, Tablo 2'de ise volan dişlisinin analiz boyunca olan konumları görülmektedir. Tablodan görüldüğü üzere dişli 22 °C'ye soğuduktan sonra analiz boyunca volan üzerinde kalmıştır. Dolayısıyla gerçekte olduğu gibi analiz boyunca volan üzerinde sıkı geçme kaynaklı gerilme olacaktır.

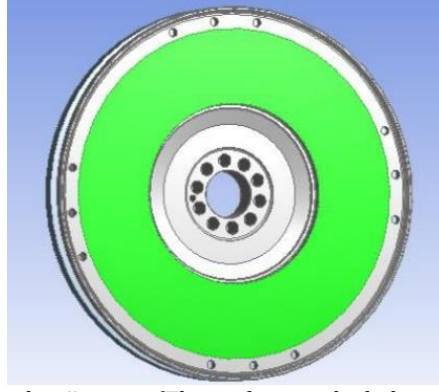
Tablo 1. Volan dişlisinin analiz süresince sıcaklığı (Temperature of flywheel gear during analysis)

Analiz Süresi (s)	Dişlinin Sıcaklığı (°C)
0	22
1	220
2	220
3	22
4	22
5	22
6	22

Tablo 2. Volan dişlisinin analiz süresince konumu (The position of the flywheel gear during the analysis)

Analiz süresi(s)	Dişlinin Konumu (mm)
0	0
1	0
2	18,55
3	18,55
4	18,55
5	18,55
6	18,55

Sıkı geçme işlemi tamamlandıktan sonra volan üzerine debriyaj baskısından gelen kuvvet tanıtılmıştır. Volan üzerinde baskı kuvvetinin etkiyeceği 430 mm çapında yüzey, geometriyi hazırlarken "split face" komutu ile ayrılmıştır. Şekil 7'de bu yüzey görülmektedir. Baskı kuvveti olarak 40000 N kuvvet uygulanmıştır. Tablo 3'te baskı kuvvetinin analiz süresince değeri görülmektedir.



Şekil 7. Baskı kuvvetinin verileceği yüzey (The surface to which the pressing force will be applied)

Tablo 3. Analiz süresince debriyaj baskısından gelen kuvvet
(Force from clutch pressure during analysis)

Analiz süresi (s)	Baskı kuvveti (N)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	-40000
5	-40000
6	0

Baskı kuvveti geldikten sonra volan 4000 devir/dakika hızla dönecektir. Üzerindeki dişli bu adımda volana kenetlenmiş halde olacağı için 4000 devir/dakika hız hem dişli hem volana verilmiştir. Tablo 4'te volan ve dişliye verilen açısız hızın analiz adımlarına göre değeri görülmektedir.

Tablo 4. Volan ve dişliye verilen açısız hızın analiz süresince değeri
(The value of the angular velocity given to the flywheel and gear during the analysis)

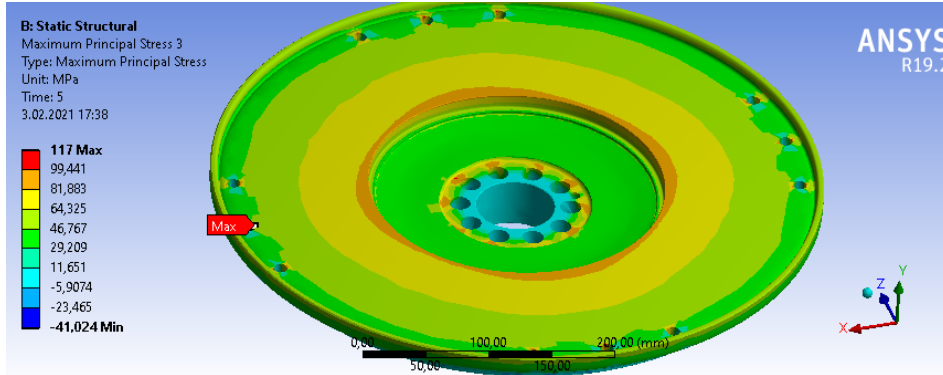
Analiz süresi(s)	Açısız hız (rpm)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	4000
6	4000

Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta, volan her zaman debriyaj kavrama halindeyken çalışmayacaktır. Sürücü debriyaj pedalına bastığında volan üzerine etkiyen baskı kuvveti sıfırlanacaktır. Bu senaryo analize son adımda dahil edilmiştir. Üzerinde sıkı geçme kaynaklı gerilme ve açısız hız varken baskı kuvveti Tablo 3'ten görüleceği üzere 0 yapılmıştır. Dolayısıyla son adım aracın kavramadan çıktığı hali göstermektedir.

Tablo 5'te volan üzerinde oluşan maksimum asal gerilmenin analiz adımlarına göre değerleri görülmektedir. Tablo incelenirse, 3.saniyede sıkı geçme tamamlandığında volan üzerinde 77,412 MPa gerilme oluşmuştur. Baskı kuvvetini verdikten sonra bu gerilme değeri 59,994 MPa olmuştur. Volan 4000 devir/dakika açısız hız ile dönmeye başladığında 117 MPa ile en yüksek gerilme volan üzerinde oluşmuştur. Debriyaj baskısı volan üzerinden çekildikten sonra gerilme değeri 85,258 MPa olmuştur. En yüksek gerilme değeri araç kavrama halinde ve 4000 devir/dakika hızla dönerken çıkmıştır. Şekil 8'de volanda oluşan en büyük asal gerilmenin yeri ve asal gerilme dağılımı görülmektedir.

Tablo 5. Volanda oluşan asal gerilmelerin analiz adımlarına göre değeri
(The value of the principal stresses in the flywheel according to the analysis steps)

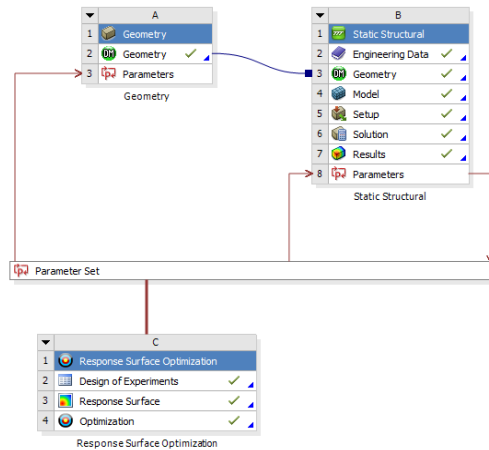
Zaman (s)	Maksimum asal gerilme (MPa)	Minimum asal gerilme (MPa)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	77,412	-30,338
4	59,994	-32,588
5	117	-41,024
6	85,258	-27,4



Şekil 8. Analiz süresince volanda oluşan en büyük asal gerilmenin yeri (The location of the greatest principal stress on the flywheel during the analysis)

4. Parametrik Optimizasyon (Parametric Optimization)

Yapılan gerilme analizine optimizasyon modülü bağlanmıştır. Optimizasyonda değişecek ölçüye göre maksimum asal gerilme, kütle ve dönme eksenine göre kütle atalet momenti değişimleri görülmek istendiği için bu özellikler parametre olarak eklenmiştir. Şekil 9'da optimizasyon modülünün yapılan analize bağlanması görülmektedir.



Şekil 9. Optimizasyon modülünün analize bağlanması (Connecting the optimization module to the analysis)

Design of Experiments modülünden orijinal ölçüsü 36,25 mm olan değiştirilecek kesit için alt sınır olarak 2 mm, üst sınır olarak 32 mm seçilmiştir. Böylece program bu değerler arasında değişik değerler seçerek analizleri yapacaktır.

4.1. Optimizasyon Kısıtlarının Belirlenmesi ve Optimizasyon Sonucu (Determination of Optimization Constraints and Optimization Result)

Pistonlar alt ölü noktadan üst ölü noktaya çıkmak için enerji beslemesine ihtiyaç duyarlar. Ayrıca düzgün olmayan motor torkunu düzgünleştirmek için volanın belirli bir kütle atalet momentine sahip olması gerekmektedir (Riberio vd., 2001). Tablo 7'de analiz için modellenen ve Ansys kütüphanesinden gri dökme demir malzemesi atanan mevcut volanın fiziksel özellikleri görülmektedir.

Tablo 6. Analiz için modellenen volanın fiziksel özellikleri
(Physical properties of the flywheel modeled for analysis)

Volanın ağırlığı (kg)	27,956
Volanın hacmi (mm ³)	3,8827 x 10 ⁶
Volanın dönme eksenine göre kütle atalet momenti (kg.mm ²)	8,1315 x 10 ⁵

Optimizasyon işlemi yapılırken volanın kütle atalet momenti için bir alt sınır belirlemek gereklidir. Tablo 7’de görüleceği üzere volanın kütle atalet momenti 8,1315 x 10⁵ kg.mm² olarak bulunmuştur. Burada şöyle bir yaklaşım yapılabilir; motorlar için volan tasarımı yapılırken motorların tork – krank açısı grafiklerinden motora eklenmesi gereken kütle atalet momenti bulunur ve volan bu kütle atalet momentini karşılayacak şekilde geometrisi veya malzemesi değiştirilerek (dolayısıyla özkütlesi de değişir) tasarlanır.

Bu çalışma da volan üzerinde %10’luk bir kütle atalet momenti kaybına taviz verilebileceğine karar verilmiştir.

Volanın sahip olduğu kütle atalet momenti Tablo 7’de 8,1315 x 10⁵ kg.mm² olarak verilmiştir. %10 kayıp miktarı göz önüne alınarak volan için gerekli minimum atalet momenti 7,31835 x 10⁵ kg.mm² olarak belirlenebilir. Yani volanın bu kütle atalet momenti değerinin altına düşmemesi gereklidir. Bu çalışmada daha da güvenli bölgede kalınarak bu sınır 7,38 x 10⁵ kg.mm² alt sınır olarak programa tanıtılmıştır.

Volan GG25 gri dökme demir malzemeden üretilmektedir. Kopma mukavemeti 250 MPa’dır. Gri dökme demir gevrek bir malzemedir (Akdemir vd., 2011). Gevrek malzemelerde kırılma olmadan önce plastik deformasyon olmaz veya çok küçük olur. (Mouritz, 2012). Dökme demir gevrek malzeme olduğu için akma mukavemeti değil kopma mukavemeti üzerinden değerlendirilmiştir. Firmada kullanılan GG25 gri dökme demirin kopma mukavemeti 250 MPa’dır. Dolayısıyla volan güvenli bölgede kalınarak 150 MPa maksimum asal gerilme sınırı belirlenmiştir. Optimizasyon modülüne maksimum 150 MPa maksimum asal gerilme sınırı konulması gerekmektedir. Bahsedilen bu kısıtların programa tanıtılması Tablo 8’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Tasarım kısıtlamalarının optimizasyon modülüne tanıtılması
(Introducing design constraints to the optimization module)

1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Minimize P2	P2 - Solid Mass	Minimize		No Constraint		
4	P5 >= 7,38E+05	P5 - Solid Moment of Inertia Ip2	No Objective		Values >= Lower Bound	7,38E+05	
5	P7 <= 150 MPa	P7 - Maximum Principal Stress 2 Maximum Value Over Time	No Objective		Values <= Upper Bound		150
*		Select a Parameter					

Optimizasyon modülünün verdiği sonuçlara göre belirtilen kısıtları ve istenilen özellikleri karşılayan kesit ölçüsünün 4,77 mm olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon sonucu önerilen kesit ölçüleri Tablo 9’da gösterilmektedir.

Tablo 8. Optimizasyon sonucu programın önerdiği kesit ölçüleri
(Dimensions suggested by the program as a result of the optimization)

9	Candidate Points	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
10				
11	P1 - kalınlık (mm)	4,77	4,7777	4,7869
12	P2 - Solid Mass (kg)	★★★ 26,004	★★★ 26,004	★★★ 26,005
13	P7 - Maximum Principal Stress 2 Maximum Value Over Time (MPa)	★★★ 126,76	★★★ 126,75	★★★ 126,75
14	P5 - Solid Moment of Inertia Ip2	★★★ 7,38E+05	★★★ 7,3802E+05	★★★ 7,3805E+05

Bu değer üretiminin daha kolay olması açısından 5 mm olarak kabul edilmiştir

5. Modal Analiz (Modal Analysis)

Volan yapılan analizler sonucu güvenli bölgede çıkmıştır. Fakat dönen kütleler için rezonans tehlikesi bulunmaktadır (Svendsen vd., 2011). Doğal frekans, bir sistemdeki belirli frekansların diğer frekanslara kıyasla sistemi daha büyük genliklerle titreten frekans aralığıdır. Bu titreşimler sonucu ortaya çıkan fiziksel olaya ise rezonans adı verilir. Rezonans frekansında çok küçük tetiklemelerde bile sistem çok büyük salınımlar yapabilmektedir. (Yalnızca vd., 2014). Bu sebeple optimize edilen volan için modal analiz yapmak ve rezonansa girmeyeceğinden emin olmak gerekmektedir.

Volanda 5 mm değerine düşürülmesine karar verilen kesit Design Modeler modülü ile istenilen değere düşürülmüştür. Volan krank miline oturacağı yüzeylerden sabitlenerek programa tanıtılmıştır ve üzerindeki dişliyle beraber modal analize tabi tutulmuştur. Modal analiz sonucu bulunan ilk 6 doğal frekans Tablo 10'da görülmektedir.

En düşük doğal frekans 259,4 Hz yani 15564 devir/dakika bulunmuştur. Bu devir volanın çalışma devrinden çok daha fazladır. Dolayısıyla volanda rezonans kaynaklı bir sorun olmayacağı söylenebilir.

Tablo 9. Modal analiz sonucu bulunan volanın ilk 6 doğal frekansı
(The first 6 natural frequencies of the flywheel found as a result of the modal analysis)

Mod sayısı	Doğal frekans (Hz)
1	259,4
2	260,22
3	391,95
4	434,08
5	435,98
6	812,11

6. Yeni Tasarımın İşlenmesi Ve Deney Süreci (Processing and Experimentation)

Analizler sonucunda belirlenen ölçünün 36,25 mm'den 5 mm'ye düşmesine karar verilmiştir. Volan üzerinde bu kesitten 31,25 mm talaş alınması gerekmektedir. Freze ile talaş alınmıştır. Şekil 10'da volanın optimizasyon öncesi hali, Şekil 11'de ise optimizasyon sonuçlarına göre kesitinin düşürülmüş hali görülmektedir.

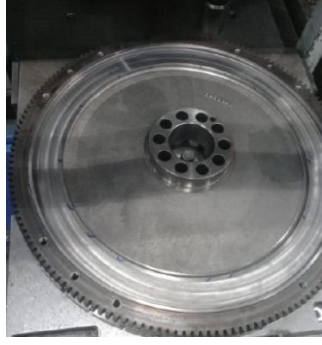


Şekil 10. Volanın işlenmeden önceki hali (The state of the flywheel before processing)



Şekil 11. Volanın işlendikten sonraki hali (The state of the flywheel after processing)

Analizlerden görüleceği üzere volan üzerinde sıkı geçme işlemi sonrası çok ciddi gerilmeler oluşmaktadır. Volan üzerine bu dişli gerçekte de sıkı geçme ile monte edilerek volanın durumu incelenmiştir. Şekil 12'de dişli çakıldıktan sonra volan görülmektedir.

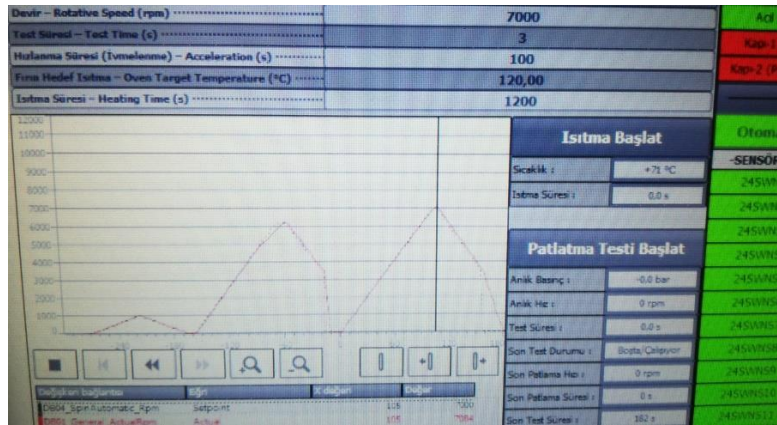


Şekil 12. Sıkı geçme işlemi sonrası volan ve dişli (Flywheel and gear after shrink fit)

Diğer volanlara uygulanan ölçüm prosedürleri bu volana da uygulanmış ve sıkı geçme işlemi sonrası volanda oluşan 0,1 mm çap daralmasının diğer volanlar ile aynı olduğu görülmüştür. Sıkı geçme sonrası volan üzerinde hasar oluşmadığı gözlenmiştir. Dönen kütlelerin yüksek devirlerde hasar alıp almayacağına bakmak için burst(patlatma) testi yapılmaktadır. Volan burst testi makinesine bağlanmıştır(Şekil 13) ve 7000 devir/dakika'ya kadar zorlanmıştır(Şekil 14).



Şekil 13. Volanın burst testi makinesine bağlanması(Connecting the flywheel to the burst testing machine.)



Şekil 14. Burst testi grafiği(Burst test chart)

Sıkı geçme ve burst testi sonrası hasar almayan volan son test aşaması olarak iki hafta boyunca araç testine tabi tutulmuştur. Araç olarak Mercedes Benz Axor kullanılmıştır. Bu testte volan, araca takılıp, araç günlük rutinine devam etmiştir. İki hafta sonunda araç kullanıcılarından çeşitli kriterleri değerlendirmesi istenmiştir. Araç testinde dikkat edilen kriterler Tablo 11'de gösterilmiştir. Araç testinde de herhangi bir sorunla karşılaşılmemiştir. Böylece optimizasyon sonucu ortaya çıkan tasarım doğrulanmıştır.

Tablo 10. Araç testinde dikkat edilen parametreler (Parameters considered in vehicle testing)

Araç Testi ve Sonrası Kontroller					
Kalkış performansı uygun mu?	✓	Yokuşta kalkış performansı uygun mu?	✓		
Vites geçişleri uygun mu?	✓	Yokuşta kaydırmama performansı uygun mu?	✓		
Debriyaj pedali konforlu mu?	✓	Araçta titreme - silkeleme var mı?	✓		
Debriyaj kavrama yeri uygun mu?	✓	Araçta anormal ses var mı?	✓		
Açıklamalar / Görüşler	Herhangi bir problemle karşılaşılmadı.				
✓ : Uygun		X : Uygun Değil		- : Değerlendirme Dışı	

7. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Tasarım boyutlarında olası her değişiklik için üretilmesi planlanan parça, CAD programlarında değiştirilip her seferinde yeni model olarak analize sokulursa ciddi bir zaman kaybı olmaktadır. Parametrik optimizasyon yöntemi ile tek CAD çizimiyle ve tek komutla olası değiştirilecek kesitler parametre olarak programa tanıtılarak her boyut değişikliği için zaman kaybı minimuma indirilerek analiz yapılabilmektedir.

Bu çalışmada hedeflendiği gibi seri üretimde olan bir volanın ağırlığı, bilgisayar destekli mühendislik yöntemlerinden yararlanılarak 1937 gr yani volan ağırlığının %6,93'ü oranında azaltılmıştır. Ağırlık azaltılmasının yanı sıra istenilen mekanik özellikler de sağlanmaktadır. Optimize edilen volan yukarıdaki bölümlerde gösterildiği gibi üzerinde büyük gerilmeler oluşturacak olan sıkı geçme testinden başarıyla geçmiştir. Sıkı geçme testini başarıyla geçen volan, yüksek devirde zarar görmeyeceğinden emin olmak amaçlı firmada bulunan burst testi makinesinde 7000 devir/dakika açısız hızlara kadar zorlanmıştır. Sürüş performansında da bir olumsuzluk olmayacağını teyit etmek amaçlı ağır ticari araca monte edilip denenmiştir. Araç testinde de 2 hafta boyunca çalışma koşullarına maruz bırakılan volan, bu testi de başarıyla geçmiştir. Bu test sayesinde volanda yapılan revizyonun sürüş performansına olumsuz bir etki oluşturmadığı doğrulanmıştır. Yapılan çalışma sonrası firma, optimize edilmiş tasarımı kullanma kararı almıştır. Firma, optimizasyonu yapılan volandan 2021 yılında 880 adet üretmiştir. Bu çalışma sayesinde her üretilen volan başına 1937 gr dökme demirden tasarruf edilmiştir. Dolayısıyla 2021 yılının üretim rakamları baz alınır firmaya yılda yaklaşık 1.7 ton dökme demirden tasarruf edecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Dönmez Derbiyaj firmasında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya yaptıkları katkılardan dolayı bu firmanın Ar-Ge Merkezi'ne teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akdemir, Ahmet, Recai Kuş, and Mehmet Şimşir. "Investigation of the tensile properties of continuous steel wire-reinforced gray cast iron composite." *Materials Science and Engineering: A* 528.10-11 (2011): 3897-3904.
- Ewins, D. J. "Control of vibration and resonance in aero engines and rotating machinery—An overview." *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 87.9 (2010): 504-510. -2.3 kaynağı
- Güder Y., Ersoyoğlu A. S., "Mobil Vinçlerde Teleskobik Bomların Optimizasyonu", S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.3, s.1, 2015
- Güler M.S., "Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler" Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg., Cilt:5, s.56-66 (2015)
- Karakoyun, M., & Kodaz, H. (2021). Çok Amaçlı Mühendislik Tasarımı Ve Kısıtlı Problemler İçin Hibrit Birçok Amaçlı Optimizasyon Algoritması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1200-1211.
- Mehmet Murat TOPAÇ, Egemen BAHAR, Ata KAPLAN, Ezgi Zeynep SARIKAYA, Topoloji Optimizasyonu Yardımıyla, Askeri Taşıt Bağımsız Ön Süspansiyonu için Alt Salıncak Tasarımı, Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumunun (IDEFIS 2017)
- Mouritz, A. P. Fracture Processes of Aerospace Materials. *Introduction to Aerospace Materials*, 428-453. (2012)
- Öztürk İ, Kaya N., "Otomobil Ön Tampon Çarpışma Analizi Ve Optimizasyonu", Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 13, Sayı 1, 2008 119
- Ribeiro, Paulo F., et al. "Energy storage systems for advanced power applications." *Proceedings of the IEEE* 89.12 (2001): 1744-1756.
- Svendsen, Martin Nymann, Steen Krenk, and Jan Høgsberg. "Resonant vibration control of rotating beams." *Journal of sound and vibration* 330.9 (2011): 1877-1890.

- Türkmen C., "Tek Silindirli Bir Dizel Motorda Kuvvetlerin Analizi ve Titreşim Ölçümleri", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010
- Uslugil Y., "Dizel motorlarında çift kütleli volan kullanımı ve ilk çalıştırma gürültüsüne etkilerinin incelenmesi" , Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,2014
- Yalnızca O. , Özelgin İ., Aksoy E., "Esnek Volan Modal Analizi" Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 656, s. 30-41 (2014)
- Yıldız A. R, "Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri ile Optimum Tasarımı", Politeknik Dergisi, 2017; 20 (2) s: 319-323



YAPIŞKAN PÜSKÜRTME YÖNTEMİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ÖNEMİ VE ÖRNEK BİR UYGULAMA

Hasan BAŞ^{1*}, Fatih YAPICI¹, İbrahim İNANÇ²

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Üç Boyutlu Yazıcılar, Eklemeli İmalat, Yapışkan Püskürtme.</i>	Çalışmada eklemeli imalat yöntemleri, özellikle de yapışkan püskürtme teknolojilerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Eklemeli imalat, geleneksel bilgisayar destekli üretimdeki talaş kaldırma prensibinin aksine malzemelerin katmanlar halinde birleştirilerek üst üste eklenmesi prensibine dayanan çok karmaşık geometriye sahip objelerin dahi kolaylıkla üretilmesine imkan sağlayan pratik metodudur. Yapışkan püskürtme, önemli bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde tanecik morfolojisi, boyutu, dağılımı, toz akışkanlığı, paketleme yoğunluğu, katman kalınlığı, baskı hızı, yapışkan doygunluğu gibi parametreler baskı kalitesini etkilemektedir. Ayrıca bu çalışmada yapışkan püskürtme yöntemi ile üç farklı katman kalınlığında deney örnekleri üretilerek yüzey kalitesi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre artan katman kalınlığı ile yüzey kalitesinin bozulduğu tespit edilmiştir.

THE IMPORTANCE OF MANUFACTURING PARAMETERS IN BINDER JETTING METHOD AND AN EXAMPLE APPLICATION

Keywords	Abstract
<i>3D Printers, Additive Manufacturing, Binder Jetting.</i>	In the study, additive manufacturing methods and especially binder jetting technology are mentioned. Additive manufacturing is a practical method, allows easy production of objects has very complex geometries, that based on the principle of adding materials building up layer by layer, in contrast to the machining principle of the traditional computer-aided manufacturing. Binder jetting is an important additive manufacturing method. The print quality can be affected some parameters such as particle morphology, size, distribution, powder spreadability, packaging density, layer thickness, printing speed, binder saturation. In addition, test samples that have three different layer thicknesses was manufactured and the surface quality of them was investigated in this study too. According to the test results, it was determined that the surface quality deteriorated with increasing layer thickness.

Alıntı / Cite

Bas, H., Yapici, F., Inanc, I., (2022). Yapışkan Püskürtme Yöntemimde Üretim Parametrelerinin Önemi ve Örnek Uygulama, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1354-1361.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Baş, 0000-0001-5214-3394

F. Yapıcı, 0000-0002-2493-6781

İ. İnanç, 0000-0003-1988-1197

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 14.04.2022

Revizyon Tarihi / Revision Date 15.08.2022

Kabul Tarihi / Accepted Date 16.08.2022

Yayın Tarihi / Published Date 30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Eklemeli imalat, günümüzdeki en önemli mühendislik teknolojilerinden birisidir. Bu teknoloji için; hızlı prototipleme, katmanlı imalat, 3 boyutlu baskı gibi terimler de kullanılmaktadır. Bu teknoloji için geliştirilen

* İlgili yazar / Corresponding author: hasan.bas@omu.edu.tr, +90-362-312-1919

makinelere 3 boyutlu (3B) yazıcılar da denmektedir. Tasarımcılar tasarladıkları ürünün prototipini kusursuz ve hızlı bir şekilde 3B yazıcılar ile yapabilmektedir. 3B yazıcılar ilk başlarda hızlı prototip yapmada kullanıldığı için bu teknoloji ilk başlarda Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping-RP) olarak ifade edilmiştir. Ancak zaman içerisinde geliştirilen yeni teknikler ile imalatta direkt olarak kullanılacak parçaların yapımı içinde kullanılmaya başlanmıştır. Dolayısıyla, bu teknolojide nihai ürün üretme kapasitesine ulaşıldığı için hızlı prototipleme terimi yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM International) Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing - AM) terimini öne sürmüştür.

İlk eklemeli imalat yöntemi 1986 yılında Charles Hull tarafından patenti alınan stereolitografi'dir. Daha sonraki süreçte birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, malzeme ekstrüzyon yöntemi (material extrusion), doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition), laminasyon yöntemi (sheet lamination), toz yatak füzyon yöntemi (powder bed fusion), malzeme püskürtme (material jetting), yapışkan püskürtme (binder jetting) ve vat fotopolimerizasyon (vat photopolymerization) yöntemi olmak üzere yedi ana başlık altında toplanabilir (ASTM, 2012). Her yöntemin kullanım alanına göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışmada 3D yazıcılar ve özellikle de eklemeli imalat yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca daha önce proje kapsamında tasarlanan ve yapımı gerçekleştirilen 3D yazıcı kullanılarak 0.16mm, 0.20 mm ve 0.25 mm katman kalınlıklarında 3 adet deneme numunesi basılarak görsel olarak yüzey kalitesi incelenmiştir.

2. Eklemeli İmalat ve Yapışkan Püskürtme Yöntemi (Additive Manufacturing and Binder Jetting Method)

İlk eklemeli imalat yöntemi stereolitografi olup birçok makalede ilk olarak 1986 yılında Hull (1986) tarafından icat edildiği belirtilmektedir. Oysa bu tarihten önce (Swainson, 1977) ve (Kodama, 1981) tarafından bu konuda yapılmış çalışmaları mevcuttur. Sonrasında birçok eklemeli imalat yöntemi geliştirilmiştir. Literatürde farklı şekillerde sınıflandırma yaklaşımları mevcuttur (Pham ve Gault, 1998). ASTM' ye göre sınıflandırılan Eklemeli imalat yöntemleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing methods)

Ana Yöntemler	Alt Yöntemler
Vat Fotopolimerizasyon	-Stereolitografi (SLA) -Projeksiyon Yöntemi (Digital Light Processing) -LED ve Oksijenli Yöntem (Continuous Digital Light Processing) -Maske SLA
Toz Yatak Füzyon	-Çoklu Püskürtme ve Füzyon (Multi Jet Fusion) -Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering) -Lazer Ergitme (Selective Laser Melting) -Elektron Işını ile Ergitme
Laminasyon Yöntemi	-Kağıt ile renkli veya renksiz 3B baskı alan sistemler -Kompozit malzeme kullanılan sistemler
Doğrudan Enerji Biriktirme	-Lazerli Yöntem (Laser Engineering Net Shape) -Elektron Işınli Yöntem (Elektron Beam Additive Manufacturing)
Malzeme Ekstrüzyon	-Filament Ergitme Yöntemi (Fused Filament Fabrication) -Pistonlu Ekstrüzyon (Plunger Based Extrusion) -Vidalı Ekstrüzyon (Screw Based Extrusion)
Malzeme Püskürtme	-Malzeme Püskürtme -Nano Partikül Püskürtme (Nano Particle Jetting) -Drop on Demand
Yapışkan Püskürtme	-Renkli Baskı (Plastik malzeme) -Metal veya seramik malzeme kullanılan sistemler -Kum kalıp yapan sistemler

Eklemeli imalat yöntemlerinin her birinin farklı kullanım alanı ve kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Vat fotopolimerizasyon yöntemleri en iyi yüzey kalitesi veren metottur (Mitchell vd. (2018); Bhushan ve Caspers (2017)). Genellikle sıvı fotopolimer malzemeler kullanılsa da metal ve seramik tozlar içeren farklı ticari fotopolimer reçinelerde bulunmaktadır (Tethon3D, 2020). Metal veya seramik toz içeren fotopolimer reçinelerle ilgili farklı akademik çalışmalar mevcuttur (Deng vd. (2020); Bartolo ve Gaspar (2008); Hafkamp vd. (2018); Bae ve Halloran (2018)). Malzeme ekstrüzyon yöntemi, en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Özellikle malzeme ekstrüzyon yöntemlerinden eriyik filament fabrikasyonu (Fused Filament Fabrication – FFF ya da Fused Deposition Modeling - FDM) en yaygın ve en ucuz olan eklemeli imalat yöntemidir (Di Angelo vd., 2017). Malzeme ekstrüzyon yöntemlerinden biyoekstrüzyon yöntemi medikal uygulamalarda kullanılmaktadır (Morouço vd., 2016). Doğrudan enerji biriktirme yöntemleri metal parçaların yapımında kullanılmakta olup üretilen parçaların kopma dayanımı diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha üstündür. Bununla birlikte toz yatak füzyon yöntemleri ile elde edilen parçaların kopma dayanımları doğrudan enerji biriktirme yöntemlerine yakındır (Zhang

vd., 2018). Ancak kompleks geometrilerin basılmasında toz yatak füzyon yöntemleri daha üstündür. Toz yatak füzyon yöntemlerinde metal malzemenin dışında seramik ve plastik malzemelerde kullanılmaktadır. Fakat toz yatak füzyon yöntemlerinde termal streten kaynaklı problemler yaşanabilmektedir. Laminasyon yöntemi genellikle prototip amaçlı kullanılmakta olup nihai ürün için kullanımı sınırlıdır. Malzeme püskürtme yönteminde ise yüksek çözünürlükte ve renkli prototiplerde elde etmek mümkündür.

2.1. Yapışkan Püskürtme Tekniği (Binder Jetting Method)

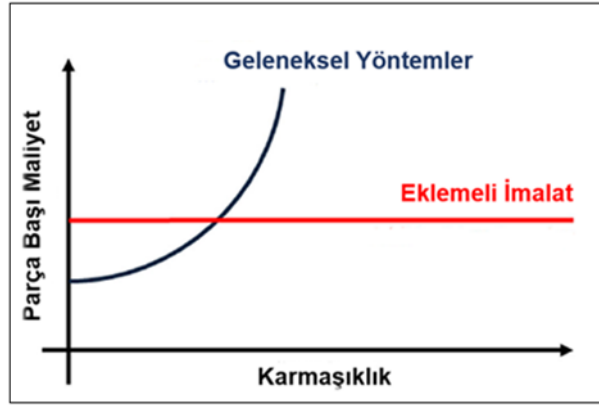
Yapışkan püskürtme yöntemi, Sachs vd. (1993) tarafından Massachusetts Institute of Technology (MIT)'de geliştirilmiş bir yöntemi olup bu yöntem 3 boyutlu yazıcı tekniği adını vermişler ve literatürde ilk başlarda bu yöntemin adı 3D yazıcı (3D Printing) olarak geçmiştir. Ancak sonradan yapışkan püskürtme olarak anılmaya başlanmıştır. Yapışkan püskürtme yönteminde toz halindeki malzeme belirli bir katman kalınlığında bir platform üzerine dönen bir silindir ya da başka mekanik elemanlar vasıtasıyla serildikten sonra bir ink-jet yazıcı kafasıyla gerekli olan bölgelere yapışkan püskürtülerek tozların birleştirilmesi sağlanır. Bu yöntemde her çeşit malzeme ile parça üretmek mümkündür. Ancak metal malzemeden üretilen parçaların mekanik özellikleri toz yatak füzyonu ve doğrudan enerji biriktirme yöntemine göre daha düşüktür (Zhang vd., 2018). Bu yöntem seramik parçaların üretiminde de avantajlı bir şekilde kullanılabilir. Metal ve seramik parçaların üretimi iki aşamalı olup ilk aşamada yazıcıdan literatürde yeşil parça (green part) denilen parça elde edilir (Ziaee ve Crane, 2019). Yeşil parçada metal ya da seramik toz kullanılan yapıştırıcı ile bağlanmış halde bulunur. Ancak; nihai ürünün elde edilmesi için yapıştırıcının arındırılması ve ürün yoğunluğunun artırılması gerekmektedir. Bunun için direkt sinterleme ya da önce yapışkan arındırma (debinding) ve sonrasında sinterleme yapılmaktadır (Lv vd., 2019). Yapışkan püskürtme yöntemi, malzeme ekstrüzyon yöntemleri gibi ekonomik bir yöntem olup büyük boyutlu hacimli makinelerin yapılması kolaydır. Voxeljet firmasının VX4000 modelinin baskı alanı 4000 x 2000 x 1000 mm'dir (Voxeljet, 2020). Yapışkan püskürtme yönteminde ürünün kalitesi; toz malzeme ve yapışkan türü, serilme yöntemi, tozun boyutu, tozun kuruluğu, baskı stratejisi ve baskı sonrası işlemler gibi faktörlere bağlıdır.

2.1.1. Yapışkan Püskürtmede Kullanılan Toz Malzemeler (Powder Materials Used In Additive Manufacturing)

Yapışkan püskürtme yönteminde metal, seramik ve polimerler gibi malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle bu yöntemle seramik malzemelerin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur (Lv vd., 2019). Seramik malzemelerin üretiminde baskı sonrası başka işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Nihai ürünü elde etmek için baskı sonrası ya direkt sinterleme ya da yapışkan arındırma ve sinterleme işlemlerinin yapılması gerekmektedir.

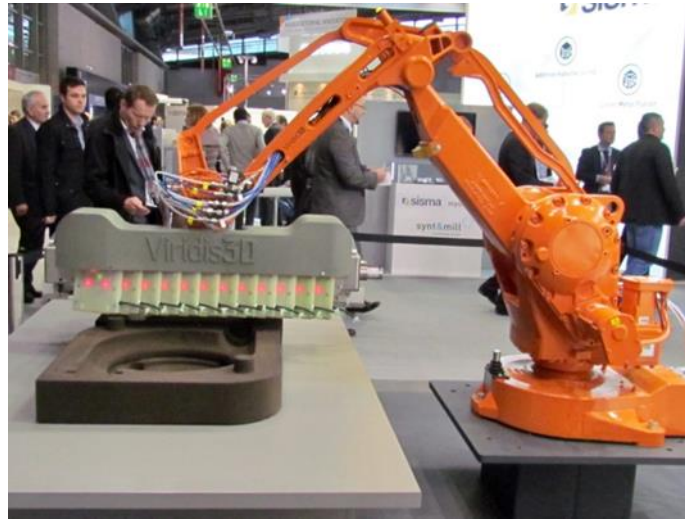
Nihai ürün özelliklerine etki eden en önemli faktörlerden biri yoğunluktur. Artan yoğunluk ile ürünün mekanik sonuçları da iyileşmektedir. Sun vd. (2002) çalışmalarında Ti3SiC2 malzeme kullanmış, baskı sonrasında malzemeyi soğuk izostatik presleme sonrasında da sinterleme işlemine tabi tutup %99'luk bir yoğunluk değeri elde edildiği rapor edilmiştir. Yapışkan püskürtme yönteminde metal malzemeler de kullanılmaktadır. Literatürde metal malzemelerde bronz infiltre etme, direkt sinterleme ya da arındırma sonrası sinterleme gibi metodların kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Kumar vd. (2017) yaptıkları çalışmada bakır toz malzeme kullanmışlardır. Baskı alındıktan sonra sıcak izostatik presleme yöntemi ile %92 yoğunluk elde etmişlerdir. Sonrasında sinterleme işlemi yaparak %99.7'lik yoğunluğa ulaştığını belirtmişlerdir. Elliott vd. (2016) çalışmalarında 316L paslanmaz çeliğe 316L nanopartikül infiltre etmişlerdir. Mirzababaei and Pasebani (2019) yapışkan püskürtme yönteminde 316L paslanmaz çelik malzeme kullanımı ile ilgili detaylı bir derleme çalışması yapmışlardır.

Yapışkan püskürtme yönteminin en çok kullanıldığı alanlardan birisi de döküm sektörüdür. Kum kalıpların model kullanılmadan direkt olarak yapılmasını sağlayan kum yazıcılar geliştirilmiştir. Kum yazıcılarda kum malzemenin üzerine, kum kalıbı yapımında kullanılan fenolik reçineler püskürtülmektedir. Kum yazıcılarla karmaşık parçaların yapımı çok kolay hale gelmiştir. Parçanın karmaşıklık düzeyi arttıkça kum yazıcılar geleneksel yöntemlerden daha ekonomik iken, parça çok basit ve fazla sayıda üretilecek ise geleneksel yöntemler ile üretim daha hızlı ve ekonomik olmaktadır (Şekil 1). Geleneksel yöntemlerde model yapımı çok maliyetli bir işlem olsa da parça sayısı arttıkça modelin maliyeti düşmektedir. Geleneksel yöntemde model elde edildikten sonra hız açısından bir avantaj sağlarken kum yazıcılarda da şekilsel özgürlük bir avantajı sunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde talaşlı imalatın sınırları çerçevesinde model yapılmakta iken kum yazıcılarda ise eklemeli imalatın sunduğu şekilsel özgürlüklerden, döküm tekniğinin izin verdiği sınırlar içerisinde faydalanılabilir. Literatürde kum yazıcılar kullanılarak malzeme israfının azaltıldığı, daha hafif parçaların elde edildiği ve değişik kum kalıp tasarımlarının yapıldığı farklı çalışmalar bulunmaktadır (Wang vd. (2019); Sama vd. (2019); Snelling vd. (2015); Sivarupan vd. (2019)). Birçok avantaja sahip olan kum yazıcılar döküm sektöründe büyük bir ses getirmiş olsa da özellikle hızların artırılması yönünde çalışmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Bu yöntemde imal etme hızlarının artırılması geleneksel yöntemler yerine kum yazıcıların tercih edilmesini sağlayabilecektir.



Şekil 1. Karmaşıklık maliyeti (Almaghariz vd., 2016) (Cost of complexity)

Kum yazıcıların veya diğer yapışkan püskürtme makinelerinin üretim hızlarının artırılması için X-ekseni boyunca yazıcı başlıkları koyularak X eksenini hareketinin iptal edilmesi bir çözümdür (Şekil 2). Üretimin kesintisiz bir şekilde devam etmesi için Voxeljet firmasının geliştirdiği bant sistemi mevcuttur (Ederer ve Hartmann, 2013). Bunun dışında ExOne, Zcorp, HP ve Desktop Metal gibi yapışkan püskürtme teknolojisini ticarileştiren firmalar bulunmaktadır. Yapışkan püskürtme yönteminde biomalzemeler de kullanılmaktadır. Kalsiyum fosfat, kalsiyum silikat ve hidroksiapatit gibi biyo uyumlu malzemelerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur (Ziaee ve Crane, 2019). Ayrıca, yine farklı birçok polimer malzemeler de kullanılmaktadır (Wu vd. (1996); Suwanprateeb and Chumnanklang (2006); Polzin vd. (2013)).



Şekil 2. Viridis 3D kum yazıcı (EnvisionTEC, 2020) (Viridis 3D sand printer)

2.1.2. Yapışkan Püskürtmede Ürün Kalitesine Etki Eden Faktörler (Factors Affecting Product Quality in Binder Jetting)

Yapışkan püskürtmede ürün kalitesini etkileyen faktörler; kullanılan toz malzeme özellikleri, baskı parametreleri, yapıştırıcı türü ve miktarı, sinterleme gibi baskı sonrası pek çok işlem elde edilen ürünün mikro yapısı, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklerini etkilemektedir.

2.1.2.1. Toz Özellikleri (Powder Properties)

Kullanılacak tozun niteliği üretilen baskıların kalitesini etkileyen en önemli faktör olarak ifade edilebilir. En önemli toz karakteristikleri ise toz morfolojisi, partikül boyutu ve dağılımı, serilebilirlik, yoğunluğu ve segregasyondur (Mostafaei vd., 2021). Küresel şekilli tozlar; daha kolay serilebilmesi, daha homojen baskı vermesi ve baskı yoğunluğunu artırmasından dolayı tercih nedeni olabilirler. Küresel şekil elde etmek için gaz veya plazma atomizasyon tekniklerinin kullanılmaktadır. Bu tekniklerin dışında su atomizasyon ve bilya ile öğütme yöntemleri de kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerde taneciklerin şekilleri düzensiz olmaktadır (Mostafaei vd., 2021).

Partikül ortalama boyutu ve boyut dağılımı paketleme yoğunluğunu, serilebilirliği ve nihai baskıyı etkilemektedir. Partikül boyutu büyüdükçe tozun akışkanlığı artmaktadır. Ancak büyük tane boyutu yoğunluğu olumsuz etkileyebilmektedir. Çok küçük tane boyutunda ise topaklanma sorunlarına neden olmaktadır. Monomodal

tozların paketleme yoğunlukları düşük olmaktadır. Bimodal tozlar daha yüksek paketleme yoğunluğuna sahiptir (Miyanaçi, Zhang, vd., 2018). Partikül ortalama boyutu 35 mikron, boyut dağılımı 16-63 mikron arasındaki küresel tozların yeşil parça (green part) yoğunluğu %50 civarındadır (Mostafaei vd., 2021).

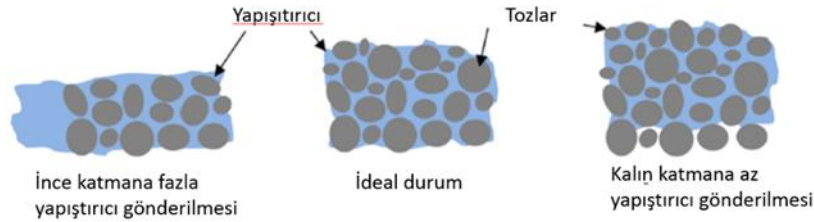
Paketleme yoğunluğu, yeşil ve nihai parçanın yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Paketleme yoğunluğunun yüksek olması gerekmektedir. Geniş partikül boyut dağılımlı tozlar dar partikül boyut dağılımlı tozlara göre daha yüksek paketleme yoğunluğuna sahiptirler (Mostafaei vd., 2021). Özellikle 7:1 ve 10:1 oranlarındaki bimodal tozlarda çok yüksek paketleme yoğunluğu sağlanmaktadır (German (1992); Egger vd. (1999)).

2.1.2.2. Baskı Parametreleri (Print Parameters)

Yapışkan püskürtme yönteminde katman kalınlığı, baskı hızı, toz serim yöntemi, yapışkan doygunluğu, kuruma zamanı ve ısıtıcı gücü gibi parametreler bulunmaktadır. Katman kalınlığı ürün özelliklerini en çok etkileyen parametrelerden biridir. Katman kalınlığı arttıkça yüzey kalitesi ve boyutsal tolerans olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca çok kalın katman toz yoğunluğunu azaltmaktadır (Zhang vd., 2009). Yoğunluğun azalması ise mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır. Ancak kalın katman ile üretim hızı artmaktadır.

Baskı hızı ve toz serimi ile alakalı hızlar yapışkan püskürtme yönteminde önemli rol oynamaktadır. Toz serim işleminde genellikle doktor bıçağı (doctor blade), besleme hunisi (hopper), merdane (roller) ve besleme hunisi-merdane sistemleri kullanılmaktadır. Literatürde merdane ilerleme hızının 0,1 ile 16 mm/sn arasında değiştiği ifade edilmektedir. Merdane ilerleme hızının 4 mm/sn 'nin üzerine çıkması durumunda toz malzemenin homojen serilmesi zorlaşacaktır (Mostafaei vd., 2021). Baskı hızı arttıkça oryantasyon ne olursa olsun boyutsal doğruluk azalmaktadır. Ancak değişik oryantasyonlarda farklı boyutsal doğruluk rakamları elde edilmektedir (Miyanaçi, Momenzadeh, vd., 2018).

Yapışkan doygunluğu baskı kalitesi için önemli diğer bir parametredir. Yüksek doygunluk oranı, boyut doğruluğunu ve yüzey kalitesini düşürmektedir. Katman kalınlığı doygunluk ilişkisi önemlidir. Şekil 3'de doygunluk ve katman kalınlığı ilişkisi gösterilmektedir. Fazla yapışkan gönderilmesi durumunda yapışkan istenilmeyen bölgelere taşacaktır. Daha az yapışkan gönderilmesi durumunda ise alt katmanlar ile kuvvetli adhezyon bağ zayıflayacak hatta oluşmayacaktır.



Şekil 3. Katman kalınlığı doygunluk ilişkisi (Mostafaei vd., 2021) (Relation between layer thickness and saturation.)

2.1.2.3. Yapışkanlar (Binders)

Yapışkan püskürtme tekniğinde kullanılan yapışkanlar kullanım yerine göre değişiklik göstermektedir. Yapışkan püskürtmede toz içi (in-bed binders), faz değiştirme (phase-changing binders) ve sinterleme düzenleyici (sintering inhibition binders) olmak üzere üç farklı yapıştırma mekanizması vardır. Toz içi yapışkan sisteminde ana toz ile yapıştırıcı özelliği taşıyan tozlar karışmış haldedir. 3B yazıcı kartuşundan solvent püskürtülerek bu yapıştırıcı toz aktif edilmekte ve yapıştırma işlemi sağlanmaktadır. Toz içi sisteminde yapışkan toz olarak PVA (Polivinil alkol), maltodekstrin gibi tozlar kullanılmaktadır. Faz değiştirme sisteminde toz içerisinde herhangi bir yapıştırıcı madde bulunmamakta ve yapıştırıcı kartuşun içerisinde yer almaktadır. Yapıştırıcı tozun üzerine püskürtüldükten sonra faz değiştirip katılaşmaktadır (Mostafaei vd., 2021). Kum kalıp yapan yazıcılarda kullanılan yapışkanlar faz değiştiren tipte yapışkanlar olup bunlar genellikle furan ve fenolik tipte reçinelerdir. Bu reçinelerin ısı dayanımı ve gaz geçirgenliği gibi özellikleri bulunmaktadır.

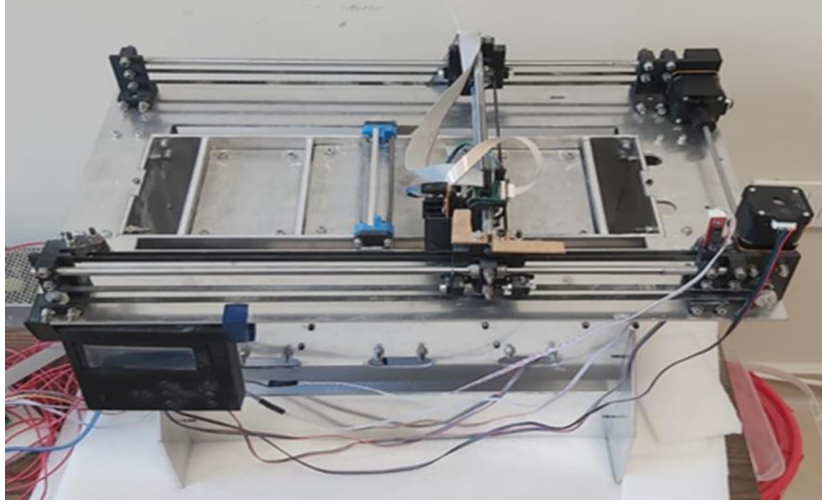
2.1.2.4. Baskı sonrası işlemler (Post Process)

Yapışkan püskürtme tekniğinde elde edilen ilk baskıya yeşil parça denilmektedir. Yeşil parçanın baskı alanından çok dikkatli bir şekilde alınması gerekmektedir. Kullanılan malzeme ve baskı parametrelerine bağlı olarak özellikle bazı durumlarda ince cidarlı bölgeler hasar görebilir. Nihai parçanın elde edilmesi için bu yeşil parça üzerine ilave bazı işlemlerin yapılması gerekmektedir. Ancak bu durum kum yazıcılardan farklıdır. Kum yazıcılarda elde edilen ilk parça genellikle nihai parçadır. Diğer yazıcılarda yeşil parçanın sinterlenmesi ya da infiltrasyon işlemine tabi

tutulması gerekmektedir. Sinterleme işleminde yeşil parça direkt olarak sinterlenebilir ya da ön işlem olarak yapışkan arındırma işleminden sonra sinterleme yapılabilir. İnfiltrasyon işlemi de aynı şekilde direkt ya da yapışkan arındırma işlemi ile birlikte yapılabilir. Sinterleme ya da infiltrasyon işlemlerinden sonra ancak nihai parça elde edilir.

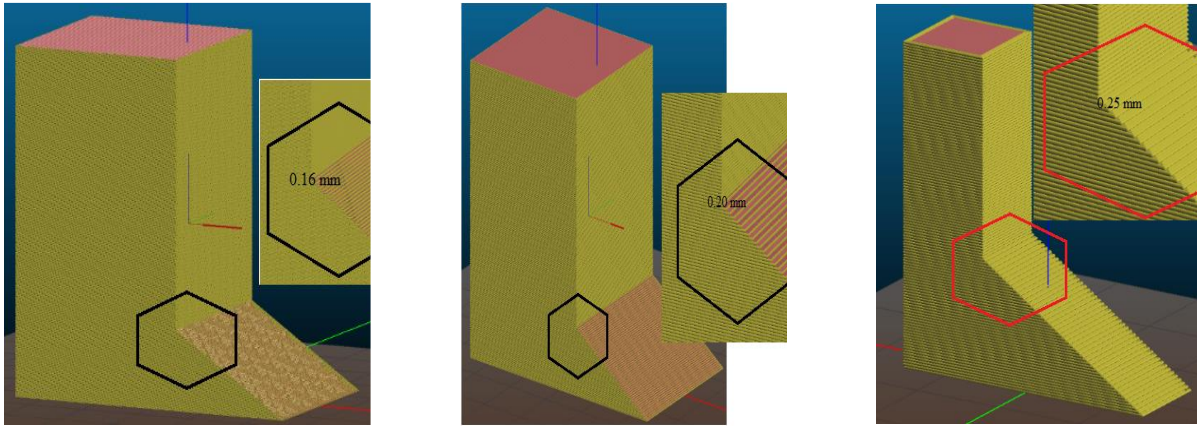
3. Materyal Metot (Material and Method)

Çalışmada daha önce tasarım ve üretimi yapılan 3D yazıcı (Şekil 4) kullanılarak üç farklı katman kalınlığında üç adet numune elde edilmiştir. Örnek hazırlamada tane boyutu 80 mikron toz alumina, maltodekstrin ve pudra şekeri kullanılmıştır. Literatür incelemesi dikkate alınarak kullanılacak karışım; %50 alumina, %25 maltodekstrin ve %25 pudra şekeri olacak şekilde yapılmıştır. Bağlayıcı olarak ise yapışkan püskürtme yöntemine uygun yapıştırıcı piyasadan temin edilerek temin edilerek kullanılmıştır.



Şekil 4. Çalışmada kullanılan 3D yazıcı (Ytec, 2022) (3D printer used in this study)

Numunelerin katman kalınlıkları sırası ile 0.16mm, 0.20mm ve 0.25 mm olmak üzere üç farklı şekilde hazırlanmıştır. Numune yüzeylerinde katman kalınlıklarındaki geçişlerin daha iyi izlenebilmesi için numuneler düz ve eğimli (30°) yüzeylere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Tasarlanan numuneler (Designed samples)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışmada üç farklı katman kalınlığında (0.16mm, 0.20 mm ve 0.25 mm) üretilen deneme örnekleri Şekil 6'de verilmiştir.

Deneme örneklerin elde edilmesinde kullanılan karışımın alumina tozu, maltodekstrin ve pudra şekeri karışımı kullanılmıştır. Elde edilen numunelerde katman kalınlığı arttıkça hem düz hem de eğimli yüzeylerde yüzey kalitesinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir.



Şekil 6. Farklı katman kalınlıklarında üretilen örnek numuneler (Printed samples in different layer thickness)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapışkan püskürtme yöntemi halen en önemli eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile her türlü malzeme (metal tozu vb.) kullanılarak üretim yapılabilir. Yapışkan püskürtme yöntemi, kum kalıp üretiminde çok önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntem sayesinde çok karmaşık şekilli kalıplar kısa sürede ve daha az maliyetle üretilebilmektedir. SLS (Selective Laser Sintering) ve EBM (Elektron Demeti ile Ergitme) yöntemlerine göre yapışkan püskürtme yönteminde termal gerilmenin çok az olması bir avantaj olup, bu durum özellikle seramik parça üretiminde yapışkan püskürtme yöntemini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle metal parça üretiminde yapışkan püskürtme yöntemi mekanik özellikler açısından SLS ve EBM gibi diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre bazı dezavantajlar içerse de bu durum yüksek basınç ve yüksek sıcaklık presleri ile aşılabılır. Bir ön hazırlık mahiyetinde yapılan bu çalışmada kullanılan 3D yazıcı daha önce proje kapsamında tasarım ve imalatı yapılan bir yazıcıdır. Deney örnekleri mevcut bu yazıcıda 0.16 mm, 0.20 mm ve 0.25 mm katman kalınlığında olmak üzere üç farklı şekilde üretilmiştir. Örnek numunelerin üretilmesinde karışım olarak %50 alumina, %25 maltodekstrin ve %25 pudra şekeri olacak kullanılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen örnek numuneler incelendiğinde en iyi yüzey kalitesini 0.16mm katman kalınlığına sahip örnekler verirken, katman kalınlığının artması ile yüzey kalitesinin düştüğü belirlenmiştir. Alumina tozun tanecik yapısı itibari ile küresel şekle yakın iken maltodekstrin ve pudra şekerinin tanecik yapısı daha heterojen olması serme işlemini zorlaştırmıştır. Ayrıca, bu durumun artan katman kalınlığı ile bozulan yüzey kalitesini de olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Şekiller incelendiğinde örneklerde bölgesel olarak bozukluklar görülmektedir. Özellikle 0.25mm katman kalınlığına sahip numunede katman geçişleri çok net bir şekilde görülebilmektedir. Deney örneklerinde daha düzgün yüzeylerin elde edilmesi için farklı metal tozları, daha homojen katkı materyalleri, farklı tutkal türü ve miktarı ile denemelerin yapılması faydalı olacaktır. Henüz gelişim aşamasını devam ettiren yapışkan püskürtme yöntemi yeni teknolojilerin geliştirilmesi işletmelerin endüstri 4.0'a geçişini hızlandıracak; havacılık, otomotiv, biyomedikal ve döküm vb. sektörlerinde kritik bir öneme sahip olacağı aşikardır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 1904-21-006 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Almaghariz, E. S., Conner, B. P., Lenner, L., Gullapalli, R., Manogharan, G. P., Lamoncha, B., Fang, M., 2016. Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *International Journal of Metalcasting*, 10(3), 240-252.
- ASTM., (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bae, C.-J., Halloran, J. W., 2018. A segregation model study of suspension-based additive manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(15), 5160-5166.
- Bartolo, P. J., Gaspar, J., 2008. Metal filled resin for stereolithography metal part. *CIRP Annals*, 57(1), 235-238.
- Bhushan, B., Caspers, M., 2017. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsystem Technologies*, 23(4), 1117-1124.

- Deng, F., Nguyen, Q.-K., Zhang, P., 2020. Multifunctional liquid metal lattice materials through hybrid design and manufacturing. *Additive Manufacturing*, 33, 101117.
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., Marzola, A., 2017. Surface quality prediction in FDM additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9), 3655-3662.
- Ederer, I., Hartmann, A. D., 2013. Method for producing three-dimensional models with special construction platforms and drive systems (German Patent No. DE 10 2012 010 272 A1). G. P. a. T. M. Office.
- Egger, G., Gygax, P. E., Glardon, R., ve Karapatis, N., 1999. Optimization of powder layer density in selective laser sintering.
- Elliott, A. M., AlSalihi, S., Merriman, A. L., ve Basti, M. M., 2016. Infiltration of Nanoparticles into Porous Binder Jet Printed Parts. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 128-133.
- EnvisionTEC., 2020. The Viridis3D Story. Retrieved 23 April from <https://envisiontec.com/3d-printers/robotic-additive-manufacturing/>
- German, R. M., 1992. Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures. *Metallurgical Transactions A*, 23(5), 1455-1465.
- Hafkamp, T., van Baars, G., de Jager, B., Etman, P., 2018. A feasibility study on process monitoring and control in vat photopolymerization of ceramics. *Mechatronics*, 56, 220-241.
- Kodama, H., 1981. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), 1770-1773.
- Kumar, A., Bai, Y., Eklund, A., Williams, C. B., 2017. Effects of Hot Isostatic Pressing on Copper Parts Fabricated via Binder Jetting. *Procedia Manufacturing*, 10, 935-944.
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., Liu, Y., 2019. Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609-12624.
- Mirzababaei, S., Pasebani, S., 2019. A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 82.
- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., Semprimoschnig, C., 2018. Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, 24, 606-626.
- Miyanaji, H., Momenzadeh, N., Yang, L., 2018. Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process. *Additive Manufacturing*, 20, 1-10.
- Miyanaji, H., Zhang, S., Yang, L., 2018. A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 124, 1-11.
- Morouço, P., Biscaia, S., Viana, T., Franco, M., Malça, C., Mateus, A., Moura, C., Ferreira, F. C., Mitchell, G., Alves, N. M., 2016. Fabrication of Poly(ε-caprolactone) Scaffolds Reinforced with Cellulose Nanofibers, with and without the Addition of Hydroxyapatite Nanoparticles. *BioMed Research International*, 2016, 1596157.
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., Chmielus, M., 2021. Binder jet 3D printing— Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707.
- Pham, D. T., Gault, R. S., 1998. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10), 1257-1287.
- Polzin, C., Spath, S., Seitz, H., 2013. Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process. *Rapid Prototyping Journal*, 19(1), 37-43.
- Sachs, E. M., Haggerty, J. S., Cima, M. J., Williams, P. A., 1993. Three-dimensional printing techniques (United States Patent No. 5,204,055). U. S. Patent.
- Sama, S. R., Badamo, T., Lynch, P., Manogharan, G., 2019. Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing. *Additive Manufacturing*, 25, 563-578.
- Sivarupan, T., Upadhyay, M., Ali, Y., El Mansori, M., Dargusch, M. S., 2019. Reduced consumption of materials and hazardous chemicals for energy efficient production of metal parts through 3D printing of sand molds. *Journal of cleaner production*, 224, 411-420.
- Snelling, D., Li, Q., Meisel, N., Williams, C. B., Batra, R. C., Druschitz, A. P., 2015. Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds. *Advanced Engineering Materials*, 17(7), 923-932.
- Sun, W., Dcosta, D., Lin, F., El-Raghy, T., 2002. Freeform fabrication of Ti3SiC2 powder-based structures: Part i Integrated fabrication process. *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 343-351.
- Suwanprateeb, J., Chumnanklang, R., 2006. Three-dimensional printing of porous polyethylene structure using water-based binders. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 78(1), 138-145.
- Swainson, W. K., 1977. Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product (United States Patent No. 4,041,476). U. S. Patent.
- Tethon3D., 2020. Ferrolite Iron Resin – 500ml. Retrieved 20 April from <https://tethon3d.com/product/ferrolite-iron-resin-500ml/>
- Voxeljet., 2020. Largest industrial 3d sand printing system in the world: the vx4000. Retrieved 20 May from <https://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/vx4000/>
- Wang, J., Sama, S. R., Manogharan, G., 2019. Re-Thinking Design Methodology for Castings: 3D Sand-Printing and Topology Optimization. *International Journal of Metalcasting*, 13(1), 2-17.
- Wu, B. M., Borland, S. W., Giordano, R. A., Cima, L. G., Sachs, E. M., Cima, M. J., 1996. Solid free-form fabrication of drug delivery devices. *Journal of Controlled Release*, 40(1), 77-87.
- Ytec., 2022. Plan B. Retrieved 28 January from <https://ytec3d.com/plan-b/>
- Zhang, W., Melcher, R., Travitzky, N., Bordia, R. K., Greil, P., 2009. Three-Dimensional Printing of Complex-Shaped Alumina/Glass Composites. *Advanced Engineering Materials*, 11(12), 1039-1043.
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., Zhang, J., 2018. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13.
- Ziaee, M., Crane, N. B., 2019. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.



FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE STATİK ANALİZİ

Muhittin TURAN^{1*}

¹Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 69010, Bayburt

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Kiriş, Sonlu Eleman Yöntemi, Statik Analiz.</i>	Bu çalışmada, trigonometrik kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin (FDGB) sonlu elemanlar yöntemiyle statik analizi incelenmiştir. Sonlu eleman yöntemi için üç düğüm noktalı 12 serbestlik dereceli yüksek mertebeli sonlu kiriş elemanı önerilmiştir. Denge denklemleri Lagrange prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Kiriş bileşenlerinin hacim içerisindeki değişimleri, bir kuvvet kuralı ile tanımlanmıştır. Kirişin çeşitli mesnet şartlarına, hacimsel değişim üsteline (k), gözeneklilik katsayısına (e) ve narinlik oranlarına (L/h) göre boyutsuz yer değiştirme değerleri, boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri elde edilmiştir. Önerilen yüksek mertebeli sonlu kiriş elemanının doğruluğu araştırılmıştır. Sayısal sonuçlar literatürdeki mevcut çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir.

STATIC ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED POROUS BEAMS WITH FINITE ELEMENT METHOD

Keywords	Abstract
<i>Functionally graded porous beam, Finite element method, Static analysis.</i>	In this study, the static analysis of functionally graded porous beams (FDGB) using the finite element method according to the trigonometric shear deformation beam theory was investigated. A high-order finite beam element with three nodes and 12 degrees of freedom is proposed for the finite element method. The governing equations are obtained using Lagrange's principle. The variation of the beam components in the volume is defined by a power-law rule. Dimensionless deflection values and dimensionless normal and shear stress values were obtained according to various boundary conditions, power-law exponent (k), porosity coefficient (e), and slenderness ratio (L/h) of the beam. The accuracy of the proposed higher-order beam element has been investigated. Numerical results are compared with the available literature, and a good agreement has been shown between the results.

Alıntı / Cite

Turan, M., (2022). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Statik Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1362-1374.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Turan, 0000-0002-5703-0580

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	22.06.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.08.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.08.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Homojen olmayan kademeli veya devamlı değişen bir yapıya sahip fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) fiziksel ve kimyasal olarak farklı özellikler taşıyan, iki madde arasında, farklı ısıl genleşme katsayılarından kaynaklanan ısıl gerilmeleri derecelendirilmiş yapılarıyla azaltmaktadır. Ayrıca FDM'ler, bu iki madde arasındaki kademeli değişim sebebiyle fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki ani değişimlerin meydana getirebileceği diğer olumsuzlukları da en aza indirebilen yeni nesil bir malzeme olarak geliştirmiştir. Genel olarak FDM bir seramik ve bir metalin karışımından meydana gelmektedir. Seramik termal ortamlarda yüksek sıcaklıklara karşı dirençli iken, metal ise soğutmanın ilk aşamalarında seramik yüzeyde oluşacak çekme gerilmelerini azaltmaktadır (Avcar ve

* İlgili yazar / Corresponding author: mturan@bayburt.edu.tr, +90 458 211 11 77

Mohammed, 2017). Teknolojinin gelişmesiyle birlikte FDM'ler uçaklar, biyomedikal ürünler, uzay araçları, enerji santralleri ve inşaat mühendisliğinde yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanları gibi birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin tabakalar halinde birleştirilmesiyle oluşturulmakta ve bu tabakaların farklı malzeme veya dizilişlerden oluşması nedeniyle malzeme içindeki sıcaklık ve gerilme dağılımında süreksizlikler meydana gelmektedir. Bu problemi ortadan kaldırabilmek için yüksek sıcaklık, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi çeşitli özellikler sunabilen en az iki malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve malzeme özellikleri bir fonksiyona bağlı olarak değişen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretilmiştir. FDM'lerin bu üstün özellikleri sebebiyle araştırmacılar fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kirişlerin statik, dinamik ve burkulma davranışlarını çeşitli kiriş teorilerine göre hem analitik ve hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir (Vo vd., 2015; Turan, 2018). Kahya ve Turan (2017), FD kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizleri için birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine dayalı beş düğüm noktalı ve on serbestlik dereceli bir sonlu eleman önermişlerdir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde, yazarlar aynı elemanı kullanarak FD sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma davranışlarını incelemiştir (Kahya ve Turan, 2018).

FDM'lerin yukarıda bahsedilen üstün özelliklerine ve avantajlarına rağmen üretimleri sırasında, FDM'nin yapısında üretim yöntemlerinden kaynaklanan nedenlerle gözenekler oluşmaktadır. Bu nedenle, birçok araştırmacı, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedeki yapılan gözenekli kirişlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin (FDGB) mekanik davranışlarını Timoshenko kiriş teorisine göre analitik yöntemlerle inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır (Chen vd., 2015; Wattanasakulpong ve Chaikittiratana, 2015; Kitipornchai vd., 2017; Gao vd., 2019). Ebrahimi vd. (2016), çeşitli ısı yüklerine maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin termo-mekanik titreşim analizlerini Navier tipi bir çözüm ve yarı analitik diferansiyel dönüşüm yöntemi ile incelemiştir. Zouatnia vd. (2017), fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin eğilme ve serbest titreşim analizleri için analitik bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Avcar (2019) kusurlu (gözenekli) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış kirişlerin serbest titreşimini incelemiştir. Hadji vd. (2019), FDGB'lerin statik ve serbest titreşim analizleri için yeni bir yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisini geliştirmişlerdir. Taşkin ve Demirhan (2020), iki değişkenli plak teorisi kullanarak gözenek içeren fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin titreşim analizini Navier metodu ile yapmışlardır. Derikvand vd. (2021), çekirdek tabakası gözenekli olan fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin burkulma davranışlarını üçüncü mertebeden kayma deformasyonlu teoriye göre diferansiyel dönüşüm yöntemiyle incelemiştir. Nguyen vd. (2022), FDGB'lerin eğilme, serbest titreşim ve burkulma analizleri için yeni bir iki değişkenli kesme deformasyonlu teori önermişlerdir. Sayyad vd. (2022), fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli dairesel kirişlerin statik ve serbest titreşim analizlerini yüksek mertebe hiperbolik dairesel kiriş teorisine göre Navier tipi çözüm yöntemiyle incelemiştir. Chami vd. (2022), FD sandviç kirişlerin doğal frekansları üzerinde gözenekliliğin etkisini araştırmak için gelişmiş kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre analitik yöntem kullanmışlardır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedeki yapılan gözenekli kirişlerin mekanik davranışlarını az da olsa sonlu elemanlar metodu ile inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur. Fouada vd. (2017), sonlu elemanlar yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişin eğilme, burkulma ve titreşim analizlerini Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre incelemiştir. Akbaş (2018), dinamik yük altında FD gözenekli derin kirişlerin zorlanmış titreşim davranışlarını sonlu elemanlar metoduyla araştırmıştır. Hamed vd. (2019), gözeneklilik modellerinin, boyuta bağlı FD kirişin statik davranışı üzerindeki etkilerini Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Zghal vd. (2020), rafine karışık sonlu eleman kiriş modeli kullanarak FD kirişlerin statik analizi üzerindeki gözenekliliğin etkisini araştırmışlardır. Alnujaie vd. (2021), gözenekliliğe sahip tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kalın kirişlerin sönümlü zorlanmış titreşim analizini on iki düğüm noktalı ve iki boyutlu düzlem sonlu eleman modeliyle ele almışlardır.

Yukarıda verilen literatür taramasından da görüleceği üzere FD gözenekli kirişlerin mekanik davranışlarını sonlu elemanlar metoduyla inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yazarın bildiği kadarıyla, trigonometrik kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre FD gözenekli kirişlerin önerilen sonlu eleman modeliyle statik analizini inceleyen çalışmaya rastlanılmamıştır. Sonlu eleman yöntemi için üç düğüm noktalı 12 serbestlik dereceli yüksek mertebe sonlu kiriş elemanı önerilmiştir. Denge denklemleri Lagrange prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Kiriş bileşenlerinin hacim içerisindeki değişimleri, bir kuvvet fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Kirişin çeşitli mesnet şartlarına, hacimsel değişim üsteline (k), gözeneklilik katsayısına (e) ve narinlik oranlarına (L/h) göre boyutsuz yer değiştirme değerleri, boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri elde edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Şekil 1'de görülen dikdörtgen kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin boyu L , kesit boyutları $b \times h$ olarak verilmektedir. Kirişin kesiti FDGB-1 (düzenli) ve FDGB-2 (düzensiz) olmak üzere iki farklı gözeneklilik modeline sahiptir (Şekil 2). Kirişin malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca karışım kuralına göre (1)'deki gibi değiştiği kabul edilmektedir (Wattanasakulpong ve Chaikittiratana, 2015).

$$P(z) = P_s \left(V_s(z) - \frac{e(z)}{2} \right) + P_m \left(V_m(z) - \frac{e(z)}{2} \right) \quad (1)$$

Burada, P_s ve P_m sırasıyla seramik ve metal bileşenlerine ait malzeme özellikleridir (Elastisite modülü $E(z)$, kayma modülü $G(z)$, yoğunluk $\rho(z)$). $e(z)$ ise gözeneklilik fonksiyonudur. Metal ve seramiğin toplam hacimdeki oranı (2)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$V_s(z) + V_m(z) = 1 \quad (2)$$

Kirişteki seramiğin hacimsel değişim oranı kuvvet kuralına göre (3)'deki gibi kabul edilmiştir.

$$V_s(z) = \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^k \quad (3)$$

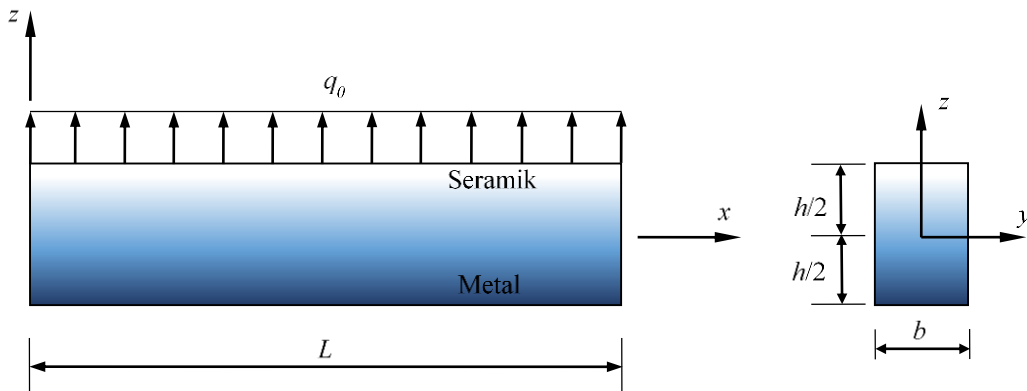
Gözenekliliğin düzenli dağıldığı FDGB-1 olarak tanımlanan malzemede malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişimi (4)'deki gibi elde edilmiştir (Wattanasakulpong ve Chaikittiratana, 2015).

$$P(z) = P_m + (P_s - P_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^k - \frac{e}{2} (P_s + P_m) \quad (4)$$

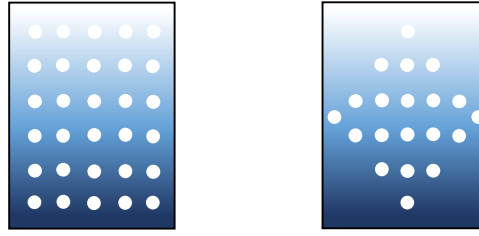
Gözenekliliğin düzensiz dağıldığı FDGB-2 de ise malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişimi (5)'deki gibidir (Wattanasakulpong ve Chaikittiratana, 2015).

$$P(z) = P_m + (P_s - P_m) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^k - \frac{e}{2} \left(1 - \frac{2|z|}{h} \right) (P_s + P_m) \quad (5)$$

Burada k , kalınlık yönündeki kuvvet fonksiyonu üst indis değerleridir. e ise gözeneklilik katsayısıdır. Bu iki gözeneklilik modeli için malzeme özellikleri $E(z)$, $G(z)$ ve $\rho(z)$ yukarıdaki denklemlere göre değişmektedir. Bununla birlikte, Poisson oranının FDM davranışı üzerindeki etkisi, elastisite modülünden çok daha azdır, bu nedenle Poisson oranı ν 'nin sabit olduğu varsayılmaktadır. Çeşitli kuvvet fonksiyonu üst indis değerleri ve gözeneklilik katsayıları için FDGB-1 ve FDGB-2'nin elastisite modülünün değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi, gözeneklilik katsayısı sıfır olduğunda ($e=0$), $E(z)$ 'ye göre kiriş kesiti hasarsızdır.



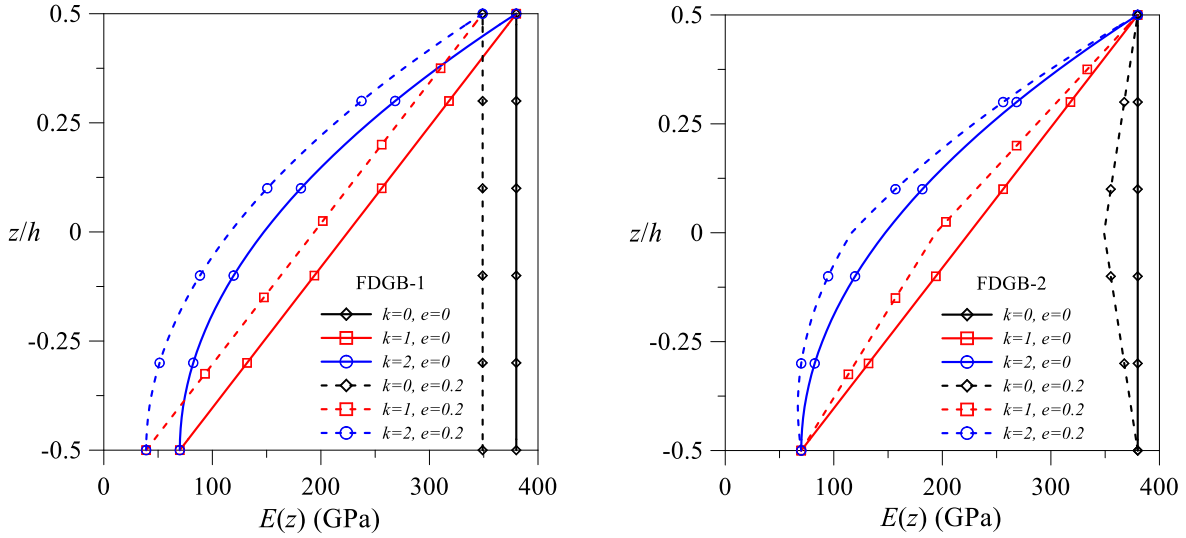
Şekil 1. FD Gözenekli Kirişin Geometrik Özellikleri ve Koordinat Eksenleri (Geometric Properties and Coordinate Axes of FD Porous Beam)



FDGB-1

FDGB-2

Şekil 2. Farklı İki Gözeneklilik Durumu İçin Kirişin Kesiti (Cross-section of Beam for Two Different Porosity Situations)

Şekil 3. FDGB-1 ve FDGB-2 için k ve e 'ye Bağlı Olarak E 'nin Yükseklik Boyunca Değişimi (Variation of E Along Height with Respect to k and e for FDGB-1 and FDGB-2)

2.2. Teori ve Sonlu Elemanlar Metodu (Theory and Finite Element Method)

Şekil 4'de L_e elemanın boyu olmak üzere, sonlu eleman yöntemi için önerilen üç düğüm noktalı 12 serbestlik dereceli yüksek mertebeli sonlu kiriş elemanı gösterilmektedir. Önerilen yüksek mertebeli sonlu kiriş elemanı için yer değiştirme vektörü (6)'da verilmiştir.

$$\mathbf{u} = \{u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3 \quad \beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3\}^T \quad (6)$$

Burada u ve w sırasıyla boyuna ve enine yer değiştirmeler, ϕ ve β dönme bileşenleri olup çubuk eksenine üzerinde ölçülmektedirler. Trigonometrik kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre herhangi bir noktadaki yer değiştirmeler (7)'de verilmektedir (Ferreira vd., 2005).

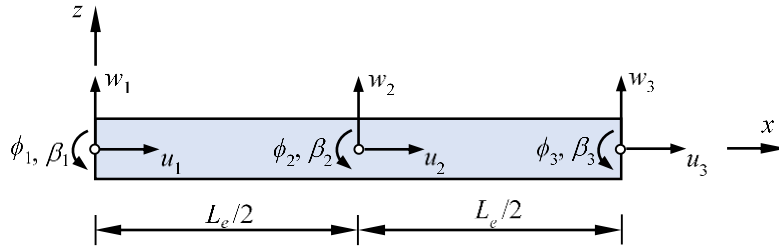
$$u(x, z) = u_0(x) - z \beta_0(x) + \sin\left(\pi \frac{z}{h}\right) \phi_0(x), \quad (7)$$

$$w(x, z) = w_0(x)$$

FD gözenekli izotropik kiriş için bünye denklemleri (8)'deki gibi yazılmaktadır (Turan, 2018).

$$\sigma_{xx} = E(z) \varepsilon_{xx}, \quad \tau_{xz} = G(z) \gamma_{xz} \quad (8)$$

Burada, σ_{xx} ve τ_{xz} sırasıyla normal ve kayma gerilmelerini, $E(z)$, $\nu(z)$ ve $G(z) = E(z) / 2[1 + \nu(z)]$ sırasıyla elastisite modülü, Poisson oranı ve kayma modülünü göstermektedir. Ayrıca bünye denklemlerindeki $\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x$ ve $\gamma_{xz} = \partial u / \partial z + \partial w / \partial x$ sırasıyla uzama oranı ve kayma açısıdır.



Şekil 4. 12 Serbestlik Dereceli Yüksek Mertebe Sonlu Kiriş Elemanı (High-Order Finite Beam Element with 12 Degrees of Freedom)

(9)'daki Lagrange eşitliği yardımıyla denge denklemleri elde edilmektedir (Turan, 2018).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (9)$$

Burada, $L = T - (U + V)$ Langragian fonksiyonudur. q_i ise düğüm noktalarındaki genelleştirilmiş koordinatlarıdır ($u_i, w_i, \phi_i, \beta_i$). İfadedeki $T = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \int_A \rho(z) (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) dA dx$ ve $U = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \int_A (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dA dx$ sırasıyla kinetik ve şekil değiştirme enerjilerini, $V = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} P_0 (w_{0,x})^2 dx + \int_0^{L_e} q_0 w_0 dx$ ise dış yükün yaptığı işi göstermektedir.

Sayısal çözüm için yer değiştirmeler (10)'daki gibi kabul edilmiştir.

$$u_0(x) = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x) u_i, \quad w_0(x) = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x) w_i, \quad \phi_0(x) = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x) \phi_i, \quad \beta_0(x) = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x) \beta_i \quad (10)$$

Burada, $\psi_i(x)$ şekil fonksiyonu ikinci dereceden polinom olup, bütün yer değiştirmeler için Lagrange interpolasyon formülü ile aynı elde edilmektedir ($\psi_1 = (1-x/L_e)(1-2x/L_e)$, $\psi_2 = 4x/L_e(1-x/L_e)$, $\psi_3 = -x/L_e(1-2x/L_e)$). u_i, w_i, ϕ_i ve β_i ise genelleştirilmiş yer değiştirmeleri göstermektedir.

Sayısal çözüm için verilen yer değiştirmeler hesaba katılarak, iş ve enerji ifadeleri Lagrange denkleminde yazılırsa L_e boyundaki kiriş elemanının hareket denklemi (11)'deki gibi elde edilmiştir.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{k}_e - P_0\mathbf{k}_g)\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (11)$$

Burada, \mathbf{m} , \mathbf{k}_e ve \mathbf{k}_g sırasıyla kütle, rijitlik ve geometrik rijitlik matrisleri, \mathbf{f} ise dış yük vektörüdür. P_0 burkulma yüküdür. (11)'de bir eleman için yazılan denklem sistem için türetilir ve bu denklemde kütle matrisi ve burkulma yükü sıfırlanırsa, statik analiz için denge denklemi (12)'deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{K}_e \mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (12)$$

Burada, \mathbf{K}_e ve \mathbf{F} sırasıyla sistem rijitlik matrisi ve sistem yük vektörüdür. (12)'nin çözümünden yer değiştirmeler (\mathbf{X}) elde edilir.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu bölümde, düzgün yayılı yük (q_0) altında çeşitli sınır şartlarına sahip FD gözenekli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle, hacimsel değişim üsteline (k), gözeneklilik katsayısına (e) ve narinlik oranlarına (L/h) göre boyutsuz yer değiştirme değerleri, boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, $L=2\text{m}$, $b=0,1\text{m}$ ve $q_0=10000\text{N/m}$ olarak alınmıştır. FD gözenekli kirişte kullanılan metal (alüminyum, Al) ve seramik (alüminyum oksit, Al_2O_3) için malzeme özellikleri sırasıyla metal ve seramiğe ait elastisite modülü (E), yoğunluk (ρ) ve Poisson oranı (ν) olmak üzere $E_m = 70\text{GPa}$, $\rho_m = 2702\text{kg/m}^3$, $\nu_m=0,3$ ve $E_s = 380\text{GPa}$, $\rho_s = 3960\text{kg/m}^3$, $\nu_s=0,3$ şeklindedir. Göz önüne alınan farklı sınır şartları sırasıyla iki ucu ankastre kiriş (A-A), basit kiriş (B-B) ve konsol kiriş (A-S)

şeklinde. Kirişin yer değiştirmeleri, normal ve kayma gerilmeleri çalışmada (13) ifadesindeki gibi boyutsuz olarak verilmiştir.

$$\bar{w} = \frac{100E_m b h^3}{qL^4} w(x, 0), \quad \bar{\sigma}_{xx} = \frac{bh}{q_0 L} \sigma_{xx}(x, z), \quad \bar{\tau}_{xz} = \frac{bh}{q_0 L} \tau_{xz}(x, z) \quad (13)$$

Sonlu eleman yöntemlerinde öncelikle problemin çözümünde yeterli olacak sonlu eleman sayısını belirlemek için yakınsama çalışması yapılmaktadır. $L/h = 5$, $k = 1$, $e = 0$ için farklı sınır şartlarına sahip FD gözeneksiz kirişlerin maksimum boyutsuz yer değiştirmelerinin eleman sayısı ile değişimi Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, mevcut eleman hızlı bir şekilde eleman sayısı arttığında yakınsamaktadır. Bu nedenle sayısal hesaplamalarda istenilen doğruluk için 22 eleman yeterli görünmektedir.

Tablo 1. Farklı Sınır Şartlarına Sahip FD Gözeneksiz Kirişlerin Maksimum Boyutsuz Yer Değiştirmelerinin Eleman Sayısıyla Değişimi ($L/h = 5$, $k = 1$, $e = 0$) (Variation of the Maximum Dimensionless Displacements of FD Non-Porous Beams with Different Boundary Conditions with the Number of Elements ($L/h = 5$, $k = 1$, $e = 0$))

Sınır Şartları	Eleman Sayısı							
	4	8	12	16	18	20	22	24
A-A	1,5843	1,6267	1,6299	1,6305	1,6306	1,6307	1,6307	1,6307
B-B	6,2245	6,2567	6,2586	6,2590	6,2590	6,2591	6,2591	6,2591
A-S	57,2011	57,3457	57,3557	57,3576	57,3580	57,3582	57,3583	57,3583

Tablo 2. Farklı Sınır Şartlarına Sahip FD Gözeneksiz Kirişlerin Maksimum Boyutsuz Yer Değiştirmelerinin Literatür ile Karşılaştırılması (Comparison of the Maximum Dimensionless Displacements of FD Non-Porous Beams with Different Boundary Conditions with the Literature)

Kiriş	Teori	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 5$	$k = 10$
$L / h = 5$						
A-A	Bu Çalışma	0,8574	1,6307	2,1325	2,8013	3,2132
	Turan (2018) ⁽¹⁾	0,8630	1,6403	2,1101	2,6477	3,0337
	Vo vd. (2015) ⁽²⁾	0,8501	1,6179	2,1151	2,7700	3,1812
B-B	Bu Çalışma	3,1652	6,2591	8,0683	9,8393	10,9424
	Turan (2018)	3,1657	6,2599	8,0303	9,6483	10,7194
	Vo vd. (2015)	3,1654	6,2594	8,0677	9,8281	10,9381
A-S	Bu Çalışma	28,7698	57,3583	73,6866	88,2935	97,4908
	Turan (2018)	28,7811	57,3774	73,5629	87,5977	96,6782
	Vo vd. (2015)	28,7555	57,3323	73,6482	88,2044	97,4151
$L / h = 20$						
A-A	Bu Çalışma	0,5932	1,1844	1,5207	1,8167	2,0033
	Turan (2018)	0,5936	1,1852	1,5194	1,8063	1,9909
	Vo vd. (2015)	0,5933	1,1843	1,5203	1,8155	2,0027
B-B	Bu Çalışma	2,8960	5,8043	7,4413	8,8182	9,6901
	Turan (2018)	2,8962	5,8049	7,4396	8,8069	9,6767
	Vo vd. (2015)	2,8962	5,8049	7,4421	8,8182	9,6905
A-S	Bu Çalışma	27,7021	55,5544	71,2062	84,2755	92,5587
	Turan (2018)	27,7034	55,5575	71,2005	84,2320	92,5074
	Vo vd. (2015)	27,7029	55,5546	71,2051	84,2712	92,5571

⁽¹⁾ Birinci mertebe kayma deformasyonu teorisine dayalı sonlu eleman çözümü

⁽²⁾ Üçüncü mertebe kayma deformasyonu teorisine dayalı analitik çözüm

Farklı sınır şartlarına sahip FD gözeneksiz kirişlerin maksimum boyutsuz yer değiştirmelerinin literatür ile karşılaştırılması Tablo 2'de görülmektedir. Bu çalışmanın sonuçları farklı sınır şartlarına, hacimsel değişim üsteline ve narinlik oranlarına göre birinci mertebe kayma deformasyonu teorisine dayalı sonlu eleman çözümü yapan Turan (2018) ve üçüncü mertebe kayma deformasyonu teorisine dayalı analitik çözüm yapan Vo vd. (2015) ile karşılaştırılmıştır. Tabloya bakıldığında sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. k 'nın artması ile bütün sınır şartlarında kirişin hacmindeki metal oranı arttığı için (rijitlik azalmakta) maksimum

boyutsuz yer değiştirmeler artmaktadır. Sınır şartları arasında bir kıyaslama yapılacak olursa beklenildiği gibi en büyük yer değiştirmeler konsol kirişte (A-S), en küçük yer değiştirmeler ise iki ucu ankastre kirişte (A-A) meydana gelmektedir. Narinliğin artması ile maksimum boyutsuz yer değiştirmeler azalmaktadır. Gerçekte bu durumun tersi beklenmektedir, ancak sonuçların bu şekilde çıkması boyutsuzlaştırmadan kaynaklanmaktadır.

Basit mesnetli FD gözeneksiz kirişin boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin literatür ile karşılaştırılması Tablo 3'de verilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları Vo vd. (2015) ile karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça uyumlu oldukları görülmüştür. Basit mesnetli FD gözeneksiz kirişlerde boyutsuz normal gerilmeler $\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$ hacimsel değişim üstelinin ve narinlik oranlarının artması ile artmaktadır. Boyutsuz kayma gerilmeleri $\bar{\tau}_{xz}(0,0)$ ise hacimsel değişim üstelinin artması ile düzenli bir değişim göstermemektedir. Narinliğin artması ile boyutsuz kayma gerilmeleri az da olsa artmaktadır.

Tablo 3. Basit Mesnetli FD Gözeneksiz Kirişin Boyutsuz Normal ve Kayma Gerilmelerinin Literatür ile Karşılaştırılması
(Comparison of Dimensionless Normal and Shear Stresses of Simply Supported FD Non-Porous Beam with Literature)

Kiriş	Teori	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 5$	$k = 10$
$L / h = 5$						
$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	Bu Çalışma	3,8021	5,8911	6,8893	8,1381	9,7314
	Vo vd. (2015) ⁽¹⁾	3,8020	5,8836	6,8826	8,1106	9,7122
$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	Bu Çalışma	0,7492	0,7492	0,6949	0,6310	0,6792
	Vo vd. (2015)	0,7332	0,7332	0,6706	0,5905	0,6467
$L / h = 20$						
$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	Bu Çalışma	15,0139	23,2068	27,1025	31,8219	38,1458
	Vo vd. (2015)	15,0129	23,2053	27,0991	31,8130	38,1385
$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	Bu Çalışma	0,7691	0,7691	0,7143	0,6496	0,6979
	Vo vd. (2015)	0,7451	0,7451	0,6824	0,6023	0,6596

⁽¹⁾ Üçüncü mertebeye kayma deformasyonu teorisine dayalı analitik çözüm

Tablo 4. Basit Mesnetli FDGB-1 Kirişlerin Maksimum Boyutsuz Yer Değiştirmelerinin Literatür ile Karşılaştırılması
(Comparison of Maximum Dimensionless Displacements of Simply Supported FDGB-1 Beams with the Literature)

k	Teori	$L/h = 5$			$L/h = 20$		
		$e = 0$	$e = 0,1$	$e = 0,2$	$e = 0$	$e = 0,1$	$e = 0,2$
0	Bu Çalışma	3,1652	3,3644	3,5904	2,8960	3,0782	3,2850
	Zouatina vd. (2017)	3,1654	3,3646	3,5906	2,8962	3,0785	3,2852
	Sayyad vd. (2022)	3,1224	3,3646	3,5906	2,8585	3,0785	3,2853
1	Bu Çalışma	6,2591	7,2504	8,6771	5,8043	6,7450	8,1083
	Zouatina vd. (2017)	6,2594	7,2507	8,6774	5,8049	6,7457	8,1093
	Sayyad vd. (2022)	6,2586	7,2507	8,6774	5,7292	6,7457	8,1093
2	Bu Çalışma	8,0683	10,0099	13,5429	7,4413	9,2846	12,6858
	Zouatina vd. (2017)	-	-	-	-	-	-
	Sayyad vd. (2022)	7,9627	10,0080	13,5410	7,3450	9,2855	12,6870
5	Bu Çalışma	9,8393	12,9412	20,1491	8,8182	11,6165	18,2691
	Zouatina vd. (2017)	9,8281	12,9180	20,0930	8,8182	11,6160	18,2670
	Sayyad vd. (2022)	9,6986	12,9160	20,0890	8,7031	11,6150	18,2660
10	Bu Çalışma	10,9424	14,5412	23,2139	9,6901	12,7848	20,2345
	Zouatina vd. (2017)	10,9380	14,5260	23,1350	9,6905	12,7840	20,2300
	Sayyad vd. (2022)	10,7940	14,5240	23,1280	9,5641	12,7840	20,2300

Tablo 4'de basit mesnetli FDGB-1 kirişlerin hacimsel değişim üsteline (k), gözeneklilik katsayısına (e) ve narinlik oranlarına (L/h) göre maksimum boyutsuz yer değiştirmelerinin literatür ile karşılaştırılması verilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre analitik çözüm yapan Zouatina vd. (2017) ve yüksek mertebeye hiperbolik dairesel kiriş teorisine göre analitik çözüm yapan Sayyad vd. (2022) ile karşılaştırılmıştır. Gözenekliliğin düzenli dağıldığı FDGB-1 için bu çalışmadan elde edilen sonuçlar literatür ile

oldukça uyumlu çıkmaktadır. Hacimsel değişim üstelinin ve gözeneklilik katsayısının artmasıyla (rijitlik azalmakta) FDGB-1 de maksimum boyutsuz yer değiştirmeler artmaktadır. Narinliğin artması ile boyutsuz yer değiştirmeler azalmaktadır.

Farklı sınır şartlarına sahip FD gözenekli kirişlerin maksimum boyutsuz yer değiştirmelerinin gözeneklilik katsayısına (e) ve hacimsel değişim üsteline (k) göre değişimi Tablo 5’de görülmektedir. Tabloya bakıldığında gözenekliliğin düzenli dağıldığı FDGB-1 ve gözenekliliğin düzensiz dağıldığı FDGB-2 arasında kıyaslama yapılabilmektedir. Aynı gözeneklilik oranına sahip FDGB-1’de maksimum boyutsuz yer değiştirmelerin FDGB-2’ye göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi FDGB-1’de FDGB-2’ye göre daha fazla boşluk oluşmakta ve rijitliği diğerine göre daha fazla düşmektedir. Rijitliği diğerine göre daha fazla düştüğü için maksimum boyutsuz yer değiştirmesi daha büyük çıkmaktadır. e ’nin üst sınırı gözeneklilik tiplerine göre değişmektedir. Tablo 5’de e değerlerinin 0,4’e kadar incelenmesinin sebebi, FDGB-1 için $k=2$ ve $e=0,45$ değerinin üzerinde kirişin Elastisite modülü eksi değerlere gitmektedir (Denklem 4’e göre). Elastisite modülü rijitliğe çarpan olarak girdiği için rijitliği düşürmektedir. Rijitliğin düşmesiyle yer değiştirmeler artmaktadır. FDGB-1 için $k=2$ ve $e=0,4$ değerinde Elastisite modülü kirişin alt kısmında sıfıra oldukça yakın olduğu için yer değiştirmesi diğerlerine göre büyük çıkmıştır. FDGB-2 için ise $k=2$ ve $e=0,95$ değerinin üzerinde kirişin Elastisite modülü eksi değerlere gitmektedir. Aynı zamanda önceki kısımda sınır şartlarına, hacimsel değişim üsteline, gözeneklilik katsayısına ve narinlik oranlarına göre yapılan yorumlar burada aynen geçerli olmaktadır.

Tablo 6’da basit mesnetli farklı tip FD gözenekli kirişin boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin gözeneklilik katsayısına ve hacimsel değişim üsteline göre değişimi verilmektedir. Burada $k=0$ için FDGB-1 de normal gerilmeler FDGB-2’den küçük olmaktadır. $k=1$ ve 2 için ise de normal gerilmeler FDGB-2’den büyük çıkmaktadır. k ’nın her değeri için boyutsuz kayma gerilmesi FDGB-1’de FDGB-2’ye göre daha büyük olmaktadır.

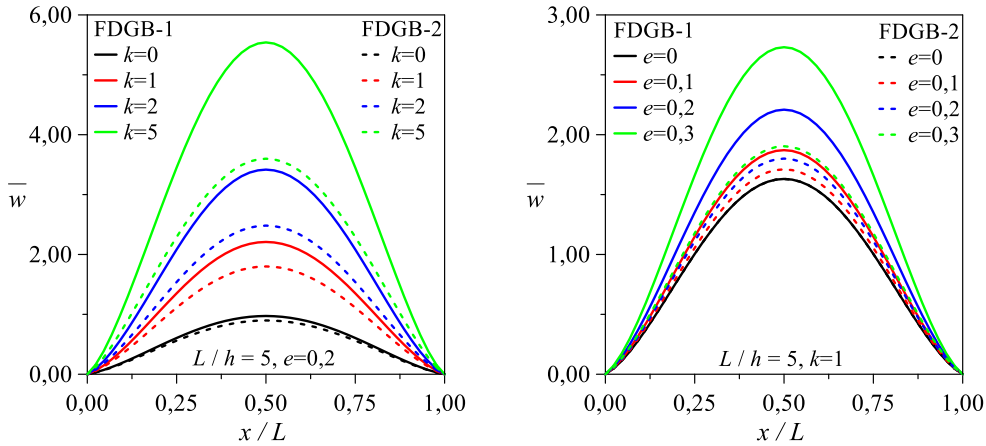
Tablo 5. Farklı Sınır Şartlarına Sahip FD Gözenekli Kirişlerin Maksimum Boyutsuz Yer Değiştirmelerinin Gözeneklilik Katsayısına (e) ve Hacimsel Değişim Üsteline (k) göre Değişimi (Variation of Maximum Dimensionless Displacements of FD Porous Beams with Different Boundary Conditions According to Porosity Coefficient (e) and Power-Law Exponent (k))

		A-A		B-B		A-S	
k	e	FDGB -1	FDGB -2	FDGB -1	FDGB -2	FDGB -1	FDGB -2
$L/h = 5$							
0	0,1	0,9114	0,8771	3,3644	3,2200	30,5805	29,2301
	0,2	0,9726	0,8980	3,5904	3,2770	32,6344	29,7072
	0,3	1,0426	0,9203	3,8489	3,3367	34,9841	30,2021
	0,4	1,1235	0,9442	4,1475	3,3992	37,6983	30,7161
1	0,1	1,8711	1,7104	7,2504	6,5305	66,5717	59,7743
	0,2	2,2090	1,8005	8,6771	6,8350	79,8882	62,4791
	0,3	2,7307	1,9037	10,9473	7,1805	101,1956	65,5390
	0,4	3,6834	2,0234	15,2599	7,5775	141,9472	69,0437
2	0,1	2,6017	2,2903	10,0099	8,6057	91,7350	78,4640
	0,2	3,4166	2,4819	13,5429	9,2542	124,8610	84,2141
	0,3	5,3730	2,7211	22,6122	10,0580	210,9009	91,3246
	0,4	28,7759	3,0301	139,5357	11,0904	1333,4587	100,4316
$L/h = 20$							
0	0,1	0,6306	0,6026	3,0782	2,9399	29,4456	28,1201
	0,2	0,6729	0,6123	3,2850	2,9853	31,4232	28,5511
	0,3	0,7213	0,6223	3,5215	3,0321	33,6857	28,9956
	0,4	0,7773	0,6327	3,7947	3,0804	36,2993	29,4543
1	0,1	1,3751	1,2340	6,7450	6,0444	64,5671	57,8477
	0,2	1,6509	1,2896	8,1083	6,3128	77,6326	60,4107
	0,3	2,0927	1,3524	10,2971	6,6159	98,6169	63,3046
	0,4	2,9383	1,4243	14,5007	6,9624	138,9361	66,6123
2	0,1	1,8943	1,6189	9,2846	7,9158	88,8662	75,7378
	0,2	2,5810	1,7369	12,6858	8,4862	121,4716	81,1838
	0,3	4,3675	1,8829	21,5822	9,1905	206,8255	87,9078
	0,4	27,6666	2,0698	138,4261	10,0912	1329,0207	96,5052

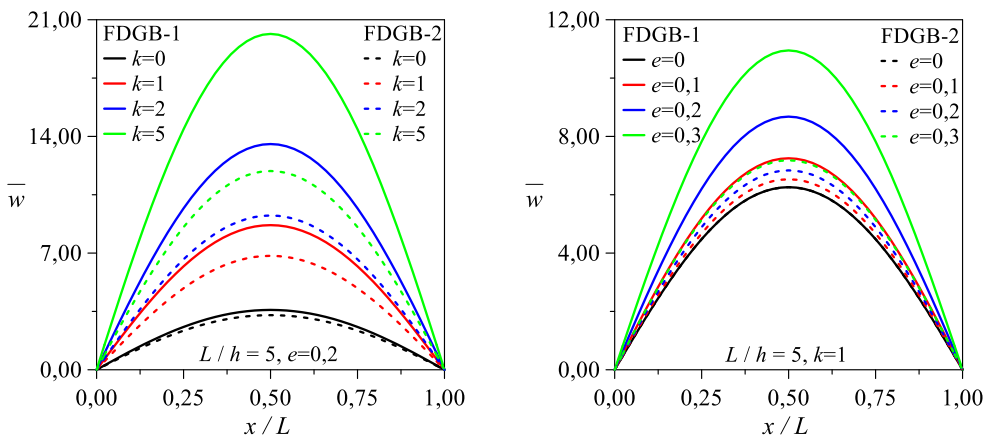
Tablo 6. Basit Mesnetli FD Gözenekli Kirişin Boyutsuz Normal Ve Kayma Gerilmelerinin Gözeneklilik Katsayısına (e) ve Hacimsel Değişim Üsteline (k) Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Normal and Shear Stresses of Simply Supported FD Porous Beam with Respect to Porosity Coefficient (e) and Power-Law Exponent (k))

k	e	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$		$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$		$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$		$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	
		$L/h = 5$				$L/h = 20$			
		FDGB-1	FDGB-2	FDGB-1	FDGB-2	FDGB-1	FDGB-2	FDGB-1	FDGB-2
0	0,1	3,8021	3,8609	0,7492	0,7359	15,0139	15,2399	0,7677	0,7542
	0,2	3,8021	3,9217	0,7492	0,7214	15,0139	15,4729	0,7677	0,7395
	0,3	3,8021	3,9846	0,7492	0,7056	15,0139	15,7131	0,7677	0,7234
1	0,1	6,2199	6,0352	0,7493	0,7255	24,5364	23,7856	0,7695	0,7450
	0,2	6,7065	6,1965	0,7493	0,6980	26,4642	24,3994	0,7702	0,7170
	0,3	7,4866	6,3692	0,7494	0,6656	29,5607	25,0530	0,7713	0,6841
2	0,1	7,5756	7,1216	0,6841	0,6548	29,8104	27,9780	0,7040	0,6736
	0,2	8,8097	7,3798	0,6669	0,6049	34,7035	28,9437	0,6876	0,6228
	0,3	11,9499	7,6720	0,6317	0,5408	47,2385	30,0260	0,6544	0,5574

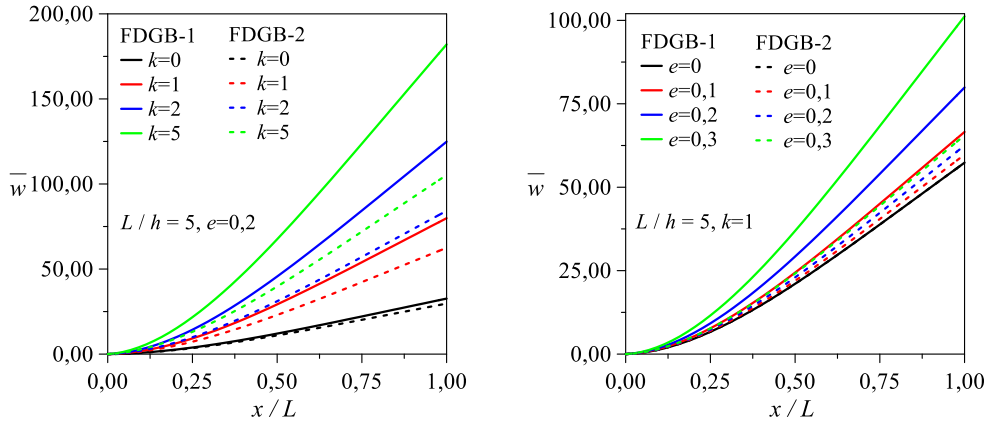
İki ucu ankastre FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz yer değiştirmelerin k , e ve x/L 'ye göre değişimi Şekil 5'de verilmektedir. $L/h=5$ ve $e=0,2$ için maksimum boyutsuz yer değiştirme kirişin orta kesitinde meydana gelmektedir. FDGB-1 ve FDGB-2 için en büyük yer değiştirmeler $k=5$ ve $e=0,3$ olması durumunda oluşmaktadır. $e=0,2$ sabit tutulup k arttırıldığında yer değiştirmeler artmaktadır. $k=1$ alınıp e arttırıldığında yer değiştirmeler yine artmaktadır. Bunun sebebi e ve k 'nin artması kirişin rijitliğini azaltmasıdır. Ayrıca FDGB-1'de yer değiştirmelerin FDGB-2'ye göre daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 6'da basit mesnetli FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz yer değiştirmelerin k , e ve x/L 'ye göre değişimi gösterilmektedir. Bu sınır şartında A-A'ya göre kirişin yer değiştirmesinin büyüklüğü ve formu değişse bile yapılan yorumlar aynen geçerlidir.



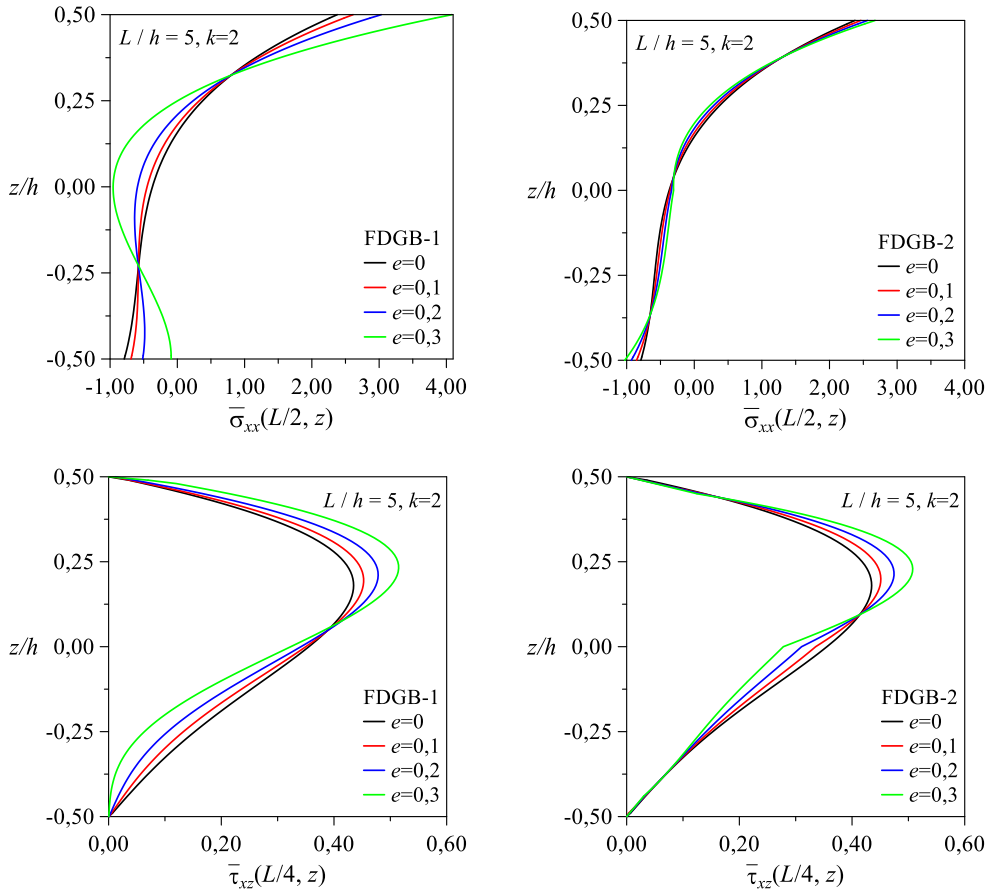
Şekil 5. İki Ucu Ankastre FDGB-1 ve FDGB-2 için Boyutsuz Yer Değişimlerinin k , e ve x/L 'ye Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Displacements with Respect to k , e , and x/L for Clamped-Clamped FDGB-1 and FDGB-2)



Şekil 6. Basit Mesnetli FDGB-1 ve FDGB-2 için Boyutsuz Yer Değişimlerinin k , e ve x/L 'ye Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Displacements with Respect to k , e , and x/L for Simply Supported FDGB-1 and FDGB-2)



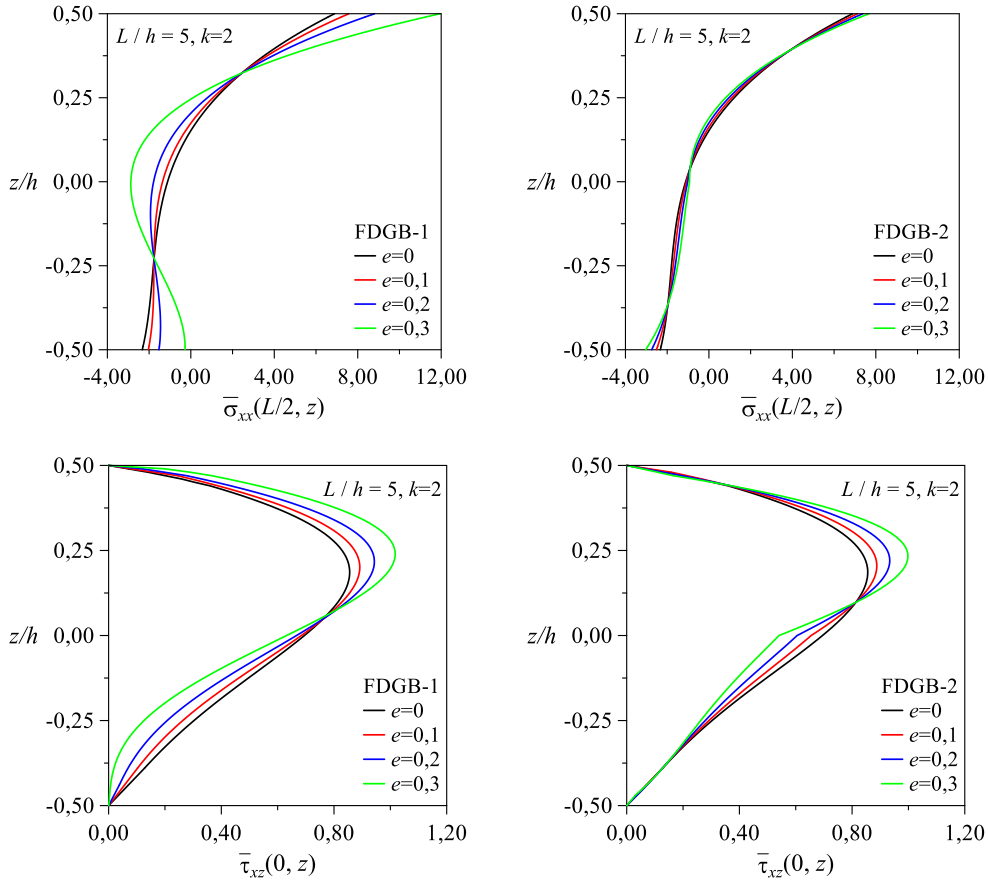
Şekil 7. Konsol FDGB-1 ve FDGB-2 için Boyutsuz Yer Değiştirmelerin k , e ve x/L 'ye Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Displacements with Respect to k , e , and x/L for Clamped-Free FDGB-1 and FDGB-2)



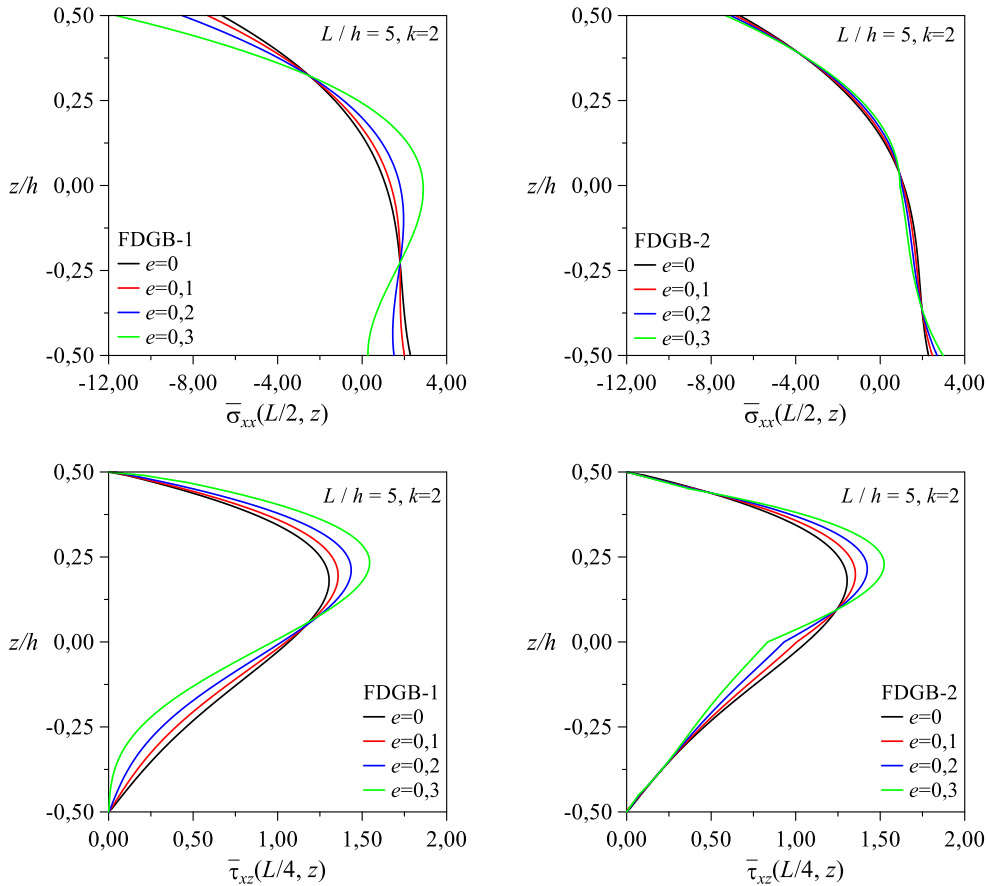
Şekil 8. İki Ucu Ankastre FDGB-1 ve FDGB-2 için Boyutsuz Normal ve Kayma Gerilmelerinin e ve z/h 'ye Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Normal and Shear Stresses with Respect to e and z/h for Clamped-Clamped FDGB-1 and FDGB-2)

Şekil 7'de konsol FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz yer değiştirmelerin k , e ve x/L 'ye göre değişimi görülmektedir. Burada maksimum boyutsuz yer değiştirmeler konsolun serbest ucunda meydana gelmektedir. Ayrıca yer değiştirmeler en büyük değerlerine e ve k 'nın maksimum değerlerinde ulaşmaktadır.

İki ucu ankastre FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin e ve z/h 'ye göre değişimi Şekil 8'de verilmektedir. Boyutsuz normal gerilmelere kirişin orta kesitinde bakılmaktadır. $L/h=5$ ve $k=2$ için FDGB-1'de mutlak değerce en büyük boyutsuz normal gerilme kesitin üst yüzeyinde meydana gelmektedir. FDGB-1'de gözeneklilik katsayısı arttıkça kesitin üstünde normal gerilmeler artmakta, kesitin alt yüzeyinde ise mutlak değerce azalmaktadır. FDGB-2'de ise gözeneklilik katsayısının artması ile normal gerilmelerde FDGB-1'deki gibi belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Boyutsuz kayma gerilmelerine $L/4$ 'de bakılmaktadır. En büyük kayma gerilmeleri kesitin yaklaşık $z/h=0,25$ 'lik kısmında meydana gelmektedir. Beklenildiği gibi kesitin altında ve üstünde kayma gerilmesi sıfır çıkmaktadır. FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz kayma gerilmelerinin maksimum değerleri gözeneklilik katsayısının artması ile doğru orantılıdır.



Şekil 9. Basit Mesnetli FDGB-1 ve FDGB-2 için Boyutsuz Normal ve Kayma Gerilmelerinin e ve z/h 'ye Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Normal and Shear Stresses with Respect to e and z/h for Simply Supported FDGB-1 and FDGB-2)



Şekil 10. Konsol FDGB-1 ve FDGB-2 için Boyutsuz Normal ve Kayma Gerilmelerinin e ve z/h 'ye Göre Değişimi (Variation of Dimensionless Normal and Shear Stresses with Respect to e and z/h for Clamped-Free FDGB-1 and FDGB-2)

Şekil 9'da basit mesnetli FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin e ve z/h 'ye göre değişimi verilmektedir. Burada iki ucu ankastre kirişlere göre boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin büyüklükleri değişse bile A-A kirişler için yapmış olduğumuz yorumlar aynen geçerlidir.

Konsol FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin e ve z/h 'ye göre değişimi Şekil 10'da görülmektedir. Konsol kirişte boyutsuz normal gerilmelere kirişin orta kesitinde bakılmaktadır. Burada kiriş kesitinde çekme ve basınç bölgesi yer değiştirmektedir. Çekme bölgesi kiriş kesitinin altında basınç bölgesi ise üstünde meydana gelmektedir. Mutlak değerce en büyük normal gerilmeler kesitin üst yüzeyinde oluşmaktadır. FDGB-1'de gözeneklilik katsayısı arttıkça kesitin üstünde mutlak değerce normal gerilmeler artmaktadır. Kesitin alt yüzeyinde ise azalmaktadır. FDGB-2'de ise gözeneklilik katsayısının değişimi ile normal gerilmelerde FDGB-1'deki gibi belirgin bir değişim söz konusu değildir. Konsol FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz kayma gerilmelerinin büyüklükleri farklı olsa da gerilmelerin değişimi diğer sınır şartlarına benzemektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, trigonometrik kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre farklı tip FD gözenekli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle statik analizi incelenmiştir. Sonlu eleman yöntemi için üç düğüm noktalı 12 serbestlik dereceli yüksek mertebeli sonlu kiriş elemanı önerilmiştir. Düzgün yayılı yük (q_0) altında çeşitli sınır şartlarına sahip FD gözenekli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle, hacimsel değişim üsteline (k), gözeneklilik katsayısına (e) ve narinlik oranlarına (L/h) göre boyutsuz yer değiştirme değerleri, boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında çıkarılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Önerilen yüksek mertebeli sonlu kiriş elemanı, farklı sınır koşullarına sahip FD gözenekli kirişlerin yer değiştirme ve gerilmelerini doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Önerilen sonlu eleman modelinin hesaplamadaki doğruluğu ve performansı yeterlidir. Ayrıca, bu modelin en önemli avantajları; etkin ve hızlı bir çözüm yapması ve kayma gerilmelerini doğru bir şekilde tahmin etmesidir.
- Hacimsel değişim üstelinin ve gözeneklilik katsayısının artmasıyla (rijitlik azalmakta) FDGB-1 ve FDGB-2'de maksimum boyutsuz yer değiştirmeler artmaktadır.
- Aynı gözeneklilik oranına sahip FDGB-1'de maksimum boyutsuz yer değiştirmelerin FDGB-2'ye göre daha yüksek olmaktadır. FDGB-1'de FDGB-2'ye göre daha fazla boşluk oluşmakta ve rijitliği diğerine göre daha fazla düşmektedir.
- Kirişin orta kesiti için FDGB-1 ve FDGB-2'de mutlak değerce en büyük boyutsuz normal gerilme kesitin üst yüzeyinde meydana gelmektedir.
- FDGB-1 ve FDGB-2 için boyutsuz kayma gerilmelerinin maksimum değerleri gözeneklilik katsayısının artması ile doğru orantılıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Akbaş, Ş. D., 2018. Forced vibration analysis of functionally graded porous deep beams. *Composite Structures*, 186(December 2017), 293–302.
- Alnujaie, A., Akbas, S. D., Eltaher, M. A., Assie, A. E., 2021. Damped forced vibration analysis of layered functionally graded thick beams with porosity. *Smart Structures and Systems*, 27(4), 679–689.
- Avcar, M. 2019. Free vibration of imperfect sigmoid and power law functionally graded beams. *Steel and Composite Structures*, 30(6), 603–615.
- Avcar, M., Mohammed, W.K.M., 2017. Winkler zemin ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin kirişin frekans parametrelerine etkilerinin incelenmesi. 5(3), 573–580.
- Chami, G. M. B., Kahil, A., Hadji, L., 2022. Influence of porosity on the fundamental natural frequencies of FG sandwich beams. *Materials Today: Proceedings*, 53, 107–112.
- Chen, D., Yang, J., Kitipornchai, S., 2015. Elastic buckling and static bending of shear deformable functionally graded porous beam. *Composite Structures*, 133, 54–61.
- Derikvand, M., Farhatnia, F., Hodges, D. H., 2021. Functionally graded thick sandwich beams with porous core: Buckling analysis via differential transform method. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 0(0), 1–28.
- Ebrahimi, F., Ghasemi, F., Salari, E., 2016. Investigating thermal effects on vibration behavior of temperature-dependent compositionally graded Euler beams with porosities. *Meccanica*, 51(1), 223–249.
- Ferreira, A. J. M., Roque, C. M. C., Jorge, R. M. N. 2005. Analysis of composite plates by trigonometric shear deformation theory and multiquadrics. *Computers and Structures*, 83(27), 2225–2237.
- Fouda, N., El-midany, T., Sadoun, A. M., 2017. Bending, buckling and vibration of a functionally graded porous beam using finite elements. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 3(4), 274–282.

- Gao, K., Li, R., Yang, J., 2019. Dynamic characteristics of functionally graded porous beams with interval material properties. *Engineering Structures*, 197(July), 109441.
- Hadji, L., Zouatnia, N., Bernard, F., 2019. An analytical solution for bending and free vibration responses of functionally graded beams with porosities: Effect of the micromechanical models. *Structural Engineering and Mechanics*, 69(2), 231–241.
- Hamed, M. A., Sadoun, A. M., Eltaher, M. A., 2019. Effects of porosity models on static behavior of size dependent functionally graded beam. *Structural Engineering and Mechanics*, 71(1), 89–98.
- Kahya, V., Turan, M., 2017. Finite element model for vibration and buckling of functionally graded beams based on the first-order shear deformation theory. *Composites Part B: Engineering*, 109, 108–115.
- Kahya, V., Turan, M., 2018. Vibration and stability analysis of functionally graded sandwich beams by a multi-layer finite element. *Composites Part B: Engineering*, 146, 198–212.
- Kitipornchai, S., Chen, D., Yang, J., 2017. Free vibration and elastic buckling of functionally graded porous beams reinforced by graphene platelets. *Materials and Design*, 116, 656–665.
- Nguyen, N. D., Nguyen, T. N., Nguyen, T. K., Vo, T. P., 2022. A new two-variable shear deformation theory for bending, free vibration and buckling analysis of functionally graded porous beams. *Composite Structures*, 282, 115095.
- Sayyad, A. S., Avhad, P. V., Hadji, L., 2022. On the static deformation and frequency analysis of functionally graded porous circular beams. *Forces in Mechanics*, 7, 100093.
- Taşkın, V., Demirhan, P. A., 2020. Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin serbest titreşim analizi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, 8(1), 49–60.
- Turan, M., 2018. Tabakalı kirişlerin statik, serbest titreşim ve burkulma analizleri için bir sonlu eleman modeli. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Inam, F., Lee, J., 2015. Static behaviour of functionally graded sandwich beams using a quasi-3D theory. *Composites Part B: Engineering*, 68, 59–74.
- Wattanasakulpong, N., Chaikittiratana, A., 2015. Flexural vibration of imperfect functionally graded beams based on Timoshenko beam theory: Chebyshev collocation method. *Meccanica*, 50(5), 1331–1342.
- Zghal, S., Ataoui, D., Dammak, F., 2020. Static bending analysis of beams made of functionally graded porous materials. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50(3), 1012–1029.
- Zouatnia, N., Hadji, L., Kassoul, A., 2017. An analytical solution for bending and vibration responses of functionally graded beams with porosities. *Wind and Structures*, 25(4), 329–342.



OTELLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ İYİLEŞTİRMEYE YÖNELİK ÇEŞİTLİ YAKLAŞIMLARIN TASARRUF ORANLARINA ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: ANTALYA ÖRNEĞİ

Seren Öykü YAZGAN¹, Sezgi KOÇAK SOYLU^{1*}

¹ Antalya Bilim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Enerji Verimliliği,
Otel Uygulamaları,
Elektrik Tüketimi,
Tasarruf.*

Öz

Türkiye'deki ticari yapılar arasında %35'lik oranla en yüksek enerji tüketimine sahip olan otel binalarında, enerji verimliliği potansiyelinden istifade edilmesi, sürdürülebilir enerji kullanımı için bir gereklilik haline gelmiştir. Bu çalışmada, enerji verimliliğini arttırmaya yönelik on iki farklı yaklaşım, Antalya'da beş yıldızlı anonim bir şehir oteli için, altı referans çalışma dikkate alınarak değerlendirilmiş, önerilen uygulamaların olası tasarruf oranlarına etkisi karşılaştırılmıştır. Antalya ili, turizm tesis sayısının fazlalığı ile enerji verimliliği konusunda yüksek bir potansiyele sahiptir. Analiz edilen yöntemlerin anonim otelde uygulanması halinde, 332.596 TL/yıl ile 4.951.982 TL/yıl arasında tasarruf sağlanabileceği belirlenmiştir. Ön görülen tasarruf miktarının en iyi durumda 5 milyon TL'ye yakın olduğu düşünüldüğünde, otelin yaklaşık olarak 12.318.362 TL/yıl olan birincil enerji tüketim giderinde önemli bir azalma sağlanacağı açıktır. Her bir yaklaşımın ilk yatırım ve işletme maliyetleri birbirinden farklı olduğu için, geri ödeme sürelerine bağlı olarak elde edilecek ekonomik fayda yerine muhtemel tasarruf miktarlarına odaklanılmıştır. Bununla birlikte, tüm yaklaşımlar arasından aydınlatma kontrolünün, ilk aşama için basit ve ekonomik bir yaklaşım olacağı söylenebilir.

COMPARISON OF THE EFFECTS OF VARIOUS APPROACHES TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY IN HOTELS: ANTALYA CASE

Keywords

*Energy efficiency,
Hotel applications,
Electricity consumption,
Savings.*

Abstract

The utilization of the energy efficiency potential in hotel buildings, which has the highest energy consumption rate of 35% among commercial buildings in Turkey, has become a necessity for sustainable energy use. In this study, twelve approaches in six reference studies were used to examine the energy efficiency improvement potential of a five-star anonymous city hotel in Antalya. On prospective savings rates, the impact of suggested approaches was compared. Antalya province has great potential in terms of energy efficiency with a high number of tourism facilities. It has been determined that the annual savings will be between 332,596 TL and 4,951,982 TL if the methods examined are applied in the hotel. Considering that the anticipated savings are close to 5 million TL in the best case, a significant reduction will be achieved in the hotel's primary energy consumption price, which is approximately 12,318,362 TL/year. Since the initial investment and operating costs of each approach differ, the focus is on possible savings instead of economic benefits depending on payback periods. However, among all the approaches, it is possible to say that lighting control will be a simple and economical approach initially.

Alıntı / Cite

Yazgan, S. Ö., Koçak Soylu, S., (2022), Otelde Enerji Verimliliğini İyileştirmeye Yönelik Çeşitli Yaklaşımların Tasarruf Oranlarına Etkisinin Karşılaştırılması: Antalya Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1375-1388.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Ö. Yazgan, 0000-0002-1415-6351
S. Koçak Soylu, 0000-0001-5042-7836

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.01.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	27.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.08.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

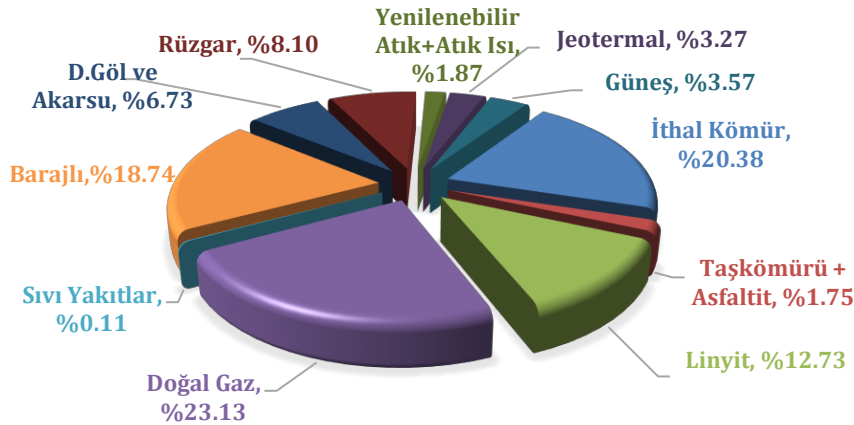
* İlgili yazar / Corresponding author: sezgi.kocak@antalya.edu.tr, +90 (242) 245 00 00

1. Giriş (Introduction)

Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan, birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Enerjiyi verimli kullanabilmek için; üretim, dağıtım ve tüketim aşamalarında kayıpları mümkün olduğunca en aza indirmek gerekir. Bu amaç doğrultusunda öncelikli alınacak aksiyonlar; enerjinin işe dönüşümünde etkin kontrol sağlanması, işe dönüştürülmeyen enerjinin (atık enerji) geri kazanımı ve verimli ekipman kullanımı şeklinde ifade edilebilir. Enerji tasarrufu ise verimlilikten farklı bir kavramdır. Enerji tasarrufu, tüketicilerin kendi inisiyatifleri ile aldıkları önlemler sonucu tüketim miktarında elde edilen azalmadır. Enerji tasarrufu ihtiyaç fazlası olan kaynakların kullanımının sonlandırılması olarak nitelendirilirken, verimlilik kullanılan enerji kaynağından daha az enerji tüketen bir kaynak tercihi şeklinde açıklanabilir. Örneğin, enerjiyi verimli kullanan bir lamba tercih etmek verimlilik kavramına girerken, fazladan yanan bir lambayı söndürmek, tasarrufu tanımlar (Öz, 2015). Enerji tüketiminde tasarrufa gitmek, sadece ekonomik yönden fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda doğanın korunmasına da yardımcı olur. Özellikle küresel ısınmanın göz ardı edilemeyecek bir problem haline geldiği günümüzde, enerjinin bilinçli bir şekilde kullanılması oldukça önemlidir.

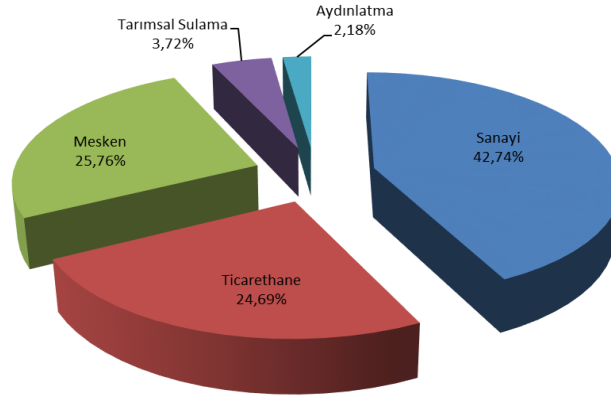
Enerji verimliliğini arttırıcı önlemler almak, gereksiz tüketimlerin önüne geçerek ekonomik kazanç sağlamak ve enerjinin bilinçli kullanımı için önemli olmakla beraber, Türkiye'nin enerji sektöründe dışa bağımlılığını azaltmak için de bir zorunluluk haline de gelmiştir. Şekil 1 ile verilen Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde, 2020 yılında elektrik üretiminde birincil enerji kaynaklarından %23,13 oran ile doğalgaz ve %20,38 oran ile ithal kömür kullanılması, elektrik üretiminde neredeyse %45'lere varan dışa bağımlılık varlığını ortaya koymuştur (TEİAŞ, 2020). Türkiye'de elektrik üretimi yapan lisanslı santrallerin %33,82'si doğal gaz ve ithal kömür gibi ithal kaynaklardan; %20,53'ü nükleer santral (Akkuyu NGS) için uranyum ithalinden olmak üzere toplam %54,35'i yurt dışından temin edilecek yakıtlar ile işletilecek santrallerden oluşmaktadır. Bu durum, mevcut dışa bağımlılık oranını azaltmayacağı gibi, dışa bağımlılığı daha da arttıracaktır (TMMOB, 2020).

Hali hazırda oldukça yüksek oranda dış kaynak kullanımı gerektiren enerji üretiminin, önümüzdeki yıllarda artması beklenen enerji talebi ile daha da fazla kaynak arayışına gireceği açıktır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayımlanan rapora göre, 2020 yılında yaklaşık 305 TWh olarak gerçekleşen elektrik talebinin önümüzdeki 20 yıllık dönemde tüm senaryolar dikkate alındığında, yıllık ortalama %2,9-3,7 arasındaki artış oranı ile 545-636 TWh bandında gerçekleşeceği öngörülmüştür. Elektrik enerjisi talep artış oranının %3,4 olduğu ve bu şekilde, kişi başı elektrik tüketiminin 5,430-6,336 kWh bandına yükseleceği öngörülmüştür (ETKB, 2020).



Şekil 1. 2020 Yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (Distribution of Turkey's electricity production in 2020 by resources) (%), (TEİAŞ, 2020).

Enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı değerlendirildiğinde, Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) 2020 yılı "Elektrik Sektör Raporu" na göre, Türkiye'de en yüksek elektrik tüketiminin %42,74 pay ile sanayi sektöründe gerçekleştiği görülmektedir. Meskenler tüketimde %25,76'lık bir oran ile ikinci sırada yer alırken, ticarethaneler ise %24,69'luk bir oranla elektrik kullanımında üçüncü sırada yer almaktadır (Şekil 2) (T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020). Artan enerji maliyetleri, yüksek miktarlarda elektrik enerjisi kullanan tüm sektörlerde ekonomik zorluklara neden olmaktadır. Aylık ve yıllık enerji harcamalarında görülen artış, işletmelerdeki giderlerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Oysa bazı küçük değişiklikler ve enerji verimliliğini arttırmaya yönelik çözümler ile bu giderleri düşürmek mümkündür.



Şekil 2. 2020 Yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (Distribution of billed consumption in 2020 by consumer type) (%) (T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020)

Antalya ili, iklimi, doğal güzellikleri ve konumu ile tercih edilen bir turizm kentidir. Antalya ilinde Türkiye Cumhuriyeti Kültür ve Turizm Bakanlığı verilerine göre bakanlık tarafından belgelendirilmiş 540 adet, toplamda ise 905 adet konaklama tesisi bulunmaktadır. Yılın neredeyse yedi ayı boyunca turizm faaliyetlerinin yoğun olarak gerçekleştiği bölgede, pandemi koşulları nedeni ile son iki yılda bir miktar azalma görülse de ortalama olarak yıllık 10 milyon turist ağırlanmaktadır. İnsanlar gittikleri yerlerde rahat etmek, konforlu bir şekilde konaklamak istemektedir. Konfor isteği ve konfor şartlarını sağlama gereksinimi ise enerji talebini ve tüketimini artırmaktadır (Öztür vd., 2018). Bu nedenle yoğun enerji kullanımının olduğu konaklama tesislerinde, enerji tasarrufu ve enerji verimliliğini arttırmaya yönelik önlemlerin tespiti ve uygulaması büyük önem arz etmektedir. Turizm sektöründeki enerji giderlerinin, toplam giderler arasındaki payı yaklaşık olarak %8 ile %12 arasındadır. Enerji giderleri içerisindeki en büyük pay ise ısıtma, aydınlatma ve sıcak su kullanımına aittir. Tüm bu giderler için ise %40'lık bir enerji tasarruf potansiyeli olduğu bilinmektedir (Öztürk vd., 2018). Bu nedenle aydınlatma kontrolü, ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik olarak yalıtım ve çift cam kullanımı gibi uygulamaların mevcut tesisler için tasarruf potansiyeli araştırılmalıdır.

Ticari binalar içerisinde yer alan otel binaları, değişken bina geometrileri, çok sayıda farklı fonksiyonel mekânlara sahip olmaları ve farklı çalışma zaman çizelgeleri ile enerji verimliliği açısından karakteristiği birbirinden oldukça farklı durumları içermektedir. Bu nedenlerle de otel binaları için yapılacak enerji verimliliği çalışmaları, binaların özgün yapılarından dolayı münferit olarak ele alınmalıdır (Atmaca, 2016). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre binalarda enerji tüketiminin en büyük kısmını %35'lik oranla otellerin aldığı düşünüldüğünde, bu tesislerde tasarruf edici önlemler alma yönünde adımlar atılması bir gereklilik haline gelmiştir (Atmaca ve Yılmaz, 2019).

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Binalarda enerji verimliliği performansı; aktif ve pasif olarak sınıflandırılan yöntemler kullanılarak doğrudan ya da dolaylı olarak artırılabilir. Pasif yöntemler, binanın mimari tasarım kriterleri ile doğrudan ilişkilidir. Henüz mekanik sistemler gelişmeden önce geleneksel olarak inşa edilen binalarda bu pasif yöntemleri gözlemlemek mümkündür. Sıcak ve kuru iklim bölgesine özgü avlulu Mardin evleri buna örnek olarak gösterilebilir. Pasif yöntemlerin amacı, insan ısı konfor gereksinimleri azaltılmadan, uygun iklim kaynaklarının rasyonel kullanımı yoluyla olumsuz faktörleri ortadan kaldırarak ısıtma ve klima tüketimini azaltıp, düşük enerji tüketen binalar ortaya koymaktır (Wang vd., 2013).

Literatürde yapılmış bir çalışmada Ozalp vd., (2019), binaların tasarımında farklı yapı ve yalıtım malzemelerinin kullanılması durumunda oluşabilecek ısı kayıplarının sayısal olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, Kahramanmaraş ilinde yer alan bir model bina için hesaplamalar yapılmıştır. Duvar yapı malzemesinin ısı kayıpları üzerindeki etkisinin yalıtım malzemesine göre çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yalıtımsız bina modeline ısı yalıtımı uygulamasının ardından, yalıtım uygulaması için gereken ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresinin, ısıtma enerjisi ihtiyacı için kullanılan yakıtın cinsine göre 0,25 ile 1,74 yıl arasında değiştiği görülmüştür. Bu durumun, bina ısıtma ihtiyacında düşüşe sebep olarak enerjide ne kadar bir tasarruf sağlayacağı ortaya konmuştur. İlgili çalışma ile briket duvar modelinin ısıtma ihtiyacı ve aylık yakıt tüketiminin, diğer yapı malzemelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Briket duvar modelinde yalıtım uygulanması halinde, aylık ısıtma ihtiyacının yaklaşık olarak 4.600 kWh'den 1.700 kWh'e kadar düştüğü tespit edilmiştir. Buna ek olarak, aylık yakıt giderlerinden elde edilen tasarrufların ise ısıtmada kullanılan doğal gaz, kömür ve fuel-oil gibi yakıt tiplerine göre yaklaşık olarak 4.000 TL, 2.900 TL ve 6.100 TL olacağı hesaplanmıştır (Ozalp vd., 2019).

Sıklıkla tercih edilen pasif enerji verimliliği uygulamalarından bir tanesi “pasif güneş enerjisi evleri (passive solar house)” dir. Pasif güneş enerjisi tasarımı, enerji kullanımını en aza indirmek için bir binanın sahasından, ikliminden ve malzemelerinden yararlanır. İyi tasarlanmış bir pasif güneş enerjisi evi, önce enerji verimliliği stratejileriyle ısıtma ve soğutma yüklerini azaltır ve daha sonra bu azaltılmış yükleri tamamen veya kısmen güneş enerjisiyle karşılar. Modern evlerin küçük ısıtma yükleri nedeniyle, güneşe bakan camların aşırı boyutlandırılmasından kaçınmak, ilkbahar ve sonbaharda aşırı ısınmayı ve artan soğutma yüklerini önlemek için güneşe bakan camın uygun şekilde gölgelenmesini sağlamak çok önemlidir. Bu doğrultuda yapılan bir çalışmada, Cherier vd. (2020) sahra ikliminde güneş enerjisiyle pasif ısıtma uygulamasının enerji verimliliği ve ısı konforu üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada, pasif güneş ısıtma katkısının toplam ısıtma yükü içerisindeki payının %8,06 olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar, ihtiyaç duyulan toplam enerji tüketiminin yaklaşık 441,27 kWh/m²yıl ve bu tüketime göre de binanın “F tipi: yüksek enerji talebi olan bina” olduğunu göstermiştir. Binadaki bu yüksek ısıtma ihtiyacının yalıtım eksikliğinden kaynaklandığı ve ısı yalıtım uygulaması ile ihtiyacın %60,40 oranında düşürülebileceği belirlenmiştir. Böylece binanın enerji etiketlemesine göre de D sınıfına yükseltilebileceği ön görülmüştür.

Daha önce de belirtildiği gibi pasif sistemler ile binaların hem çevre dostu hem de sürdürülebilir enerji tasarrufu açısından iyileştirilebilmesi, tasarım ve kullanım aşamalarında alınan kararlar ve yapılan değişiklikler ile mümkün olabilmektedir. Konu ile ilgili yapılan başka bir çalışmada, ülkemizde sürdürülebilir binaların ısıtma-soğutma sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi kaynaklı pasif yöntemler kullanılarak tasarlanması ele alınmıştır. Türkiye, coğrafi konumu ve iklim özellikleri ile dünyadaki birçok ülkeden daha fazla güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda, yılda ortalama 2.640 saat güneşlenme süresi ve 1.311 kWh/m²'nin üzerinde güneş radyasyon gücüne sahip olan ülkemizde, mevcut güneş enerjisi potansiyelinin verimli ve aktif kullanımı ile yıllık 1.015 kWh enerji elde edilebileceği tahmin edilmektedir. Yapılan çalışmada, en yaygın kullanılan pasif yöntemlerden; binada doğrudan depolanan güneş enerjisinin, binayı bir enerji emici olarak hareket etmeye zorlayacak sera etkisi yaratmak için kullanmayı amaçlayan doğrudan geri dönüş sistemi örnek olarak verilmiştir. Bu sistemin verimli bir şekilde uygulanabilmesi için güneş ışığının emildiği ve depolandığı açıklıklarda ısı kaybı en aza indirilmelidir. Depolanan enerjinin iç mekâna aktarılması ve ısı konforu optimize etmek için iç mekânların küçük ve ısı emici kütle alanının ise geniş tutulması gerektiği de belirtilmiştir. Son olarak çalışmada, pasif ısıtma ve soğutma sistemleri bina tasarım aşamasında ekstra bir mali yük getirmediğinden, bu sistemlerle inşa edilen binaların çevre dostu, enerji verimlilikleri ve karşılanabilir maliyetleri sayesinde Türkiye ekonomisine yardımcı olacağı önemi de vurgulanmıştır. (Dikmen vd., 2011).

Bir başka pasif enerji uygulaması örneği ise Douthat vd.(2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan görülebilir. Araştırmacılar, deneysel olarak ölçülen bina stokları ve gözlemlenen konut enerji tüketimi ile büyük ölçekli etkilerini gösteren çok az sayıda çalışma olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışmada bina yönü, çatı beyazlık derecesi ve normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) gibi pasif bina performans göstergelerinin Gainesville, Florida (A.B.D.)’de şehir genelinde konutlarda yaz mevsiminde faturalandırılan enerji verileri üzerindeki etkilerini test etmek için sayısal bir yaklaşım kullanılmıştır. Çalışmada, bir şehrin konut bina stokunun büyük bir kesiti gözlemlenmiş, seçilen pasif tasarım değişkenlerinin daha düşük enerji tüketimi ile ilişkili olup olmadığı test edilmiştir. Sonuçlara göre bitki örtüsünden kaynaklanan gölgeleme ve çatı beyazlık derecesinin enerji tüketimini azalttığı ancak bina yönü için benzer sonuçlar alınmadığı görülmüştür.

Binalardaki enerji tüketiminde önemli oranda düşüş sağlamak için pasif yöntemlerin yeterli gelmediği durumlarda, aktif yöntemler olarak adlandırılan; bina kontrol sistemleri, ısı geri kazanımlı havalandırma üniteleri, ekonomizer kullanımı, ısı pompaları (hava, toprak ve su kaynaklı), yüksek verimli su soğutmalı soğutma grupları, yüksek verimli yoğuşmalı kazanlar ve kojenerasyon/trijenerasyon sistemleri gibi alanlara yönelmek gerekmektedir. Bu durumlarda ayrıca yenilenebilir enerji teknolojileri gibi yöntemlerin mevcut metotlara entegre edilmesi gerekebilmektedir (Palmero vd., 2020). Aktif yöntemlerin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, Birleşik Arap Emirlikleri’nde yer alan anonim bir otel için, su üretimini optimize etmek ve otel iklimlendirme ihtiyaçları için soğutulmuş havayı kullanmak için bir ısıtma-soğutma-havalandırma (HVAC) sistemi tasarlanarak enerji verimliliği incelenmiştir. Sonuçlar, bu tür bir HVAC sistemi kullanılması halinde, dikkate alınan iklim koşulları için, otel su gereksinimlerinin anlamlı bir miktarını karşılayacak miktarda kullanım suyu üretilebileceğini göstermiştir (Magrini vd., 2017).

Yumurtacı ve Dönmez (2013) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, bir konutta standart elektrikli ürünlerin kullanılması (senaryo 1), yüksek enerji verimliliğine sahip elektrikli ürünler kullanılması (senaryo 2) ve çok zamanlı elektrik tarifesine göre standart ve yüksek verimliliğe sahip elektrikli ürünlerin kullanılması (senaryo 3) durumları için elektrik giderleri hesaplanarak kıyaslanmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, standart elektrikli ürünler yerine enerji verimliliği yüksek olan ürünlerin kullanılması ile aylık tüketilen elektrik enerji maliyetlerinin yaklaşık %35 azaldığı ve aynı ürünlerin, çok zamanlı tarifede kullanıldığında ise maliyeti yaklaşık %50 azalttığı görülmüştür (Yumurtacı ve Dönmez, 2013).

Konutlarda enerji verimliliği konusunda Apaydın Özkan (2020) tarafından yapılan bir başka çalışmada, evlerde anlık yüksek güç talebini önlemeyi hedefleyen bir ev cihazları yönetim sistemi tasarlanmıştır. Ev cihazları kontrol sistemi olarak adlandırılan sistem, akıllı cihazlar, şebeke, haberleşme ünitesi ve bir ana kontrolcüden oluşmaktadır. Sistemin çalışma prensibi ise, evdeki akıllı cihazlara kullanıcı tarafından belirlenen öncelik sırasına göre belirli koşullar altında müdahale etme esasına dayanmaktadır. Yapılan araştırmada, ev cihazları yönetim sisteminin etkinliğini ölçmek için farklı senaryolarda simülasyonlar yapılmıştır. Sonuç olarak, bu sistemin ev cihazlarının pik noktasındaki elektrik taleplerini %40 oranında azaltarak, şebeke limitinin aşan enerji taleplerinin önüne geçtiği ve elektrik maliyetlerinde %6,20'lik bir azalma sağladığı ortaya konmuştur (Özkan Apaydın, 2020).

Teknolojideki ilerleme ile beraber, sensörlerin ve büyük verilerin (Big Data-BD) dâhil edilmesini gerektiren ve yapay zekâyı (Artificial Intelligence-AI) kullanan yeni akıllı bina konseptleri, yeni bir kentsel enerji verimliliği çağını başlatmayı vaat etmektedir. Farzaneh vd. (Farzaneh vd., 2021), bu konunun önemine dikkat çekerek akıllı binalarda yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı ile daha iyi kontrol, geliştirilmiş güvenilirlik ve otomasyon ile enerji tüketimlerinin azaltılabileceğini ifade etmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında, bir bina yönetim sistemi ve talep yanıt programı aracılığıyla akıllı binalarda yapay zekâ teknolojilerinin uygulanmasına ilişkin son çalışmaları derlemişlerdir.

Türkiye’de artan enerji ihtiyacına bağlı olarak enerji tüketiminin azaltılması ve enerji yönetim bilincinin resmi kurumlarda ve özel sektörde artırılması için yapılan çalışmalar ise Aydın (2019) çalışmasında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında çeşitli kamu kurum ve kuruluşların paydaş olarak yer aldığı altı adet proje; amaç, kapsam, yapılan çalışmalar ve sonuçlar üzerinden analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda özellikle enerji performansları düşük olan kamu ve konut binalarının enerji iyileştirmelerinin yapılması ve yeni binalarda yüksek enerji performansına sahip sistemlerin uygulanmasının enerji verimliliği açısından oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır.

Bina türü ve kullanım amacından bağımsız olarak pasif veya aktif tüm enerji tasarruf uygulamalarının binalarda enerji verimliliğini arttırdığı açıktır. Ancak özellikle büyük ölçekli değişimler gerektiren uygulamalarda, ilk yatırım maliyetleri yüksek ve geri ödeme süreleri uzun olabilmektedir. Dolayısıyla ekonomik hususlar, daha enerji verimli bir konut stokuna doğru ilerlemeyi engellemektedir (Baniassadi vd., 2021). Yaygın olarak tartışılan bir çözüm, enerji maliyetlerinin ötesine bakmak ve enerji tasarrufunun farklı ekonomik, çevresel ve sağlık getirilerini dikkate almaktır. Önlenebilir sağlık harcamaları ve çevresel zararlardan doğan maliyetler, iç mekan hava kalitesinin iyileşmesine bağlı olarak hava yoluyla bulaşan hastalıkların azaltılabileceği bu getirilerden bazılarıdır (Baniassadi et vd., 2021). Bu doğrultuda, yoğun enerji kullanımı olan binalarda enerji tasarrufu yapılabilecek alanların tespiti sonrasında karar verilen uygulamalar hem ekonomik hem de ikincil yararlar açısından değerlendirilmelidir.

Tüm bu nedenlerle mevcut çalışmada, Antalya’da anonim bir beş yıldızlı şehir oteli için enerji verimliliğini iyileştirmeye yönelik çeşitli yaklaşımlar, literatürdeki 6 örnek çalışma dikkate alınarak değerlendirilmiş, önerilen uygulamaların olası tasarruf oranlarına etkisi karşılaştırılmıştır. Tasarruf yöntemleri değerlendirilirken, referans çalışmalarda ele alınan enerji verimliliğini arttırmaya yönelik toplamda 12 adet yaklaşım ile elde edilen tasarruf değerleri kullanılmıştır. Literatürden seçilen çalışmaların, özellikle benzer otel binalarında ve kullanım koşullarında yapılan uygulamalar olmasına dikkat edilmiştir. Bilindiği üzere otellerde toplam enerji ihtiyacı, elektrik, çeşitli yakıtlar veya alternatif enerji kaynaklarından karşılanabilir. Enerji tasarrufunu bütünsel bir yaklaşım ile değerlendirebilmek için farklı kaynaklardan olan tüketimler toplam birincil enerji tüketim değerine dönüştürülmüştür. Tüm referans çalışmalarda da tasarruf oranları yıllık enerji tüketimi üzerinden ele alındığı için eşdeğer bir karşılaştırma yapabilmek üzere, yıllık birincil enerji tüketimi ve tasarruf değerleri hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde geri ödeme sürelerine bağlı olarak elde edilecek ekonomik faydadan daha çok potansiyel tasarruf miktarlarına odaklanılmıştır. Örnek alınan çalışmalarda genellikle tek bir enerji tasarruf metodunun analizi yapılmıştır. Bu çalışmada ise enerji tasarruf miktarları, kapsamlı bir literatür taraması yapılarak yalıtım, aydınlatma, ısı geri kazanımı ve cam filmi uygulaması gibi farklı uygulamalar için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece örnek otel için çeşitli ilk yatırım maliyetlerine sahip ve farklı miktarlarda tasarruf sağlayan çok yönlü sonuçlar elde edilmiştir.

3. Tasarruf Yöntemleri için Referans Çalışmalar (Reference Studies for Saving Methods)

Mevcut çalışmada, Antalya’daki örnek bir otel için enerji verimliliğini iyileştirmeye yönelik çeşitli yaklaşımların tasarruf oranlarına etkisinin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, literatürde enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalardan bina tipi olarak otel binalarının seçildiği altı adet referans çalışma ve toplamda 12 adet tasarruf yöntemi dikkate alınmıştır. Referans çalışmalar, seçilen bina ve bölgeye ait detaylar, uygulamanın türü ve elde edilen tasarruf oranları açısından detaylı olarak açıklandıktan sonra çalışmalardaki enerji verimliliği uygulamaları ve tasarruf oranları açısından karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de sunulmuştur.

Atmaca ve Yılmaz (2019) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'deki mevcut otel binalarında enerji ve maliyet verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında sektörel, mevsimsel, ekonomik ve sezonsal değişimler göz önünde bulundurularak karşılaştırmalar yapılmış, enerji ve maliyet analizi açısından optimum bir çözüm sunulmaya çalışılmıştır. Çalışmada örnek bir otelin, sıcak-nemli ve soğuk iklimi temsil edecek şekilde Bodrum (yaz oteli) ve Erzurum'da (kış oteli) konumlandırılması durumu ele alınmıştır. Bu yaz ve kış otelleri için, farklı yalıtım malzemeleri, kalınlıkları, cam tipleri, gölgeleme elemanları ve yerleşimleri için 20 farklı senaryo oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, enerji verimliliğini arttırmaya yönelik olarak sunulan öneri, mevcut binada bulunmayan ısı yalıtım uygulamasının yapılması ve pencerelerde kullanılan cam tiplerinin değiştirilmesidir. Çalışmada mimarisi kullanılan otel; Bodrum'da bulunan ve sezonluk olarak hizmet veren 4 yıldızlı bir oteldir. Toplamda 84 adet odası bulunmakta olup, bunlardan 78 tanesi standart oda, 6 tanesi ise süit oda şeklinde düzenlenmiştir. Otel 4 katlıdır ve 24 saat hizmet veren kafe-bar alanı, 200 kişilik çok amaçlı salon, fuar alanı, 80 kişilik restoran, mutfak, sıcak-soğuk depolama alanları ve sauna, masaj odaları gibi bölümlerden oluşmaktadır. Bodrum'da konumlandırılan yaz oteli, turizm sezonunda Mart'tan Ekim'e kadar yılın 8 ayı faaliyet göstermektedir. Otelin asıl faaliyet gösterdiği yaz sezonunda soğutma enerjisi tüketimi fazladır. Bu sebeple yaz oteli için, 20 farklı senaryodan soğutma enerjisinde 30,1 kWh/m² ile maksimum tasarrufun S9 senaryosu ile sağlanacağı belirtilmiştir. İlgili senaryoda; yalıtım malzemesi olarak 5 cm kalınlıktaki cam yünü kullanılması, pencerelerde ise düşük demir içeriğine sahip clear cam ile orta güneş yansıtımlı dikey gölgelendirme yapılması planlanmıştır. Sonuç olarak, Bodrum'daki yaz otelinde soğutma yükü önceliği ile yapılan karşılaştırmada optimum sonuçları veren senaryonun enerji verimliliğinde %38,2'lik bir artış sağlayacağı hesaplanmıştır. Aynı mimari yapı kullanılarak Erzurum Palandöken'de Kasım, Aralık, Ocak ve Şubat olmak üzere yılın 4 ayı hizmet veren kış oteli için de aynı senaryolar üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Otelin kış sezonunda hizmet vermesi ve bulunduğu bölgenin iklim koşulları sebebiyle senaryolar, ısıtma yükü önceliği ile karşılaştırılmıştır. Isıtma yükünde 10 kWh/m² ile maksimum tasarrufun, yalıtım malzemesi olarak 8 cm kalınlıkta genişletilmiş polistiren köpük, pencerelerde ise sinerji tipi ısıcam kullanılan ve dikey gölgelendirme yapılmadığı varsayılan S18 senaryosu ile sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak kış oteli için optimum tasarruf sağlayan senaryo için enerji verimliliğinde %25,7 artış sağlanabileceği ortaya konmuştur.

Bir başka çalışmada, Çin'in belirli bir bölgesinde bulunan otel binalarında kullanıcı davranışlarının ayarlanması ile ısı enerjisi tüketiminin azaltılmasına yönelik bir analiz yapılmıştır (Wang vd., 2019). Çalışmanın yapıldığı Yangtze Nehri bölgesi, çoğunlukla bireysel klima kullanımı yoluyla ısıtma ve soğutmanın tercih edildiği bir alandır. Bu nedenle bu bölgede kişilerin kullanım davranışlarının iyileştirilmesi yoluyla enerji verimliliğinde önemli oranda artış sağlanabileceği düşünülmüştür. Çalışma kapsamında bölgede yer alan Şanghay, Changsha, Nanchang, Wuhan ve Chengdu gibi 5 farklı şehirdeki toplamda 13 otelden ve 101 odadan alınan kullanıcılara ait ısıtma verilerinin analizi yapılarak, enerji tasarruf potansiyeli araştırılmıştır. Bu amaçla klima kullanım süresinin ayarlanması ve sıcaklık ayarının düzenlenmesi gibi tasarruf sağlayabilecek farklı senaryolar oluşturulmuştur. Sonuçlara göre bölgedeki birçok şehirde kullanıcı davranışlarının düzenlenmesi ve gereksiz klima kullanımının önlenmesi ile kış sezonunda %5'e varan enerji tasarrufu elde edilebileceği görülmüş, bu değer geçiş mevsiminde daha yüksek oranlara ulaşabileceği de tespit edilmiştir. Sıcaklık ayarında yapılan düzenleme ile tasarruf oranları %20'lere ulaşmıştır (Wang vd., 2019).

Diğer bir örnekte enerji verimliliği, otomatik aydınlatma kontrolünün optimizasyonu ile sağlanmaya çalışılmıştır (Verma ve Jain, 2019). Çalışmada, gün ışığı temelli bir aydınlatma kontrolü uygulaması ile enerji tüketiminde önemli oranda tasarruf sağlanabileceği öne sürülmüştür. Aydınlatma, binalarda elektrik enerjisi tüketimindeki ana kaynaklardan bir tanesi olup, enerji optimizasyon çalışmalarında üzerinde durulması gereken konulardandır. Aydınlatmalardan kaynaklanan ısıtma yükleri, klima sistemlerinin tasarımını da etkilemektedir. Otomatik aydınlatma; günışığına, içerideki insan varlığına (hareket sensörlü) veya belirli bir zaman çizelgesine göre çalışacak şekilde ayarlanabilir. Yöntemlere göre değişiklik göstermekle beraber, doğru uygulandığında %30 ile %40 arasında enerji tasarrufu yapmak mümkündür. İlgili çalışmada, hangi oranlarda tasarruf elde edilebildiğinin araştırılması amacıyla, Hindistan'da bulunan 5 katlı, 42 odaya sahip örnek bir otel üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 3 farklı senaryo için (genel aydınlatmanın açık olduğu, genel aydınlatmanın günışığı karartma kontrollü çalıştığı ve genel aydınlatmanın günışığına göre aç-kapa kontrollü çalıştığı) simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlara göre, günışığına göre karartma kontrolü ile çalışan durumda yıllık enerji tüketiminde %37,08 tasarruf sağlanırken, bu oran aç-kapa çalışan sistemde %40,2'ye kadar yükselmiştir. Ancak ikinci durumda kullanıcı konforundan bir miktar kayıp yaşanmaktadır (Verma ve Jain, 2019).

Suamir vd. (2018) tarafından yapılan bir diğer çalışma ise Endonezya'nın Bali Adası'nda yer alan villa ve daire olmak üzere toplam 672 misafir odası ve 25 toplantı odası bulunan 5 yıldızlı bir otelde su soğutmalı chiller grubu içeren mevcut iklimlendirme sistemine, ısı pompası ve ısı geri kazanım sistemlerinin eklenmesi durumunda elde edilecek tasarrufu incelemektedir. Eklenmesi planlanan ısı pompası ısı geri kazanım sistemi ile ısıtma soğutma ihtiyacı karşılanırken açığa çıkan atık ısı, sıcak su temini için kullanılması amaçlanmıştır. Eklenen sistem ile mevcut iklimlendirme ve ısıtma sistemi kıyaslandığında, ısıtma ve sıcak su temini için harcanan enerjinin %36,7

oranında azaltılabileceği görülmüştür. Bu azalma, otelin toplam enerji kullanımının %6,6'sına tekabül etmektedir ve esas olarak, sıcak su üretimi için atık ısı kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ek olarak, mevcut iklimlendirme sistemine entegre edilen ısı pompası ve ısı geri kazanım cihazından oluşan sistemin yerel para biriminde yıllık 1,728.07 IDR tasarruf sağladığı ve amortisman süresinin 2,61 yıl olduğu belirtilmiştir.

Amirkhani vd. (2019), İngiltere Berkshire'da bulunan 210 oda kapasiteli ve 4 yıldızlı bir şehir oteli için farklı cam türleri kullanılması durumunda enerji verimliliğinin değişimini incelemiştir. Otel, toplam 12.360 m² kullanım alanına sahiptir. Giriş katında restoran, toplantı odaları, kapalı havuz ve fitness salonu gibi genel mekânlar bulunan 3 katlı otelin diğer katları misafirler için konaklama alanı olarak kullanılmaktadır. Çalışmada otelin mevcut haldeki enerji tüketimi, tüm dış camlara ticari ismi "Thinsulate Climate Control 75" olarak bilinen ince ve şeffaf bir filmin iki farklı şekilde uygulanması durumundaki enerji tüketimi ile kıyaslanmıştır. Bu amaçla, şeffaf filmin çift camın iç ortama bakan yüzeyine ve çift cam arasındaki hava boşluğunun dış ortama bakan yüzeyine uygulandığı durumlar değerlendirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda iç yüzeye uygulama yapılan durumda otelin yıllık toplam enerji tüketiminin %2,7, çift cam arasına uygulanması halinde ise %4 azaldığı belirlenmiştir. Her iki model için de hem ısıtma hem de soğutma tüketimlerinin azaldığı görülmüştür. Diğer yandan, ısıtma ve soğutma enerjisi tüketiminin azalmasına bağlı olarak fan ve pompa kullanımı da azaldığından, yardımcı sistemlerin enerji tüketiminde iç yüzey uygulamasında %14,9, çift cam uygulamasında ise %16,7 düşüş olmuştur.

Referans alınan son çalışmada ise yine dış cephede kullanılan cam türü temel olarak enerji verimliliği incelenmiştir (Dehwah ve Asif, 2017). Suudi Arabistan, Al-Khobar'da bulunan 4 yıldızlı, restoran, mağazalar, eğlence alanları gibi genel mekânları bulunan, bir kat alanı 1.700 m² ile toplam 9 katlı ve 128 odalı bir otel için dış cephede farklı cam türlerinin etkisini gözlemlemek için analizler yapılmıştır. Çalışmada dikkate alınan otel binası güney cephe olup, cepheleri tamamen 12 mm hava boşluğu ve 6 mm şeffaf cam olmak üzere toplam 24 mm kalınlığındaki ısıcamla kaplıdır. Binanın dış cephesinde herhangi bir gölgeleme tertibatı bulunmadığından, bina maksimum güneş yüküne maruz kalmakta ve soğutma yükleri artmaktadır. Özellikle sıcak ve nemli iklimlerde hali hazırda yüksek olan soğutma yükleri nedeniyle ısıtma-soğutma-havalandırma sistemlerinin tükettiği enerji, binalardaki temel enerji tüketimi haline gelmektedir. Bu amaçla, otelin dış cephesinde mevcut olan çift cama alternatif olarak; farklı ısı transfer katsayılarına sahip düşük yansıtma katsayılı (Low-E), çift güneş kontrol kaplamalı (Double solar control glazing) ve lamine cam (laminated glass) için enerji verimliliği incelenmiştir. Analizler sonucunda otelin ısıtma-soğutma-havalandırma yükünde düşük yansıtma katsayılı, çift güneş kontrol kaplamalı ve lamine cam için sırasıyla 564 MWh (%24,9), 549 MWh (%24,2) ve 454 MWh (%20) azalma tespit edilmiştir.

Tablo 1. Referans çalışmalardaki enerji verimliliği uygulamaları ve tasarruf oranları (Energy efficiency applications and savings rates in reference studies)

Referans Çalışma	Enerji Verimliliği Uygulaması	Toplam Enerji Tasarrufu [%]
1 Atmaca, M. ve Yılmaz Z. (Atmaca ve Yılmaz, 2019)	Yaz oteli için yalıtım ve cam tipi değişimi	38,2
	Kış oteli için yalıtım ve cam tipi değişimi	25,7
2 Wang, Y. vd. (Y. Wang vd., 2019)	Kullanıcı davranışlarının düzenlenmesi	5,0
	Sıcaklık ayarı kontrolü	20,0
3 Verma, N. ve Jain, A. (Verma ve Jain, 2019)	Güneşliğine göre karatma kontrollü aydınlatma	37,08
	Güneşliğine göre aç-kapa kontrollü aydınlatma	40,20
4 Suamir, N. vd. (Suamir vd., 2018)	Isı pompası ısı geri kazanım sistemi	36,7
5 Amirkhani, S. vd. (Amirkhani vd., 2019)	Camın iç yüzeyine film uygulaması	2,7
	Çift cam arasına film uygulaması	4,0
6 Dehwah, A. ve Asif, M. (Dehwah ve Asif, 2017)	Lamine cam kullanımı	20,0
	Çift güneş kontrol kaplamalı cam kullanımı	24,2
	Düşük yansıtma katsayılı cam kullanımı	24,9

4. Antalya'da Anonim Bir Otele Ait Veriler (Data of an Anonymous Hotel in Antalya)

Otel binaları, değişken bina geometrileri, çok sayıda farklı fonksiyonel mekânlara sahip olmaları ve farklı çalışma zaman çizelgeleri ile enerji verimliliği açısından karakteristiği birbirinden oldukça farklı durumları içermektedir. Bu nedene otel binaları için yapılacak enerji verimliliği çalışmaları, binaların özgün yapılarından dolayı münferit olarak ele alınmalıdır. Bu doğrultuda, olası verim artışlarından sağlanacak yaklaşık tasarruf miktarlarının gerçek senaryolar üzerinden ifade edilmesi amacıyla, Antalya'da bulunan anonim bir tesisin bir yıllık elektrik ve doğalgaz tüketim verileri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada dikkate alınan tesis 5 yıldızlı otel statüsünde olup, toplamda 471 odaya sahiptir ve tam kapasitede odalarda 1000 kişi ile genel mekânlar dâhil günlük toplam 1500 misafir ağırlayabilmektedir. Otelde büyüklük, manzara, kullanım amacı ve misafir kapasitelerine göre 10 farklı tip oda bulunmaktadır (Tablo 2). Otel binası, 10 katı misafir katı olacak şekilde 15 katlı olarak tasarlanmıştır. Her bir misafir katı alanı 2555 m²'dir. Genel mekânlar dâhil toplam 55.130 m² kullanım alanı ile faaliyet gösteren tesiste, bay-bayan kuaför, farklı kapasitelere sahip 18 toplantı salonu, 750 m² kapalı yüzme havuzu, şezlong ve bar alanı dâhil 2000 m² açık yüzme havuzu, 650 m² fitness, 4750 m² spa, 3000 m² tenis kortları, farklı temalarda hizmet veren 7 restoran, 4 bar, 1050 m² eğlence alanı bulunmaktadır. Çok çeşitli genel mekânları ile tesis, konaklamanın yanı sıra farklı sosyalleşme alanları ile tüm yıl boyunca çok sayıda misafir ağırlayabilmektedir.

Tablo 2. Otelde bulunan oda tipleri ve özellikleri (Types of rooms and their features in the hotel)

Oda Tipi	Manzara	Büyüklük [m ²]	Oda Sayısı
Standart	Bahçe	26-30	96
Deluxe	Deniz	26-30	256
Executive Deluxe	Bahçe	26-30	12
Executive Deluxe	Deniz	26-30	32
Grand Deluxe	Deniz	38	18
Corner Suit	-	34	18
Mediterranean Suit	-	56-65	36
Infinity Suit	-	98	1
Ocean Suit	-	135	1
Panorama Suit	-	210	1

Otel binasının yapısal özelliklerine ait detaylar Tablo 3 ile verilmiştir. Otelde, hali hazırda farklı enerji verimliliği uygulamaları mevcuttur. Örneğin tesisin sıcak su ihtiyacının büyük bir kısmı, güneş enerjisi kolektörleri ile sağlanmaktadır. Aydınlatmada enerji tasarruflu LED ampuller kullanılmaktadır. Otel odalarındaki iklimlendirme ise VRF klimalar ile sağlanmaktadır. Tesislerde standart olarak uygulanan, enerji korumalı anahtarlar ile misafirler oda dışında iken iklimlendirme sistemi kapanmaktadır. Otel binasının bazı bölgelerinde yer alan mantolama yardımıyla ise ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Ayrıca, genel mekânlarda sensörlü lavabo bataryaları sayesinde su ve otomatik kapılar ile de ısıtma-soğutma yükünden tasarruf elde edilmektedir.

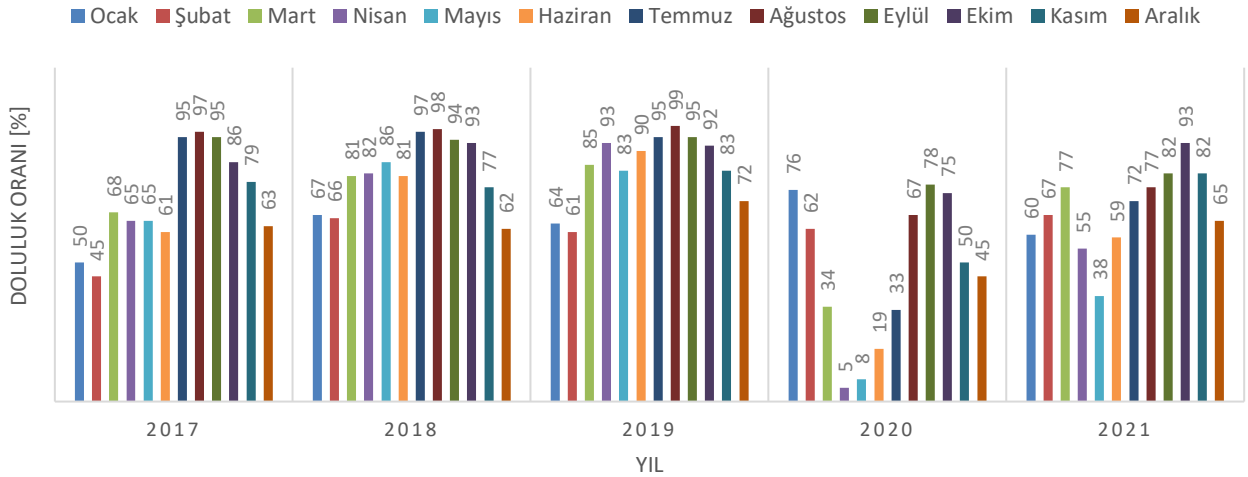
Tablo 3. Otel binasının yapısal özellikleri (Structural features of the hotel building)

Toplam kat adedi	15
Bodrum kat adedi	3
Ortalama kat yüksekliği [m]	3,44
Toplam bina alanı [m ²]	52.494,57
Toplam iklimlendirilen alan [m ²]	47.829,85
Net kullanım alanı [m ²]	46.194,83
Toplam dış duvar alanı (dolgu duvar+betonarme elemanlar) [m ²]	10.336,53+3.230,33
Toplam döşeme alanı [m ²]	4.588,83
Toplam çatı alanı [m ²]	4.620,10
Toplam pencere alanı [m ²]	5.868,41

2017 ile 2021 yılları arasındaki 5 yıllık dönem için aylara bağlı olarak satılan oda sayıları Tablo 4'te verilmiştir. Tesis yaz-kış hizmet veren ve yılın 12 ayı açık olan bir oteldir. Antalya'nın iklimi ve popüler bir turizm şehri olması sebebiyle tüm yıl ziyaretçi aldığı bilinmekle beraber, özellikle Mart-Kasım ayları arasında otelin misafir sayılarının arttığı tablodan görülebilmektedir. Otelin toplam oda sayısının 471 olduğu bilindiğinden, son 5 yıl için aylara bağlı doluluk oranlarını da hesaplamak mümkündür. Doluluk oranlarının değişimi Şekil 3'ten görülebilir. Genellikle Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında %90'dan fazla doluluk oranı ile tesis maksimum misafir sayısına ulaşırken, bu rakam Ocak-Şubat aylarında %60 civarı olacak şekilde azalmaktadır. Bununla birlikte, 2019 yılı sonunda baş gösteren Covid-19 pandemisi sonrası, 2020 yılında tesisin misafir sayılarında meydana gelen azalma da dikkat çekmektedir. Otel, 2020 yılı Nisan ayında %5 ile son beş yılın en düşük doluluk oranı ile faaliyet göstermiştir. 2021 yılında pandeminin son bulması ve normal hayata dönüş ile oteldeki misafir sayıları artmaya başlamış olsa da henüz pandemi öncesi rakamlara ulaşamamıştır. 2021 yılı Ekim ayında en yüksek doluluk oranı %93 olarak belirlenmiş yıl boyu ise ortalama %60-70 civarında seyretmiştir.

Tablo 4. Örnek otelde son 5 yıl için aylara bağlı satılan oda sayıları (Number of rooms sold in the hotel by months for the last 5 years)

	2017	2018	2019	2020	2021
Ocak	7.387	9.758	9.375	11.098	8.723
Şubat	6.603	9.729	8.967	9.127	9.791
Mart	10.009	11.870	12.440	4.937	11.330
Nisan	9.527	11.938	13.622	736	8.017
Mayıs	9.611	12.624	12.222	1.152	5.528
Haziran	8.860	11.822	13.125	2.796	8.612
Temmuz	13.864	14.234	13.929	4.902	10.580
Ağustos	14.196	14.280	14.411	9.766	11.302
Eylül	13.940	13.799	13.823	11.388	11.933
Ekim	12.498	13.621	13.569	11.059	13.582
Kasım	11.594	11.317	12.158	7.336	12.070
Aralık	9.174	9.061	10.636	6.643	9.614
TOPLAM	127.263	144.053	148.277	80.940	121.082



Şekil 3. Örnek otelde son 5 yıl için aylara bağlı doluluk oranlarının değişimi (Change in monthly occupancy rates in the hotel for the last 5 years)

Mevcut çalışmada referans alınan otellerin genel özelliklerinin, anonim otel ile karşılaştırması Tablo 5 ile verilmiştir. Wang vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada yer alan otellerin genel bilgisi kaynakta verilmediğinden tabloya eklenmemiştir. Otellerin yer aldığı konumlar incelendiğinde, büyük çoğunlukla turizm hareketinin fazla olduğu popüler turizm şehirleri oldukları görülmektedir. Atmaca ve Yılmaz (2019) tarafından yapılan çalışmada, Bodrum'da konumlandırılan yaz oteli, turizm sezonunda Mart'tan Ekim'e kadar yılın 8 ayı faaliyet göstermektedir. Çalışmada kış çalışmasının da değerlendirilebilmesi amacıyla, aynı mimari yapı kullanılarak Erzurum Palandöken'de Kasım, Aralık, Ocak ve Şubat olmak üzere yılın 4 ayı hizmet veren kış oteli için de aynı senaryolar üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Böylece tüm referans çalışmalarda yıllık enerji tüketimi üzerinden elde edilen

tasarruf oranları verilmiş, mevcut çalışmada da buna bağlı olarak yıllık tasarruf değerleri hesaplanmıştır. Tablo 5'te yer alan otellerden en geniş kapasiteli otel, 672 oda kapasitesi ile Endonezya Bali'de, en düşük kapasiteli otel ise 42 oda kapasitesi ile Hindistan Roorkee'de bulunmaktadır.

Tablo 5. Örnek otel ile referans çalışmalardaki otellerin karşılaştırması (Comparison of sample hotel and hotels in reference studies)

	1	3	4	5	6	Anonim Otel
Otelin Yıldız Bilgisi	4	-	5	4	4	5
Konum	Bodrum/Erzurum	Roorkee	Bali	Berkshire	Al-Khobar	Antalya
İklim Bilgisi	Sıcak-nemli/Soğuk	Sıcak-nemli	Sıcak-nemli	Ilık-nemli	Sıcak-kuru	Sıcak-nemli
Oda Kapasitesi	84	42	672	210	128	471
Kat Sayısı	4	5	-	3	9	15
Çalışma Sezonu	Yaz/Kış	Yaz-Kış	Yaz-Kış	Yaz-Kış	Yaz-Kış	Yaz-Kış

*2. Referans çalışma, araştırmada yer alan otellerin genel bilgileri verilmediğinden tabloya eklenmemiştir.

5. Anonim Otel için Enerji Analizi ve Tasarruf Yöntemlerinin Değerlendirilmesi (Energy Analysis and Evaluation of Saving Methods for Anonymous Hotel)

Enerji analizinde ilk adım, herhangi bir iyileştirme önlemi uygulamadan önce, otelin mevcut haliyle enerji tüketimini araştırmaktır. Bir binanın ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve sıcak su temini için bir yılda kullandığı toplam enerji miktarı binanın yıllık enerji tüketimini ifade eder. Bu enerji tüketim miktarı, çeşitli bina geometrileri, farklı çalışma zaman çizelgeleri ve iklim koşulları nedeniyle özellikle otel binaları için oldukça değişkendir. Bilindiği üzere otellerde toplam enerji ihtiyacı, elektrik, çeşitli yakıtlar veya alternatif enerji kaynaklarından karşılanabilir. Enerji tasarrufunu bütünsel bir yaklaşım ile değerlendirebilmek için farklı kaynaklardan olan tüketimler toplam enerji tüketim değerine dönüştürülmelidir. Bu amaçla ilk önce aylık ve yıllık olarak elektrik tüketimleri ile ısıtmada ve mutfakta kullanılan doğalgaz miktarları aylara bağlı değişen birim maliyetleri ve fatura tutarları ile hesaplanmış, daha sonra toplam birincil enerji tüketimi belirlenmiştir. Tüketim miktarları, anonim otelden temin edilen 2021 yılına ait bir yıllık fatura değerleri üzerinden hesaplanarak, Tablo 6, 7 ve 8 ile sunulmuştur. Elektrik ve doğalgaz tüketim tabloları incelendiğinde, tüketimlerde aylara bağlı çeşitli dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Otel her ne kadar yıl boyu hizmet veriyor olsa da yüksek ve düşük sezonlara göre doluluk oranları, dolayısıyla da enerji tüketim miktarları değişmektedir. Bu dalgalanmalar, daha önce Şekil 3 ile verilen doluluk oranları değişim grafiği ile uyum içerisindedir. Elektrik tüketimlerinin büyük bir bölümü, 2021 yılı verilerine göre Haziran ve Ekim ayları arasında gerçekleşmiş, en yüksek değere ise Ağustos ayında ulaşılmıştır. Tablo 6'dan da görülebileceği üzere, elektrik tüketiminin işletmeye bir yıllık toplam maliyeti 6.213.333 TL olmuştur. Doğalgaz tüketimlerinde ise ısıtma için kullanılan doğalgaza 1.051.715 TL harcanırken, mutfak kullanımı için de ayrıca 134.075 TL ödenmiştir. Böylece işletmenin bir yıllık toplam enerji giderlerinin 7.399.123 TL olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 6. Örnek otel için aylık ve yıllık toplam elektrik tüketimi ve tüketimin işletmeye maliyeti (The monthly and annual total electricity consumption and cost for the sample hotel)

Ay	Toplam Tüketim [kWh]	Birim Fiyat [TL/kWh]	Fatura Tutarı [TL]
Ocak	505.598	0,62	312.398
Şubat	458.460	0,64	291.318
Mart	522.502	0,68	353.588
Nisan	467.522	0,72	334.474
Mayıs	522.959	0,86	447.587
Haziran	599.523	0,79	472.117
Temmuz	840.887	0,88	739.726
Ağustos	899.031	0,90	805.801
Eylül	732.398	0,87	635.199
Ekim	637.021	1,01	645.614
Kasım	541.572	1,18	640.835
Aralık	566.293	0,94	534.676
TOPLAM	7.293.766		6.213.333

Tablo 7. Örnek otel için ısıtmada kullanılan aylık ve yıllık toplam doğalgaz miktarı ve tüketimin işletmeye maliyeti (The monthly and annual total amount of natural gas used in heating for the sample hotel and the cost)

Ay	Toplam Tüketim [kWh]	Birim Fiyat [TL/kWh]	Fatura Tutarı [TL]
Ocak	635.579	0,16	101.392
Şubat	475.319	0,16	76.603
Mart	771.034	0,16	125.617
Nisan	484.217	0,16	79.656
Mayıs	175.828	0,17	29.214
Haziran	158.711	0,17	26.658
Temmuz	126.822	0,20	24.874
Ağustos	124.549	0,20	24.492
Eylül	172.416	0,22	38.115
Ekim	364.623	0,25	91.697
Kasım	484.711	0,36	174.067
Aralık	609.369	0,43	259.332
TOPLAM	4.583.178		1.051.715

Tablo 8. Örnek otel için mutfakta kullanılan aylık ve yıllık toplam doğalgaz miktarı ve tüketimin işletmeye maliyeti (The monthly and annual total amount of natural gas used in kitchen for the sample hotel and the cost)

Ay	Toplam Tüketim [kWh]	Birim Fiyat [TL/kWh]	Fatura Tutarı [TL]
Ocak	50.591	0,19	9.708
Şubat	46.055	0,19	8.933
Mart	51.551	0,20	10.123
Nisan	48.092	0,20	9.534
Mayıs	41.681	0,20	8.347
Haziran	47.645	0,20	9.660
Temmuz	54.939	0,22	11.999
Ağustos	57.230	0,22	12.584
Eylül	56.960	0,22	12.605
Ekim	63.405	0,22	14.087
Kasım	57.992	0,22	12.943
Aralık	60.200	0,23	13.552
TOPLAM	636.341		134.075

Tasarruf yöntemlerinin değerlendirilmesi aşamasında, referans çalışmalarda ele alınan enerji verimliliğini arttırmaya yönelik toplamda 12 adet yaklaşım ile elde edilen tasarruf değerleri (Tablo 1), mevcut otelin potansiyelinin araştırılmasında kullanılmıştır. Seçilen çalışmaların, özellikle benzer otel binalarında ve kullanım koşullarında yapılan uygulamalar olmasına dikkat edilmiştir. Tüm referans çalışmalarda yıllık enerji tüketimi üzerinden elde edilen tasarruf oranları verilmiş, mevcut çalışmada da buna bağlı olarak yıllık tasarruf değerleri hesaplanmıştır. Binaların toplam enerji tüketimi, EN 13790'e (ISO 13790,2008) göre ölçüm, el ile hesaplama veya bilgisayar destekli hesaplama yöntemleri ile belirlenebilmektedir. Çalışmamızda örnek otelden alınan fatura değerleri kullanılarak, toplam birincil enerji tüketimi hesaplanmıştır. Burada kullanılan birincil enerji tanımı, "herhangi bir dönüşüm veya dönüşüm sürecinden geçmemiş yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklardan elde edilen enerji" olarak ifade edilebilir. Örneğin fosil yakıtların içerdiği kimyasal enerji birincil enerji kaynağıdır. Ancak, o fosil yakıtın yakılmasıyla üretilen bir birim elektrik, bir dönüşüm sürecinden geçtiği için birincil enerji olarak kabul edilmeyecektir.

Mevcut bina ve referans uygulamalardaki enerji tüketimlerini eşit koşullarda karşılaştırabilmek amacıyla ölçülen tüketim değerinin birincil enerjiye dönüştürülmesi gerekmektedir. Türkiye için birincil enerji dönüşüm katsayıları, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü'nün 28 Aralık 2020 tarihinde yayınlamış olduğu duyuruya göre güncellenmiştir. Buna göre 2021 yılından itibaren nihai elektrik enerjisinin fosil kaynaklı birincil enerjiye dönüşüm katsayısı 1,826 olarak belirlenmiştir. Doğalgaz ve diğer yakıtlar için bu katsayı 1'dir. Mevcut çalışma için hesaplanan birincil enerji tüketimleri ve bu tüketimlerin maliyeti Tablo

9 ile sunulmuştur. Farklı kaynaklardan olan tüketimlerin maliyetleri hesaplanırken yıllık ortalama birim fiyatlardan yararlanılmıştır. Tablo 9 incelendiğinde, birincil enerji tüketiminin yıllık olarak yaklaşık 12,3 milyon TL maliyetinin olduğu görülmektedir. Bu değer %90'lık kısmının elektrik, %10'luk kısmının ise doğalgaz kullanımı kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 9. Örnek otel için bir yıllık toplam birincil enerji tüketim miktarı ve tüketimin maliyeti (The monthly and annual total primary energy consumption and cost for the sample hotel)

Kaynak	Birincil Enerji Tüketimi [kWh/yıl]	Ortalama Birim Fiyat [TL/kWh]	Birincil Enerji Tüketiminin Maliyeti [TL/yıl]
Elektrik	13.318.416	0,84	11.179.740
Doğalgaz ısıtma	4.583.178	0,22	1.005.333
Doğalgaz mutfak	636.341	0,21	133.289
Toplam	18.537.935		12.318.362

Belirlenen toplam birincil enerji tüketimi ve maliyeti, iyileştirme senaryolarında baz değer olarak kullanılmıştır. İncelenen örnek otel, yılın 12 ayı hizmet veren bir şehir otelidir. Sezonluk otel statüsünde olmadığından, yalnızca ısıtma ya da soğutma yüklerine yönelik iyileştirme senaryoları uygulanmamıştır. Bunun yerine, yıllık enerji tüketiminden toplamda edinilebilecek tasarruf değerlendirilmiştir. Bu miktardan referans çalışmalarda çeşitli senaryolar dâhilinde nasıl tasarruf edilebileceği ve işletmeye sağlanabilecek olası kazanç hesaplanmıştır. Farklı verimlilik uygulamalarının örnek otel için tüketimde sağlayacağı azalma ve bunun sonucunda elde edilebilecek potansiyel tasarruf, Tablo 10'dan görülebilir. Tüm uygulamalar bir arada değerlendirildiğinde, enerji tüketiminde en az %2,7 ile en fazla %40,2 arasında bir tasarruf öngörülmektedir. Bu oranlara göre yıllık tasarrufun, en az 332.596 TL/yıl ve en çok 4.951.982 TL/yıl olacağı belirlenmiştir. Sağlanan tasarrufun, otelin toplamda 12.318.362 TL/yıl olan birincil enerji tüketim giderinde önemli bir azalma sağlayacağı açıktır. Ayrıca, birincil enerji kaynaklarının kullanımı açısından değerlendirildiğinde, bu kaynakların kullanımının da 18.537.935 kWh/yıl değerinden en iyi durumda 11.085.686 kWh/yıl değerine kadar azaltılması mümkündür. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (Şekil 1), elektrik üretiminde neredeyse %45'lere varan dışa bağımlılık varlığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu tüketimlerin azaltılması, ülke ekonomisi için de büyük önem arz etmektedir. Potansiyel yatırımların amortisman süreleri de önemli bir kriter olmakla beraber, referans alınan çalışmaların oldukça çeşitli yaklaşımlar ve sistem analizleri içeriyor olması sebebiyle tek bir amortisman süresi hesaplamak mümkün olmamaktadır. Yatırımın karar aşamasında uygulamaya bağlı olarak bu süreler hesaplanabilir.

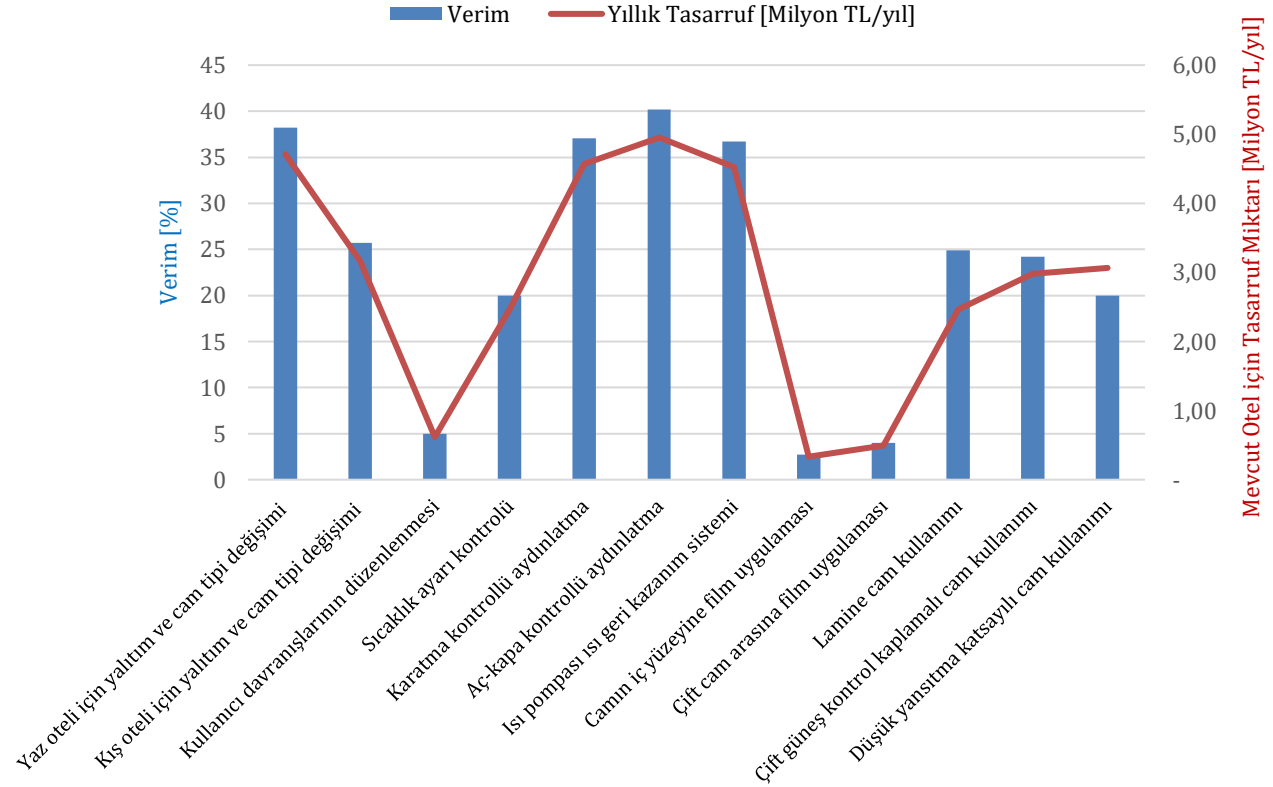
Tablo 10. Örnek otelde farklı uygulamalar ile elde edilebilecek yıllık toplam tasarruf ve ekonomik getirisi (Annual total savings and economic return that can be achieved with different applications in the sample hotel)

Enerji Verimliliği Uygulaması	Toplam Enerji Tasarrufu [%]	Birincil Enerji Tüketimindeki Azalma [kWh/yıl]	Yıllık Tasarruf [TL/yıl]
1 Yaz oteli için yalıtım ve cam tipi değişimi	38,2	7.081.491	4.705.614
Kış oteli için yalıtım ve cam tipi değişimi	25,7	4.764.249	3.165.819
2 Kullanıcı davranışlarının düzenlenmesi	5,0	926.897	615.918
Sıcaklık ayarı kontrolü	20,0	3.707.587	2.463.672
3 Güneşliğine göre karatma kontrollü aydınlatma	37,08	6.873.867	4.567.649
Güneşliğine göre aç-kapa kontrollü aydınlatma	40,20	7.452.250	4.951.982
4 Isı pompası ısı geri kazanım sistemi	36,7	6.803.422	4.520.839
5 Camın iç yüzeyine film uygulaması	2,7	500.524	332.596
Çift cam arasına film uygulaması	4,0	741.517	492.734
Lamine cam kullanımı	20,0	3.707.587	2.463.672
6 Çift güneş kontrol kaplamalı cam kullanımı	24,2	4.486.180	2.981.044
Düşük yansıtma katsayılı cam kullanımı	24,9	4.615.946	3.067.272

6. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, Antalya'daki 5 yıldızlı bir şehir oteli için, otelin mevcut enerji tüketimleri temel alınarak toplamda 12 adet farklı enerji verimliliği uygulamasından elde edilebilecek tasarruf miktarları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda literatürdeki çalışmalarda elde edilen tasarruf oranlarına, örnek otelde ulaşılması halinde

otelin toplam enerji tüketiminde minimum 500.524 kWh/yıl ve maksimum 7.452.250 kWh/yıl değerlerinde bir azalma elde edileceği belirlenmiştir. Enerji tüketimindeki bu düşüşün tesise getireceği ekonomik kazanç ise minimum 332.596 TL/yıl ve maksimum 4.951.982 TL/yıl olmaktadır. Mevcut çalışmada dikkate alınan uygulamalardan elde edilen tasarruf miktarları örnek otel için Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, en yüksek yıllık tasarruf için aydınlatma kontrolü ve ısı geri kazanım cihazı kullanımının öne çıktığı görülmüştür. Burada ısı geri kazanımlı ısı pompası uygulamasının maliyetinin yüksek ve sisteme entegrasyonunun daha karmaşık olduğu düşünüldüğünde, tüm yaklaşımlar arasından aydınlatma kontrolünün, ilk aşama için basit ve ekonomik bir yaklaşım olacağını söylemek mümkündür.



Şekil 4. Örnek otel için farklı uygulamaların enerji verimliliğine katkısı ve yıllık tasarruf miktarları açısından karşılaştırılması (Comparison of different applications in terms of their contribution to energy efficiency and annual savings for the sample hotel)

Mevcut çalışmada örneklenen ve her biri oteller üzerine yapılan altı çalışmada da enerji verimliliğini arttırmaya yönelik yaklaşımlar birbirinden tamamen farklıdır. Bir tanesinde ısı yalıtımı yaparak ısı kayıpları önlenmeye çalışılırken, diğerinde kullanıcı davranışlarına bağlı olarak klimada elektrik tüketimi azaltılmaya çalışılmış, üçüncü örnekte ise tamamen aydınlatma sistemleri üzerine odaklanan bir analiz ile enerji tasarrufu sağlanmak istenmiştir. Daha kapsamlı bir uygulamada ise su soğutmalı chiller sisteminin ısı pompası ve ısı geri kazanım sistemi entegrasyonu yapılarak enerji verimliliğinin yanı sıra atık ısıdan sıcak su eldesi sağlanması amaçlanmıştır. Son örneklerde ise farklı cam tipleri kullanılarak ısıtma ve soğutma yüklerinde azalma amaçlanmıştır. Referans çalışmalardan görüldüğü üzere, enerji verimliliğini arttırmaya yönelik tüm uygulamalardan, uygulamanın türüne ve yerine bağlı olarak değişen oranlarda enerji tasarrufu elde etmek mümkündür.

Enerji tasarrufu için tercih edilen uygulamaya bağlı olarak değişen miktarlarda ilk yatırım maliyetleri söz konusu olacağı açıktır. Ekonomik analiz ile desteklenmesi halinde bu yöntemlerden elde edilecek kazanç tam olarak belirlenebilir. Ancak, enerji verimliliğinin otel binaları özelinde yalnızca ekonomik tasarruf amacı taşımadığı, buna ek olarak doğa ve çevre dostu düşük karbon salımlı otel binalarının yaygınlaşmasına olanak tanıyacağı unutulmamalıdır. Daha yüksek enerji verimliliğine sahip bina stokunun artırılması, ekonomik, çevresel ve insan sağlığına yönelik birçok iyileştirmeye de olanak sağlayacaktır. Yapılı çevremizin en önemli bileşenlerinden biri olan binalar, çevresel ayak izimize önemli katkıda bulunur ve sağlığımız üzerinde önemli bir rol oynar. Bu nedenlerle Türkiye'de ticari binalar arasında %35'lik bir oranla yüksek enerji tüketimine sahip olan otel binalarında potansiyel enerji verimliliği uygulamalarının tesis bazında değerlendirilmesi ve uygulamaya aktarılması, sürdürülebilir enerji kullanımı için bir gereklilik haline gelmiştir. Enerji verimliliği hedeflerinin uygulanabilirlik kontrolü için bina fonksiyonuna bağlı olarak değişen bina enerji performans kriterlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle önerilen yöntemlerin uygulanabilirliği konusunda kesin yargılara varmak zor olsa da farklı yöntemlerin sağlayacağı potansiyel tasarruf miktarlarını belirlemek, uygulama öncesi bir başlangıç noktası ve öngörü sağlayacaktır. İlerleyen çalışmalarda en yüksek oranda tasarruf sağlayan yöntem analitik olarak

hesaplanabilir, uygulama sonrası enerji tüketimindeki değişimler otelin çalışma zamanları da dikkate alınarak dinamik bir simülasyon ile tespit edilebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma kapsamındaki analizlerde kullanılan verilerin paylaşımından ve desteklerinden dolayı Timuçin DİŞ, Orkut ALTAN ve Umut AYDIN'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Amirkhani, S., Bahadori-Jahromi, A., Mylona, A., Godfrey, P., Cook, D., 2019. Impact of Low-E Window Films on Energy Consumption and CO2 Emissions of an Existing UK Hotel Building. *Sustainability*, 11(16).
- Atmaca, M., 2016. Avrupa Birliği Bina Enerji Performansı Direktifi'nin Türkiye'deki Mevcut Otel Binaları İçin Uyarlanmasına Yönelik Bir Yaklaşım, Doktora Tezi.
- Atmaca, M., ve Yılmaz, Z., 2019. A Study on Energy and Cost Efficiency for Existing Hotel Buildings in Turkey. *E3S Web of Conferences*, 111.
- Aydın, Ö., 2019. Binalarda Enerji Verimliliği Kapsamında Yapılan Projelerin Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği. *Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 4(1), 55-68.
- Baniassadi, A., Heusinger, J., Gonzalez, P. I., Weber, S., Samuelson, H. W., 2021. Co-benefits of Energy Efficiency in Residential Buildings. *Energy*, 238.
- Cherier, M. K., Bekkouch, S. M. E. A., Benouaz, T., Belaid, S., Hamdani, M., Benamrane, N., 2020. Energy Efficiency and Supplement Interior Comfort with Passive Solar Heating in Saharan Climate. *Advances in Building Energy Research*, 14(1), 94-114.
- Dehwah, A. H. A., ve Asif, M., 2017. Sustainability Assessment of Enhanced Glazing Compositions of Commercial Buildings in Hot-Humid Climates. *2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*, 1-9.
- Dikmen, Ç. B., ve Gültekin, A. B., 2011. Usage Of Renewable Energy Resources In Buildings in The Context Of Sustainability. *Journal of Engineering Science and Design*, 1(3), 96-100.
- Douthat, T., Morgan, J. D., Alibašić, H., Grant, A., 2020. Passive Building Characteristics, and Summertime Residential Energy Use: A Spatial Analysis of Energy Efficiency in Gainesville, FL. *Building and Environment*, 169.
- T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020. Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu. https://enerji.enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/ENTAP/114176-turkiye_elektrik_enerjisi_talep_projeksiyonu_raporu.pdf
- Farzaneh, H., Malehmirchegini, L., Bejan, A., Afolabi, T., Mulumba, A., Daka, P. P., 2021. Artificial Intelligence Evolution in Smart Buildings for Energy Efficiency. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2), 1-26.
- ISO 13790, 2008. Energy Performance of Buildings. Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling.
- Magrini, A., Cattani, L., Cartesegna, M., Magnani, L., 2017. Water Production From Air Conditioning Systems: Some Evaluations About a Sustainable Use of Resources. *Sustainability*, 9(8), 1309.
- Öz, B. , 2015. Enerji Verimliliği Kriterlerine Göre Otel Tasarımı ve Enerji Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Ozalp, C., Saydam, D. B., Çerçi, K. N., Hürdoğan, E., Moran, H., 2019. Evaluation of a Sample Building with Different Type Building Elements in an Energetic and Environmental Perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109386.
- Özkan Apaydın, H., 2020. Ev Enerji Yönetimi İçin Ev Cihazlarının Kontrolü. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 912-920.
- Öztürk H.K., Öztürk, H.M. , Dombaycı, Ö. A., 2018. Turizm Sektöründe Enerji Tüketimi ve Enerji Tasarruf Olanakları. *Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 17-28.
- Palmero-Marrero, A. I., Gomes, F., Sousa, J., Oliveira, A. C., 2020. Energetic Analysis of a Thermal Building Using Geothermal and Solar Energy Sources. *Energy Reports*, 6, 201-206.
- Suamir, I. N., Ardita, I. N., Wirajati, I. G. A. B., 2018. Waste Heat Recovery from Central AC System for Hot Water Supply; A Case Study for Hotel Building Application in Indonesia. *Advanced Science Letters*, 23(12), 12206-12210.
- T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020. EPDK Elektrik Piyasası Gelişim Raporu.
- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, 2020. 2020 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimine Kaynaklara Göre Dağılımı.
- TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2020. Türkiye'de Enerji Nereye Gidiyor Oda Raporu.
- Verma, N. ve Jain, A., 2019. Optimized Automatic Lighting Control in a Hotel Building for Energy Efficiency. *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control, PEEIC 2018*, 168-172.
- Wang, X. Bin, Liu, J. P., Fu, Y., 2013. The Strategies of Passive Energy-Efficiency Design in Low Energy Building. *Frontiers of Green Building, Materials and Civil Engineering III*, 368, 1318-1321.
- Wang, Y., Xu, Z., Wang, Z., Li, H., 2019. Analysis of Thermal Energy Saving Potentials Through Adjusting User Behavior in Hotel Buildings of the Yangtze River Region. *Sustainable Cities and Society*, 101724.
- Yumurtacı, Z., ve Dönmez, A. H., 2013. Konutlarda Enerji Verimliliği. *Mühendis ve Makina*, 54(637), 38-43.



EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE TO MICROSTRUCTURE IN METAL BINDER JETTING

Mert GÜRGEN^{1*}, Mehmet Cengiz KAYACAN¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Keywords

*Metal binder jetting,
Additive manufacturing,
Resin,
Sintering.*

Abstract

Metal Binder Jetting emerged and it has been developing an additive manufacturing method. Binder type, binder ratio, sintering process, and atmosphere couldn't be transparently determined due to its development stage. In this study, effect of sintering temperature was investigated parts' microstructure which manufactured by Binder Jetting Metal Additive Manufacturing. In manufacturing, SS316L metal powder used as a raw material, ultraviolet light cured and solid+fluid catalyzed cured resins used as binder. For solid+liquid catalyzed cured resin, furfuryl alcohol was selected as liquid binder, para toluene sulfonic acid was selected as solid catalyst. Isopropyl alcohol was used to dilute the ultraviolet light cured resin. The composition ratios and electron diffraction patterns of the samples were analyzed using optical and scanning electron microscopy.

BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALATTA SİNERLEME SICAKLIĞININ MİKRO İÇYAPIYA ETKİSİ

Anahtar Kelimeler

*Bağlayıcı püskürtmeli metal
eklemeli imalat,
Eklemeli imalat,
Reçine,
Sinterleme.*

Öz

Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat yakın zamanda ortaya çıkmış ve hala gelişmekte olan bir eklemeli imalat yöntemidir. Gelişme aşamasında olmasından dolayı net bir bağlayıcı türü, oranı, sinterleme süreci ve ortamı belirlenememiştir. Bu çalışmada Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat yöntemi ile imal edilmiş eklemeli imalat parçalarında, sinterleme sıcaklığının mikroiyapıya etkisi incelenmiştir. İmalat için ham madde olarak SS316L metal tozu, bağlayıcı olarak ultraviyole ışıkla ve katı+sıvı reaktiflerle kürlenmiş reçineler kullanılmıştır. Katı+sıvı kürlenmiş reçine olarak furfuryl alkol sıvı reçine, para toluen sülfonik asit katı katalizör olarak seçilmiştir. Ultraviyole ışıkla kürlenmiş reçine izopropil alkol ile seyreltilmiştir. Optik ve taramalı elektron mikroskopuyla yapılan incelemelerle kompozisyon oranları ve numunelerin elektron kırınım desenlerinin analizleri de yapılmıştır.

Alıntı / Cite

Gürgen, M., Kayacan, M.C., (2022). Effect of Sintering Temperature to Microstructure in Metal Binder Jetting, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1389-1399.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Gürgen, 0000-0002-0838-6564
M.C. Kayacan, 0000-0003-0993-243X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	28.04.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.07.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.08.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

In these days, with the technological advances, alternative ways have begun to be sought for parts that can't be manufactured with traditional manufacturing methods. One of these non-traditional manufacturing processes is Additive Manufacturing (AM) (Gürgen and Kayacan, 2020). Unlike traditional manufacturing methods, Additive Manufacturing does not work by reducing mass or mass forming the part to be manufactured from raw material. It is a system that manufactures cross-sectional areas of parts from powder or molten raw material in layers

* İlgili yazar / Corresponding author: mertgurgen@sdu.edu.tr, +90-246-211-0804

according to a properly made design (Yalçın and Ergene, 2017). It can be classified according to the material type, the way the layers are combined and the energy source. It can be defined as the production method in which the part is manufactured as desired. This technology, which has taken names such as rapid prototyping and 3D printing, is now known as Additive Manufacturing (AM) in the literature.

AM technologies have started to come to the fore as rapid prototyping systems and has shown great development since the last half of the 20th century. AM methods including, a part is produced by adding the cross-sectional areas of the designed model on top of each other in layers, starting from a digital design file. The designed 3D digital solid model is not sent directly to the AM device. The model is first converted to the Standard Tessellation Language (STL) formatted file, which is the standard interface of the AM (Duman and Kayacan, 2016). After that, the manufacturing file is transferred to the AM device, and the manufacturing process is started. This manufacturing technique, which can be considered new, brings many benefits. The most important advantages are that it can be designed without considering any restrictions on production and thus complex parts can be created, and that there is minimal waste material, no cutting tools and forces.

In Binder Jetting (BJ), which is one of the AM types; firstly, a roller is used to spread powder material throughout the build platform. The binder material is then sprayed onto the layer, similar to inkjet printers. As a result of the spraying process, the desired geometry is obtained in two dimensions. Then the same process is repeated by passing to the next layer three-dimensional part is obtained. After the manufacturing process is finished, the part is raw form. Most of the time, post processes (coating, infiltration, etc.) are done to increase the mechanical properties. Adhesive agent (in ceramics) as coating material and bronze (in metals) as infiltration material are examples of materials used for post processes (Redwood, 2019).

In Metal Binder Jetting (MBJ), it is possible to manufacture parts by using advanced technology metals such as 316, 316L, 420, Inconel 625/718, cobalt/chromium and tungsten carbide (Exone, 2022). These materials are generally preferred in areas that require advanced engineering materials such as automotive, aerospace and defense industries. In addition to these, MBJ is preferred in special areas that require high mechanical properties and complex geometry (Mouritz, 2012).

As with other existing metal AM methods, the manufactured parts do not directly become functional in the MBJ devices. In MBJ, the first step is to manufacture low-density parts with raw strength. The mechanical properties of the part are brought to the desired level by applying various post processes. (curing, sintering, infiltration, etc.) Infiltration, which is one of these steps, is the process of infilling a metal with bronze, copper, aluminum etc. that melts at a lower temperature than the main part material to the part during sintering (Yin et al., 2007; Myers et al., 2015a; Myers et al., 2015b; Tuffile et al., 2016).

Working steps of MBJ method;

- Filling the powder feed chamber and binding material,
- Taking the powder from the feeding unit and spreading it smoothly on the build platform with the spreader mechanism,
- Spraying the binder on the necessary parts (according to the solid model geometry) of the powders,
- Curing process according to the characteristics of the sprayed binder (binders that harden in air, CO₂, ultraviolet light, temperature, etc.),
- Repeating the spreading, binder spraying and curing processes in each layer until the production is finished,
- After the manufacturing process is completed, cleaning the manufacturing parts in from unbound powders,
- By taking the manufacturing part to the furnace process; burn out the binder and sintering metal powders,
- Infiltration in the gaps remaining from the binder evaporated from the part,
- If necessary, pressure sintering [usually Hot Isostatic Pressing] as a result of processes such as the manufacture of the functional part.

2. Material and Method

2.1. Material

Materials are;

- SS316L powder,
- Photopolymer resin,

- Isopropyl alcohol,
- Para toluene sulfonic acid,
- Furfuryl alcohol

used in this study.

2.1.1. SS316 powder

Before beginning the sample manufacturing, an XRD examination of the 316L powder (with 20 – 53 μm grain sizes) was carried out and compared to the literature. The diffraction pattern of the powder analyzed in Figure 1. and in the literature in Figure 2. is given (Rokosz et al., 2015).

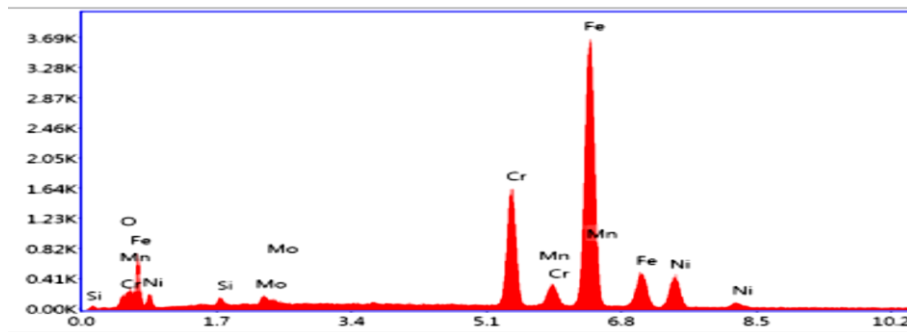


Figure 1. XRD of our study

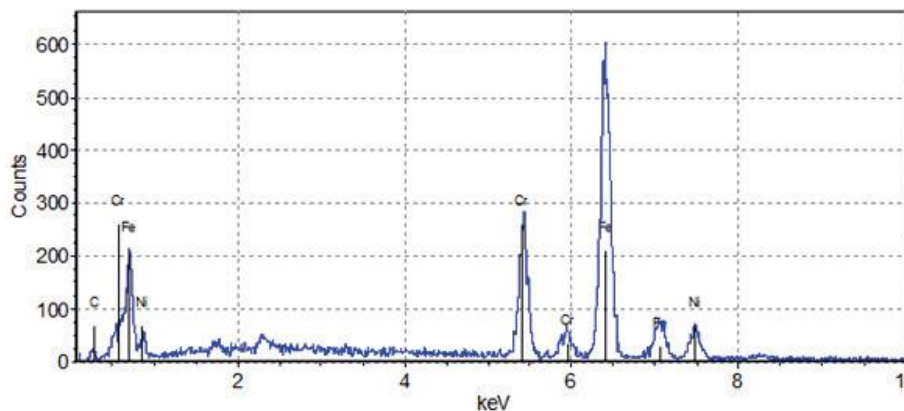


Figure 2. XRD of literature (Rokosz et al., 2015)

In Table 1., the percentages of materials are shown in comparison with the literature in terms of the powder material used. When both results were examined, it was seen that the powders were quite similar to each other, but the amount of oxygen in the powder used in the study was slightly higher.

Table 1. Composition Percentage of SS316L Powder (EOS, 2022; Renishaw, 2022)

Elements	Powder Used in Study	EOS	Renishaw
Si	0,85	0-0,75	0-1
Mo	1,5	2,25-3	2-3
Cr	17,55	17-19	16-18
Mn	2,24	0-2	0-2
Ni	11,16	13-15	10-14
C	0	0-0,03	0-0,03
S	0	0-0,01	0-0,03
P	0	0-0,025	0-0,045
N	0	0-0,1	0-0,1
Cu	0	0-0,5	0
O	1,52	0	0-0,1
Fe	Balanced	Balanced	Balanced

2.1.2. Photopolymer Resin

Photopolymer (SLA) Resin becomes polymer when light binds molecular chains together. In this way, the layers are added on top of each other and the production is made. The compositions of the resins used in the field of AM vary according to their usage areas. Standard resins can be used for visual productions, and more durable resins with ABS properties can be used for mechanical prototypes. In some model works, semi-flexible resins are preferred (3D Durak, 2022). The resin type commonly used in the SLA method was tested for the first time in the MBJ method in this study.

2.1.3. Isopropyl alcohol

Isopropyl alcohol (IPA), known by the names propan-2-ol, isopropanol or 2-propanol, is a colorless, flammable chemical with a strong odor. Its chemical formula is C_3H_8O . It dissolves IPA, ethyl cellulose, polyvinyl butyral, many oils, alkaloids and natural resins (Wikipedia, 2022a). Within the scope of the study, IPA was used to dilute the SLA resin.

2.1.4. Para toluene sulfonic acid

Para toluene sulfonic acid (p-TSA); it is a white solid chemical that is soluble in water, alcohols and other polar organic solvents. It is a strong organic acid like other sulfonic acids (Wikipedia, 2022b). In this study, p-TSA was used to act as a catalyst for the hardening of furfuryl alcohol. p-TSA powder was mixed with SS316L powder and spread on the substrate layer by layer.

2.1.5. Furfuryl alcohol

Furfuryl alcohol (FA) is a furan-containing organic compound. It cures into a resin when treated with acids, heat or catalysts. Its primary use is to be synthesized the furan resin. FA is used in cements, adhesives, coatings and casting resins (Wikipedia, 2022c). FA was used to bind the metal powders in the layers by cure with the p-TSA in this study.

2.2. Method

The methodology of the study is given at Figure 3.

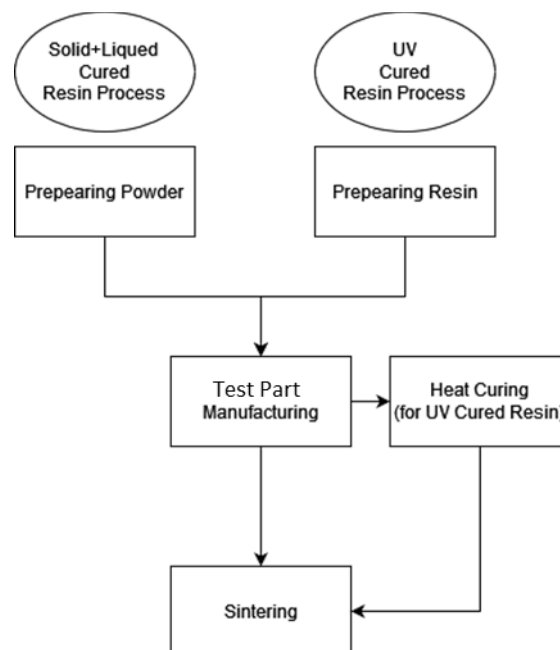


Figure 3. Diagram of methodology of the study

2.2.1. Preparing powder

Powders for solid + liquid cured manufacturing p-TSA and SS316L were mixed and made ready for manufacturing.

2.2.2. Preparing binder

SLA resin has a wettability problem when sprayed onto powders. It can't wet the powders because of the surface tension. To prevent this, SLA resin was diluted with IPA.

2.2.3. Test part manufacturing

Within the study, the samples whose mechanical properties will be examined were modeled as $\varnothing 10 \times 10$ mm cylinders as in Figure 4.

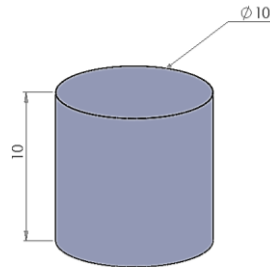


Figure 4. Test part dimensions

The powder mixture of p-TSA and 316L was laid on the fabrication table and FA was sprayed onto the layer with the spray head.

The sample in Figure 4. was also produced with SLA resin on the same bench. After SS316L powder was laid in the manufacturing area, SLA resin was sprayed according to the relevant layer geometry. The UV light source was held on the layer to cure the sprayed resin. 3D part was produced by repeating these processes.

2.2.3. Heat curing

UV curing wasn't enough for SLA resin. Because of that, test parts manufactured with SLA resin were heat cured at 175°C for 120 minutes. The large volume of the furnace required a longer curing process than literature in order to distribute the temperature homogeneously throughout the furnace (Taormina et al., 2018; Binnion et al., 2016).

2.2.4. Sintering

The produced samples were sintered at three different temperatures (1100 , 1150 and 1200°C).

In the way of the literature;

- Inside of the furnace made nitrogen atmosphere,
- Temperature increase to 450°C with $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ heating rate,
- Waited at 450°C for 90 minutes,
- For make furnace vacuum atmosphere, vacuum pump was started,
- Temperature increase to sintering temperature ($1100, 1150, 1200^{\circ}\text{C}$) with $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ heating rate,
- Waited at sintering temperature 120 minutes,
- Waited the decreasing temperature to 150°C (by itself)

steps selected as furnace process (Vangapally et al., 2017; Johnston et al., 2004; Gülsoy, 2008; Do et al., 2017; Ren et al., 2017; Mostafaei et al., 2017; Enneti et al., 2018). Temperature-time graph during sintering process is given at Figure 5.

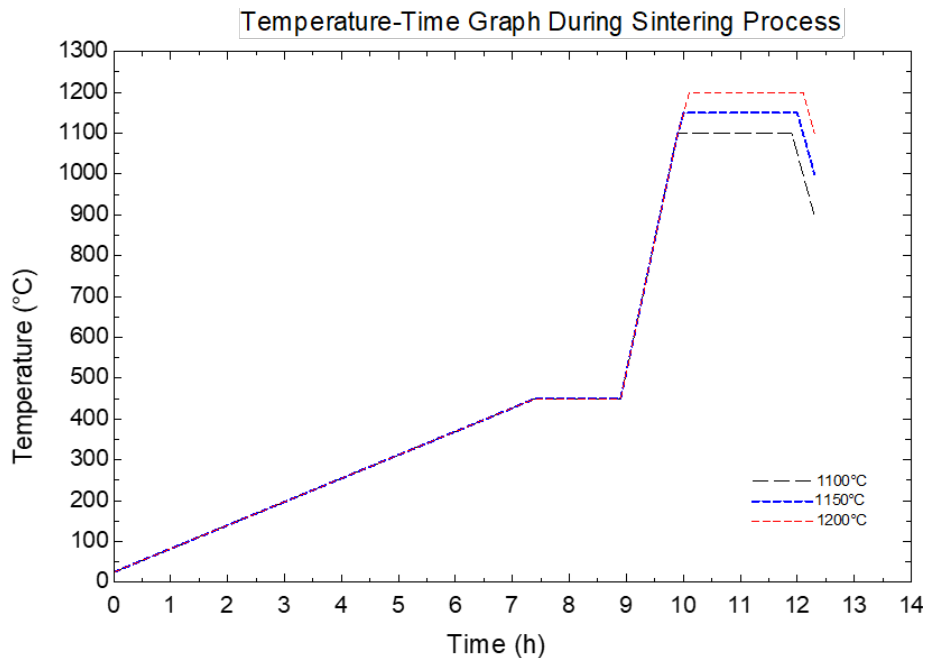


Figure 5. Sintering processes graph

The initial heating rate is selected low for the best burn-out of the binder. With the same reason, waited 90 minutes at that temperature. The reason for choosing the nitrogen atmosphere is to prevent oxidation in the parts at high temperatures and to remove the burning resin vapor from the environment with nitrogen gas. With the start of the vacuum process, it is aimed to remove the resin vapor and nitrogen from the furnace atmosphere.

While the process was planned to proceed in this way, at the initial stage of the furnace process of the samples, which were planned to be sintered at 1150°C, the furnace suddenly rose to 300-350°C, then decreased to its normal values again. However, this rise burned some of the resin and prevented the samples from being sintered as desired. Another problem is that the furnace process, which is required to continue in a vacuum environment, could not create the desired furnace environment due to the lack of good vacuuming, and the resin could not be evaporated from the part.

3. Experimental Results

The internal structures of the test parts were examined in the images examined under the microscope. The structure of the powder grains and their sintering necks are shown in Figure 6. The sinter necks formed show that the process was successful and the powder grains are made neck each other, although not at the desired level.

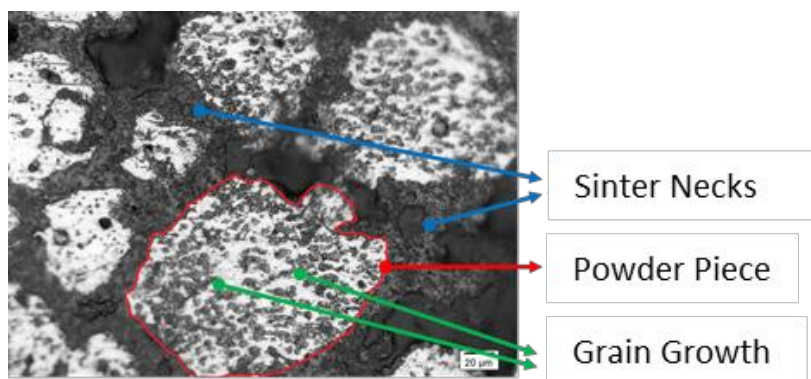


Figure 6. Microstructure of sintered sample

Figure 7. shows micro and macro pores, ferrite and austenite structures. Micro pores can be caused by the structure of the powder or for unknown reasons. Macro pores may be caused by the evaporation of the resin and the poor compaction of the powders.

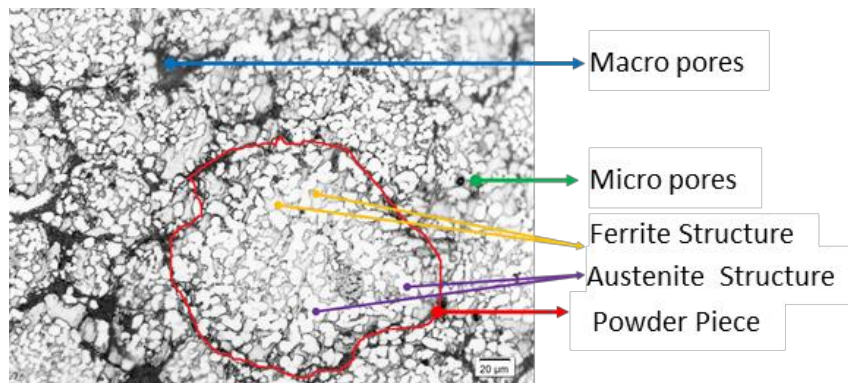


Figure 7. Etched microstructure of sintered samples

In Figure 8, ferrite and austenite structure images are given from a study in the literature (Zietala et al., 2016). Austenite cells and ferrite structures between cells can be seen in the microscope image, which is given more closely in the study.

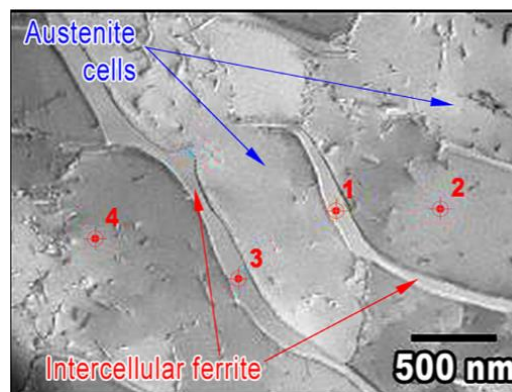


Figure 8. Etched microstructure from literature (Zietala et al., 2016)

In the atmosphere-controlled furnace environment, the nitrogen environment at first prevents the oxidation of the part. When the furnace reaches 450°C, the resin starts to burn out and mixes with nitrogen gas. After this moment, the vacuum pump is operated and the resin vapor mixed with nitrogen is removed from the environment. In cases where the vacuum cannot be done well, resin residues may remain in the part as seen in Figure 9.

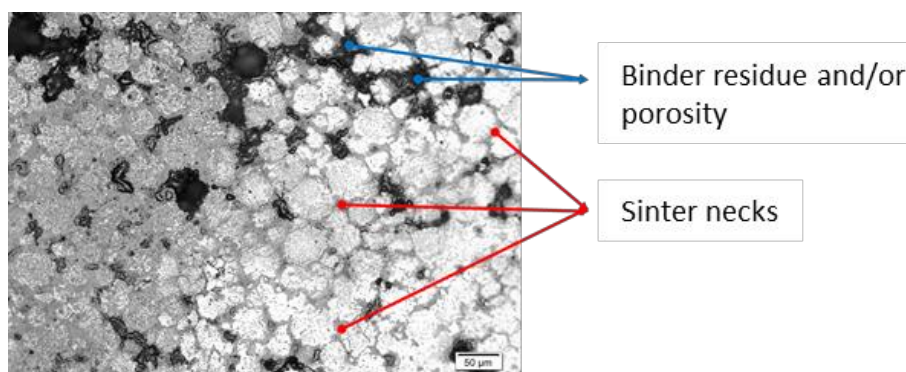


Figure 9. Porosity and binder residue at microstructure

In Figure 10., 11. and 12., the consequence of a rapid temperature rises during the heating process of the samples sintered at 1150°C is seen. While micro cracks are not visible in the samples at 1100 and 1200°C; It is quite abundant in the sample sintered at 1150°C as seen in Figure 11.

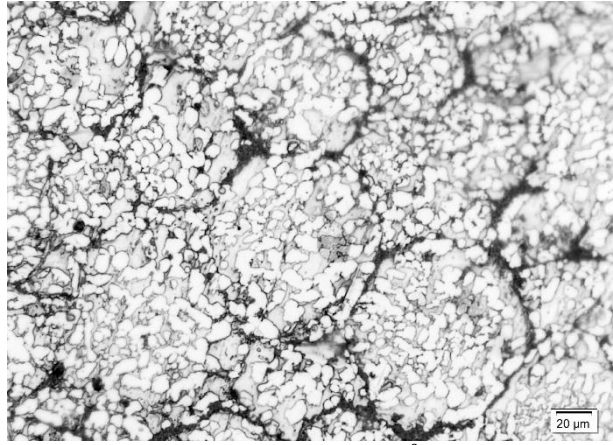


Figure 10. Microstructure at 1100°C sintered part

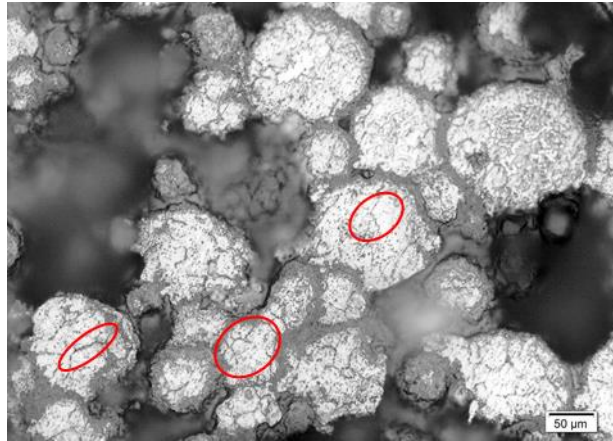


Figure 11. Microstructure at 1150°C sintered part

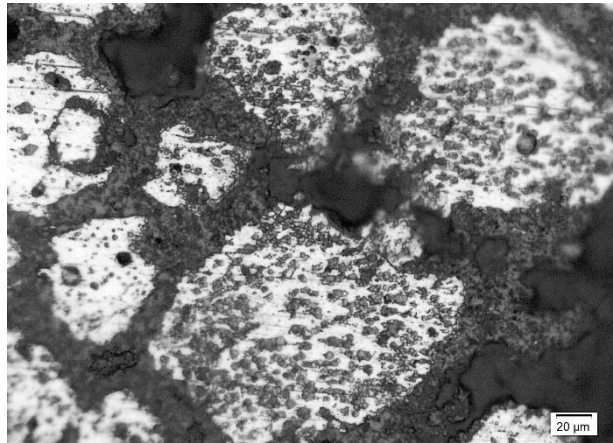


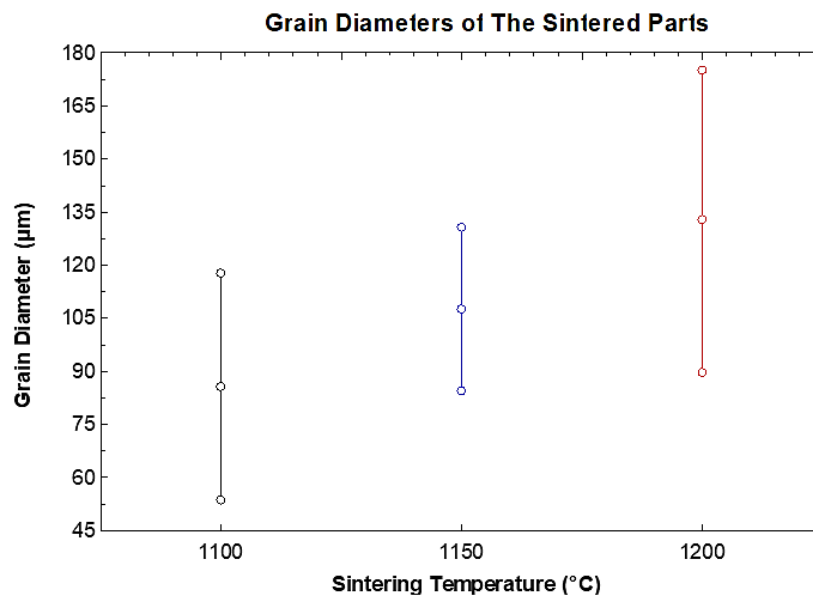
Figure 12. Microstructure at 1200°C sintered part

Grain size values according to sintering temperature and resin type are given in Table 2. The average of the measurements taken from ten grains chosen randomly was used to calculate the grain sizes.

Table 2. Grain diameters of the sintered parts

Number Of Measuring	\varnothing at 1100°C Sintering Temp. (μm)	\varnothing at 1150°C Sintering Temp. (μm)	\varnothing at 1200°C Sintering Temp. (μm)
1	53.573	84.384	89.602
2	56.060	89.899	94.081
3	57.825	91.178	124.981
4	77.907	103.355	125.331
5	79.232	107.946	148.681
6	80.769	110.147	154.090
7	84.929	121.392	159.860
8	105.820	125.276	173.710
9	111.786	127.692	174.281
10	117.648	130.605	174.991

In Figure 13. Graph of the grain diameter of the different sintering temperature.

**Figure 13.** Graph of the grain diameters of the sintered parts

In the obtained values, it was observed that the increase in the sintering temperature increased the grain sizes, similar to the literature (Stawarczyk et al., 2013; Gupta, 1972).

After sintering situation, the composition of the parts was found. At Table 3. shown the percentage of the powder which before the AM process, SLA+IPA used parts and FA+p-TSA used parts.

Table 3. EDS analysis of the sintered parts

Elements	Percentage of Powder	Percentage of SLA+IPA	Percentage of FA+p-TSA
Silicon	0,85	0,81	0,87
Molybdenum	1,5	1,33	2,98
Chromium	17,55	15,43	10,31
Manganese	2,24	2,31	0,57
Nickel	11,16	6,68	11,71
Carbon	0	12,67	5,41
Oxygen	1,52	17,05	2,95
Ferrite	Balanced	Balanced	Balanced

When the values in the table are examined, it is seen that the oxygen and carbon ratios increase as a result of sintering. The main reason for this is the non-pyrolysis binder. As a result of the burning of the binder, which cannot be removed from the part properly, at the sintering temperature, it causes the formation of oxygen and carbon waste structures in the part.

The ratio of C and O₂ among the samples produced with SLA resin is higher than those produced with p-TSA. This shows less evaporation of the resin in the part and burning residue inside the structure. The strength values of the samples decrease as the residue in the part increases.

4. Result and Discussion

Within the study, for SS316L produced by the MBJ method; the parameters related to resin type and sintering temperature were examined. It was evaluated with which parameters it gave better results in microstructure analysis.

The rapid temperature changes in heating and cooling experienced during the furnace process at 1150°C caused the formation of micro cracks in the samples. In addition, as a result of the weak vacuum process in the furnace, it causes the binder to remain in the part. This binder remaining in the part burns during sintering and causes residue.

Looking at the microstructure, it was seen that sintering between the powder grains was successful, and larger grains were formed at high temperatures. Ferrite and austenite structures in the grain were obtained. Macro and micro pores were determined. Micro pores may have been caused by a defect in the powder structure, an unknown reason. Macro pores may be the result of holes remaining from the burn out of the resins or not compacting the powders well while spreading.

For future works,

- Working with lower layer thicknesses,
- Making productions by mixing powders in different powder diameter ranges with each other,
- Sintering of samples at various temperatures,
- Trial of low resin ratios,
- Using a sintering furnace with better vacuum conditions,
- Measurement of values such as strength, density and hardness by performing HIP or infiltration on the samples,

can be recommended.

Acknowledgement

This work was supported by the Suleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: FYL-2018-6709.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- 3D Durak. (2022, April 18). SLA 3D Baskı Hizmeti. <https://www.3durak.com/pages/sla-3d-baski-hizmeti>.
- Binnion, J., & Arts, J. B. M. A New Method for Preparing 3D Acrylic Photopolymer Patterns for Investment Casting. In The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2016.
- Do, T., Kwon, P., & Shin, C. S. (2017). Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 121, 50-60.
- Duman, B., & Kayacan, M. C. SEÇMELİ LAZER SİNERLEME TEZGÂHI İÇİN İMALAT YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 27-45.
- EOS. (2022, April 18). <https://www.eos.info/en>.
- Exone. (2022, April 18). <https://www.exone.com>.
- Gupta, T. K. (1972). Possible correlation between density and grain size during sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 55(5), 276-277.
- Gülsoy, H. Ö. (2008). Production of injection moulded 316L stainless steels reinforced with TiC (N) particles. *Materials Science and Technology*, 24(12), 1484-1491.
- GÜRGEN, M., & KAYACAN, C. BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN PARAMETRELER. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 3(1), 19-27.
- Johnston, S., Frame, D., Anderson, R., & Storti, D. Strain Analysis of Initial Stage Sintering of 316L SS Three Dimensionally Printed (3DP™) Components.
- Mostafaei, A., Toman, J., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Krimer, Y. L., & Chmielus, M. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas-and water-atomized alloy 625 powders. *Acta Materialia*, 124, 280-289.
- Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier.
- Myers, K., Cortes, P., Conner, B., Wagner, T., Hetzel, B., & Peters, K. M. (2015). Structure property relationship of metal matrix syntactic foams manufactured by a binder jet printing process. *Additive Manufacturing*, 5, 54-59.

- Myers, K., Juhasz, M., Cortes, P., & Conner, B. (2015). Mechanical modeling based on numerical homogenization of an Al₂O₃/Al composite manufactured via binder jet printing. *Computational Materials Science*, 108, 128-135.
- Redwood, B., 2019. (2022, April 18). Additive Manufacturing Technologies: An Overview. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>.
- Ren, L., Zhou, X., Song, Z., Zhao, C., Liu, Q., Xue, J., & Li, X. (2017). Process parameter optimization of extrusion-based 3D metal printing utilizing PW-LDPE-SA binder system. *Materials*, 10(3), 305.
- Renishaw. (2022, April 18). <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>.
- Rokosz, K., Hryniewicz, T., Raaen, S., & Valiček, J. (2015). SEM/EDX, XPS, corrosion and surface roughness characterization of AISI 316L SS after electrochemical treatment in concentrated HNO₃. *Tehnički vjesnik*, 22(1), 125-131.
- Stawarczyk, B., Özcan, M., Hallmann, L., Ender, A., Mehl, A., & Hämmerlet, C. H. (2013). The effect of zirconia sintering temperature on flexural strength, grain size, and contrast ratio. *Clinical oral investigations*, 17(1), 269-274.
- Taormina, G., Sciancalepore, C., Bondioli, F., & Messori, M. (2018). Special resins for stereolithography: In situ generation of silver nanoparticles. *Polymers*, 10(2), 212.
- Tuffile, C. D., Lemke, H., & Mack, P. E. (2016). U.S. Patent Application No. 15/014,637.
- Vangapally, S., Agarwal, K., Sheldon, A., & Cai, S. (2017). Effect of Lattice Design and Process Parameters on Dimensional and Mechanical Properties of Binder Jet Additively Manufactured Stainless Steel 316 for Bone Scaffolds. *Procedia Manufacturing*, 10, 750-759.
- Wikipedia, 2022a. (2022, April 18). Isopropyl Alcohol. https://en.wikipedia.org/wiki/Isopropyl_alcohol.
- Wikipedia, 2022b. (2022, April 18). P-toluenesulfonic Acid. https://en.wikipedia.org/wiki/P-Toluenesulfonic_acid.
- Wikipedia, 2022c. (2022, April 18). Furfuryl Alcohol. https://en.wikipedia.org/wiki/Furfuryl_alcohol.
- YALÇIN, B., & Ergene, B. (2017). ENDÜSTRİDE YENİ EĞİLİM OLAN 3-B EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE METALURJİSİ. *SDU International Journal of Technological Science*, 9(3)
- Yin, X., Travitzky, N., & Greil, P. (2007). Near-Net-Shape Fabrication of Ti₃AlC₂-Based Composites. *International journal of applied ceramic technology*, 4(2), 184-190.
- Zhang, H., Liu, B., 2009. A New Genetic Algorithm for Order-Picking of Irregular Warehouse. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, 1, 121-124.
- Ziętala, M., Durejko, T., Polański, M., Kunce, I., Płociński, T., Zieliński, W., ... & Bojar, Z. (2016). The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering: A*, 677, 1-10.



NESNELERİN İNTERNETİ AĞLARINDA TIKANIKLIK KONTROL MEKANİZMALARI İLE RPL AMAÇ FONKSİYONLARININ KARŞILIKLI PERFORMANS ANALİZİ

Rıdvan SÖYÜ^{1*}, Alper Kamil DEMİR², Selma Ayşe ÖZEL¹

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Adana/TÜRKİYE

² Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Adana/TÜRKİYE

Anahtar Kelimeler

*Nesnelerin İnterneti,
Tıkanıklık Kontrolü,
CoAP,
RPL Amaç Fonksiyonları.*

Öz

Fiziksel nesnelerin duyargalar ve yazılımlar aracılığıyla sürekli olarak haberleşmesini sağlamak için geliştirilen Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri gün geçtikçe hayatımıza daha fazla girmektedir. Ancak, IoT ağları henüz IP ağlarındaki gibi standartlara sahip değildir. Bu ağlar için mevcut protokollerin ne kadar yeterli olduğu ve yeni protokollere ihtiyaç olup olmadığı hala araştırma konusudur. Tıkanıklık kontrolü de bu konulardan biri olup, IoT ağlarındaki sürekli ve yoğun bilgi akışından dolayı büyük öneme sahiptir. IoT ağlarında IP ağlarının aksine UDP tercih edildiğinden tıkanıklık kontrolü uygulama katmanında CoAP tarafından yapılır. Literatürde farklı CoAP tıkanıklık kontrol mekanizmalarının karşılaştırıldığı performans analizleri bulunsa da CoAP tıkanıklık kontrol mekanizmaları ile yönlendirme protokolü RPL'in farklı amaç fonksiyonları arasındaki ilişkiyi ve performans etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında farklı protokoller kullanılarak tasarlanan ağ yığını kombinasyonları Cooja benzetim ortamında araştırılmıştır. İstemci sayısının 3 ve 9, paket teslim oranı değerinin ise %80, %90 ve %100 olarak alındığı tüm benzetimlerden elde edilen ortalama gecikme ve işlem hacmi metrikleri incelendiğinde Objective Function 0 (OF0)'ın, Minimum Rank of Hysteresis Objective Function (MRHOF) algoritmasına göre daha iyi performans gösterdiğini ve CoCoA Strong'un en iyi performans gösteren tıkanıklık kontrolü mekanizması olduğu görülmüştür.

PERFORMANCE ANALYSIS OF CONGESTION CONTROL MECHANISMS WITH RPL OBJECTIVE FUNCTIONS IN IOT NETWORKS

Keywords

*Internet of Things,
Congestion Control,
CoAP,
RPL Objective Functions.*

Abstract

The Internet of Things (IoT) was developed to allow physical objects to communicate continuously via sensors and software, to take more place in our daily lives. Unlike IP networks, IoT networks do not yet have established protocols. Existing protocols' appropriateness and the need for new protocols are being researched. Congestion control is one of important research topics because of continuous and intense information flow in IoT networks. Since UDP is favored in IoT networks unlike IP networks, congestion control is handled by CoAP at the application layer. In the literature, there are performance analyses comparing different CoAP congestion control mechanisms, but no study investigating the relationship and its effects on performance between the CoAP congestion control mechanisms and the various objective functions of the RPL. In this study, all network stack combinations designed using different protocols are simulated in Cooja simulator. The average latency and throughput metrics acquired from all simulations where the number of clients is 3 to 9 and the packet delivery ratios are 80%, 90%, and 100% are investigated. CoCoA Strong was determined to be the best performing congestion control method, outperforming Objective Function 0 (OF0) and the Minimum Rank of Hysteresis Objective Function (MRHOF).

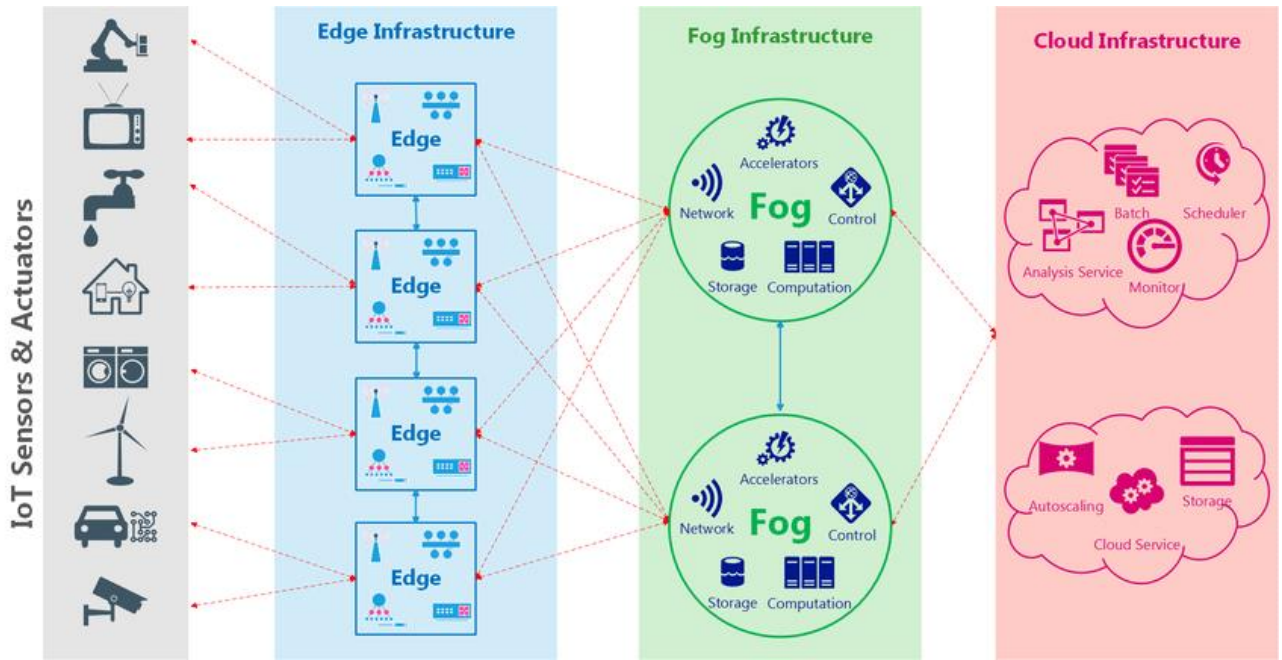
Alıntı / Cite

Soyu, R., Demir, A. K., Ozel, S. A., (2022). Nesnelerin İnterneti Ağlarında Tıkanıklık Kontrol Mekanizmaları ile RPL Amaç Fonksiyonlarının Karşılıklı Performans Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1400-1416.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
R. Söyü, 0000-0001-8939-3063	Başvuru Tarihi / Submission Date	19.10.2021
A.K. Demir, 0000-0002-9256-0368	Revizyon Tarihi / Revision Date	29.05.2022
S.A. Özel, 0000-0001-9201-6349	Kabul Tarihi / Accepted Date	24.08.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

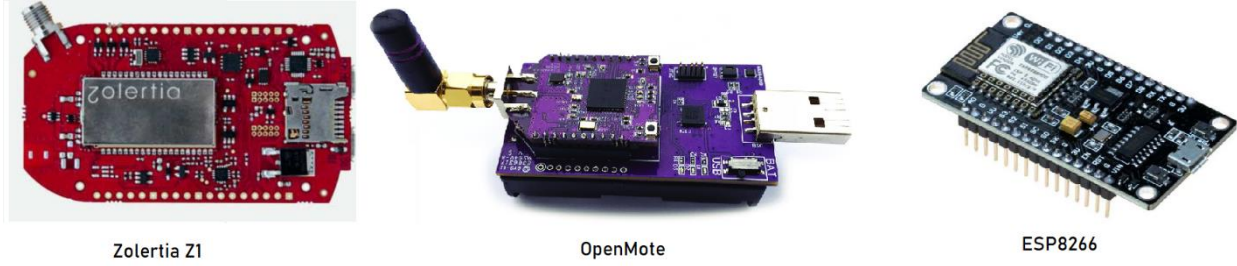
Kablosuz ağların kullanımı gün geçtikçe her türlü fiziksel nesneye ya da cihaza sirayet etmektedir. Örneğin; günümüzde akıllı evlerde bulunan sistemlerde klima ya da pencere gibi nesnelere algılayıcılar kullanılabilir. Bu algılayıcılar ile kurulan ağlar kullanıcıya evlerinin her detayı hakkında sürekli bilgi göndermektedir. Ancak bu cihazların sürekli hizmet vermesi, estetik açıdan boyutlarının yerleştirileceği konum ve çalışacağı ortama uygun tasarlanması gibi problemler bu ağlarda kullanılan donanım mimarisini ve tasarımını etkilemektedir. IoT ağları olarak nitelendirilen bu tür ağlarda birbirleriyle sürekli olarak haberleşen cihazlar kesintisiz bir güç kaynağı ve internet bağlantısına ihtiyaç duyar (Buratti vd., 2011).



Şekil 1. IoT ağlarının genel mimarisi (General architecture of IoT networks) (Cao vd., 2019)

Şekil 1 IoT ağlarının en genel mimarisini göstermekte olup standart bir kural olmasa da genellikle bu mimari 4 ana katmanda incelenir (Tiburski vd., 2019):

- **Bulut (Cloud):** Bulut katmanı en dış katman olup verilerin toplanıp depolanmasını, bu verilerin internet olan her yerden ulaşımının sağlanmasını ve bu verilerin güvenliğini sağlar.
- **Sis (Fog):** Sis katmanı verilerin uç noktalardan ağ geçitlerine taşınmasını sağlayan işlem gücü yüksek cihazlara sahip merkezi bir katmandır. Buradaki cihazlar veriyi işleyerek depolama yapar ve yerel ağa bağlı sınır cihazların yönetimini yaparlar.
- **Sınır (Edge):** Bu katman, ağ merkezine yakın konumda bulunan verilerin güvenliğini ve şifrenmesini sağlayarak, darboğaz yaratılmaması ve trafiğin azaltılması için işlem yükünü üzerine alır. Genellikle bu katman içerisinde bulunan cihazlar genellikle dizüstü ve masaüstü bilgisayarlar, erişim noktaları ve iş istasyonları gibi cihazlardır. Cihaz katmanında alınan ham veriler burada işlenerek fog katmanına gönderilir.
- **Cihaz (Device):** En içte bulunan bu katmanda sürekli veri üreten ve ağdan veri alan cihazlar bulunur. Burada bulunan cihazlara örnek olarak bir odanın sıcaklığını ölçen bir sensör, bir hastanın sağlık verilerini toplayan bir makine, ya da trafik verilerini ileten bir araba verilebilir.



Zolertia Z1

OpenMote

ESP8266

Şekil 2. Nesnelerin İnterneti ağlarında sıkça kullanılan üç farklı kısıtlı cihaz (Three different constrained devices frequently used in IoT networks) (“Development tools Archives”, 2017; Vilajosana v.d., 2015; İkizoğlu, 2020)

Şekil 2 IoT mimarisinde bahsedilen cihaz katmanında bulunan cihazlara örnek verilebilir. Resimde ilk sırada bulunan Zolertia Z1 (The Z1 Mote, 2018) MSP430 mikroişlemcisine sahiptir ve üzerinde CC2420 alıcısı bulunur. Bu çalışmada yapılan simülasyonlarda bu cihazın sanal bir örneği kullanılmıştır. Ortada bulunan cihaz OpenMote, IoT ağlarında çalışmak üzere özel tasarlanan bir cihaz olup 32KB RAM ile 512KB hafıza kapasitesine sahiptir ve üzerine işletim sistemi gömülebilir (Vilajosana v.d., 2015). Bu cihazların yanı sıra ESP8266 gibi üzerinde IoT modüllerinin ve dahili TCP/IP yığını barındıran çipler de IoT uygulamaları için sıklıkla kullanılır. 32-bit RISC mimarili işlemciye sahip bu cihaz dahili sıcaklık sensörü, WiFi ve 2.4 GHz kablosuz anten gibi modüller barındırmaktadır (Espressif, 2020).

Sürekli açık olan bu cihazlar birim zamanda olabilecek en düşük enerji sarfiyatı ile çalışmaları gerektiğinden kaynaklarını olabildiğince cimri tüketecek şekilde tasarlanmışlardır. IoT ağlarının yapıtaşları olan bu cihazlar, literatürde kısıtlı cihazlar olarak adlandırılırlar (RFC7228, 2014). Kısıtlı cihazlar bellek, bant genişliği, boyut ve enerji tüketimi açısından günümüzde kullanılan birçok cihaza göre oldukça küçük kaynaklara sahiptir.

IoT ağlarında kullanılan cihazlar günlük hayatta insanların kişisel amaçları için kullandıkları bilgisayarlar ya da akıllı telefonlar gibi olmadığından, kullanılan protokollerin de bu cihazların doğru haberleşebilmesi adına özel olarak tasarlanmaları gerekir. Örneğin günümüzde kullandığımız ağlarda HTTP (Hyper-Text Transfer Protocol) protokolü, HTML (Hyper-Text Markup Language) dokümanlarının, resimlerinin ve videolarının kaynaklar arasında transfer edilmesini sağlar. Ancak HTTP protokolü günlük hayatta kullandığımız ağ ve cihazlara göre tasarlanmış olup, hafıza ve enerji gibi endişelere yönelik tasarlanmadığından kısıtlı cihazlar üzerinde kullanılması her ne kadar mümkün olsa da ağın gereksinimleri dikkate alındığında etkili olduğu söylenemez. Bu yüzden uygulama katmanı için IoT ağlarında IETF (Internet Engineering Task Force) tarafından standart haline getirilen CoAP protokolü kullanılır. CoAP ile cihazlar aynı ya da farklı ağlar arasında birbirleri ile iletişim kurabilir ve HTTP protokolünde olduğu gibi bilgi alışverişi yapabilirler. Ayrıca CoAP, HTTP ile birlikte de çalışabilir.

IoT ağlarındaki düğümler sürekli olarak birbirleri ile çoklu gönderim (broadcast) yaparak haberleşirler. Birden fazla cihazın aynı anda aynı kaynağı kullanmak istediği durumlarda kaynak kapasitesini aşabilir ve tıkanıklık meydana gelebilir. Ayrıca trafik patlaması (traffic burst) gibi tüm algılayıcılar aynı anda mesaj göndermeye çalışacağı özel durumlarda (örneğin doğal afetler) trafikte çok kısa bir sürede artış ve beraberinde de tıkanıklık meydana gelebilir.

Geleneksel ağlarda tıkanıklık kontrolü TCP tarafından yapılır ancak CoAP, UDP üzerinde çalıştığından ve UDP’de tıkanıklık kontrolü olmadığından, CoAP’ın tıkanıklık kontrolünü de ele alması gerekir (Betzler vd., 2016). IoT ağlarındaki cihazların sürekli uyku moduna geçmesi, farklı iletişim örüntülerine sahip olması ve düşük gecikme süresine ihtiyaç duyulması bu ağlarda TCP kullanımını zorlaştıran nedenlerden birkaçıdır.

Cihazların kendi etrafındaki cihazları keşfetmesi ve yönlendirme yapabilmesi IoT ağlarında RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) sayesinde gerçekleşir (RFC6550, 2012). RPL en hızlı ve etkili şekilde yönlendirme yapabilmek için uzaklık vektörleri kullanır ve oluşturduğu ağaç topolojisi ile de en düşük maliyetli yönlendirme rotasını bulmaya çalışır. Amaç fonksiyonları ise RPL’in tüm bu işlemleri nasıl yapacağını ve rotaları hangi metrikler kullanarak optimize edeceğini belirleyen yöntemlerdir (RFC6552, 2012). Bu amaç fonksiyonlarından biri OF0 (Objective Function 0) olup farklı metrikler kullanarak belirlediği rank sistemi sayesinde düğümlerin değerini sürekli olarak hesaplar ve günceller. MRHOF (Minimum Rank of Hysteresis Objective Function) ise OF0’a göre seçmeli metrik sistemi kullanan bir amaç fonksiyonudur. Örneğin metrik olarak gecikme seçilirse MRHOF en az gecikmeye sahip rotayı bulmaya çalışır (RFC6719, 2012).

Şimdiye kadar CoAP için tekrar iletim zaman aşımı (RTO - Retransmission Timeout) hesaplama yöntemleri kullanılarak farklı tıkanıklık kontrol mekanizmaları geliştirilmiştir. Kaynak araştırması bölümünde de değinildiği

üzere daha önceki performans analizi çalışmalarında genellikle farklı metrik ve ölçümlerle bu algoritmaların karşılaştırmalı analizlerinin yapıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada ise, farklı CoAP algoritmalarının, RPL amaç fonksiyonları MRHOF ve OF0 ile bir korelasyona sahip olup olmadıkları ve performansı etkileyip etkilemedikleri olası tüm senaryolar dikkate alınarak yapılan benzetimlerle incelenmiştir. Benzetim senaryoları, her bir katman için deney sonuçlarını etkileyebilecek protokollerin kombinasyonları ile oluşturulmuştur. Benzetim sonuçlarının performansını incelemek için de ağ performans ölçümlerinde sıklıkla kullanılan işlem hacmi ve ortalama gecikme metrikleri kullanılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Tıkanıklık kontrol mekanizmaları ile amaç fonksiyonlarının performans etkisi daha önceki çalışmalarda birlikte ele alınmamış olsa da iki konunun ayrı ayrı performans analizleri bazı çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmada hazırlanan test senaryoları ve kullanılan performans metrikleri de literatürde yer alan çalışmaların incelenmesi ile belirlenmiştir.

Qasem vd. (2015) yaptıkları çalışmada ağların yoğunluğunu rastgele ve ızgara topolojileri kullanarak dikkate almış ve paket alma oranı, güç tüketimi gibi parametreler kullanarak az yoğunluklu ağlarda OF0'ın, çok yoğunluklu ağlarda ise MRHOF'un daha iyi çalıştığını göstermişlerdir.

Pradeska vd. (2016) amaç fonksiyonlarının performanslarını ağ yakınsama zamanı, enerji tüketimi, paket teslim oranı (PDR - Packet Delivery Ratio) ve gecikme gibi parametreler kullanarak karşılaştırdıkları çalışmalarında MRHOF'un ağ kalitesi açısından daha iyi olduğunu ve güvenilir ağlar için kullanıma daha uygun olduğunu, OF0'ın ise enerji tüketimi konusunda ve ağın kalitesinden ziyade hızlı aktarım gerektiren ağların yapısına daha uygun olduğunu göstermişlerdir. Benzer bir çalışma yapan Lamaazi vd. (2017) ise parametre olarak kayıp paketler, enerji, beklenen iletim (ETX - Expected Transmission) ve atlama (hop) sayısını aldıkları çalışmalarında konuyu farklı bir yönden ele almış ve düğümler hareketli iken OF0, düğümler hareketsiz iken MRHOF'un daha etkili olduğu, farklı düğüm dağılımlarında ise iki amaç fonksiyonunun da benzer sonuçlar ürettiği sonucuna varmışlardır.

Abuein vd. (2016) orta yoğunluklu ağlar olarak bahsettikleri topolojilerde OF0 ve MRHOF amaç fonksiyonlarını PDR, güç tüketimi ve paket alma oranı (RX - Packet Reception Ratio) gibi metrikler kullanarak ızgara (grid) ve rastgele (random) topolojilerde incelemişlerdir. Rastgele topolojilerde MRHOF'un, ızgara topolojilerde ise OF0'ın daha çok enerji tükettiğini, ancak düğüm sayısı ve paket alma oranlarının farklı olması durumunda da farklı sonuçlar alınabileceğini göstermişlerdir.

Cooja benzetim ortamı kullanarak yaptıkları çalışmada Mardini vd. (2017), OF0 ve MRHOF amaç fonksiyonlarının performans analizini gelen paket sayısı, kayıp paket sayısı, enerji tüketimi ve görev döngüsü (duty cycle) parametrelerinin ortalamalarını baz alarak yapmıştır. Farklı topolojiler (static-grid ve mobile-random) kullanarak yaptıkları çalışmalarının sonucunda enerji tüketimi ele alındığında OF0'ın MRHOF'a göre daha verimli sonuçlar ortaya çıkardığını bulmuşlardır.

Onwuegbuzie vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada Contiki işletim sistemi için yazılan bir RPL mekanizması olan ContikiRPL kullanılarak MRHOF ve OF0 amaç fonksiyonlarının performansları incelenmiştir. Bu amaç fonksiyonlarının davranış ve performanslarının düğüm sayısına göre nasıl değiştiğini ölçmek amacıyla sayıları 10 ile 100 arasında değişen düğümler kullanmışlardır. Çalışmada performans değerlendirme metrikleri olarak paket iletim oranı, gecikme ve güç tüketimi ölçümleri yapılmış ve bu değerlerin MRHOF kullanıldığı zaman OF0'a göre daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Arabellek taşması durumunda gerçekleşen tıkanıklığı önlemek amacıyla Al-Kashoash vd. (2016) yaptıkları çalışmada Buffer Occupancy (Arabellek Sahipliği) adlı yeni bir RPL yönlendirme metriği geliştirmişlerdir. Bunun yanı sıra Congestion-Aware Objective Function adlı yeni bir amaç fonksiyonu geliştiren araştırmacılar, geliştirilen bu fonksiyonu ETX-OF, ENERGY-OF ve OF0 amaç fonksiyonları ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak bu fonksiyonun tıkanıklık problemini kayıp paket, işlem hacmi, paket iletim oranı ve enerji tüketimi baz alındığında %37.4 iyileştirdiğini görmüşlerdir.

Yeni bir RPL yönlendirme metriğinin geliştirildiği Xiao vd. (2014) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise PER-HOP-ETX metriği önerilmiştir. Bir düğümden başlayarak ETX değerini toplayarak giden ETX metriklerinin aksine, ETX değerini bir yoldan düğümlerden köke ulaştıran bu metrik MRHOF amaç fonksiyonu optimize edilerek

geliştirilmiştir. Ağ gecikmesi, paket iletim oranı ve enerji karşılaştırıldığında ise büyük ölçekli ağlarda OF0 ve ETX-OF gibi diğer metriklere göre daha iyi çalıştığı gözlenmiştir.

Sonia ve Virani (2021) tarafından yapılan çalışmada bulanık mantık teknikleri ile hop sayısı, bir düğümün artık enerjisi ve ETX kullanılarak yeni bir amaç fonksiyonu olan RPL-FZ tasarlanmıştır. Contiki işletim sistemi üzerinde yapılan performans değerlendirmesinden sonra RPL-FZ'nin MRHOF ve OF0'a göre özellikle yüksek yoğunluklu ağlarda daha performans verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Farklı senaryolar ve değişken ağ yoğunluğu ile yapılan testlerde paket iletim oranı, enerji tüketimi, gecikme ve trafik yükü parametre alınmıştır.

Betzler vd. tıkanıklık kontrol mekanizmalarının performansına dair iki farklı çalışma yapmışlardır. Bunların ilkinde (2016) Default CoAP CC (ön tanımlı CoAP tıkanıklık kontrol mekanizması), farklı algoritma takviyeleri kullanılarak CoCoA adlı bir tıkanıklık kontrol mekanizmasına evrilmiş ve Default CoAP CC'nin performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu mekanizma ile 5 farklı mekanizmanın aynı koşullarda performansını karşılaştırarak CoCoA'nın daha üstün olduğu sonucuna varmışlardır. Diğer çalışmada (2015) ise CoCoA+ adında yeni bir algoritma geliştirerek önceki algoritma CoCoA'yı geliştirmeyi esas almışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda ise CoCoA+ algoritmasının Default CoAP CC ve CoCoA'dan daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Demir ve Abut (2018), Default CoAP CC ve CoCoA algoritmalarının performansını farklı izgara topolojilerinde sürekli mesajlar kullanarak incelemişlerdir. Çalışmaları göstermiştir ki, önceki çalışmaların aksine işlem hacmi metriği baz alındığında CoCoA her zaman Default CoAP CC den üstün değildir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada yazılım, donanım ve ağ kapsamında birçok protokol ve programdan yararlanılmıştır. Yazılımlar benzetim ortamını hazırlamak ve kurmak için, donanımlar benzetimi gerçekleştirebilmek için kullanılmıştır. Ağ katmanında ise farklı ağ yapıları farklı protokoller ile kurulmuş, performans metrikleri ile de benzetim sonuçları elde edilip analizi yapılmıştır.

3.1.1. Yazılım Ortamları (Software Environments)

Benzetimleri gerçekleştirmek için kullanılacak cihazlara gömülme üzere IoT ağları için özel olarak geliştirilmiş ve açık kaynak kodlu Contiki-NG ("Contiki-NG: The OS for Next Generation IoT Devices", 2020) işletim sistemi kullanılmıştır. İçerisinde ağ benzetimleri yapma imkânı sunan Cooja ("Cooja Simulator", 2016) ağ benzetim ortamını barındırması, farklı mikroişlemci mimarilerine sahip sanal cihazları (ARM Cortex-M3/M4 ve MSP430 gibi) hazır olarak bulundurması, birçok ağ protokolü ve sürücüsünü desteklemesi, Contiki-NG işletim sisteminin tercih edilmesinde en büyük etken olmuştur.

CoAP istemcileri için; Java programlama dili kullanılarak geliştirilmiş ve içerisinde birden fazla hazır tıkanıklık kontrol mekanizması bulunduran Californium ("Eclipse Californium", 2020) uygulaması kullanılmıştır. CoAP sunucuları ise Contiki-NG işletim sistemi ile gelen örnek uygulamalardan faydalanılarak oluşturulmuştur. Bu sunucular ise Erbium ("A Quick Introduction to the Erbium (Er) REST Engine", 2016) adında C programlama dili ile geliştirilen tıkanıklık kontrol mekanizmasına sahiptir. Erbium ve Californium tıkanıklık kontrol mekanizmaları geliştirilirken RFC 7252 baz alınmıştır.

3.1.2. Donanım Ortamları (Hardware Environments)

Cooja ağ benzetim ortamı, üzerinde gerçeğe oldukça yakın şekilde hazırlanmış sanal cihazlar barındırır. Benzetimler için fiziksel donanımlar kullanılmamış olsa da Cooja'nın desteklediği bu sanal cihazlardan biri olan Zolertia Z1 Mote ("The Z1 mote", 2018) kullanılmıştır. Z1 platformu genel amaçlı bir platform olup kablosuz algılayıcılar ağları için özel olarak tasarlanmıştır. Genel özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- İkinci nesil MSP430F2617 düşük güç mikroçip ve CC2420 alıcısı
- 16-bit RISC mimarisine sahip 16 MHz CPU
- 8KB RAM bellek
- 92KB Flash bellek (depolama alanı)
- 250Kbps veri aktarım oranı için 2.4GHz çekim gücü

3.1.3. Ağ Yığını (Network Stack)

Her ne kadar günümüzde TCP/IP ağ yığını her alanda kullanılıp yeterli olsa da IoT ağlarının gereksinimleri ve çalışma şekli farklı olduğundan geleneksel ağ yığınlarına göre farklı bir yapı kullanılmalıdır. Bundan ötürü IoT ağlarında nasıl bir ağ yapısı olması gerektiğine dair bilgi vermek faydalı olacaktır.

3.1.3.1. Uygulama Katmanı (Application Layer)

IoT ağlarında uygulama katmanı tarafından servisler ve uygulamalar son kullanıcının kullanabileceği şekilde sağlanır. Bu katman IoT cihazları ile ağ arasındaki iletişimi sağlamak amacıyla genelde internet tarayıcıları tarafından kullanılabilen bir ara yüze de sahiptir. Ancak her ne kadar bu iletişimi HTTP ile yapmak mümkün olsa da IoT ağının kısıtlı ortamına (enerji, depolama alanı vs.) uygun olmayacağından sadece kısıtlı cihazlarda kullanılmak üzere HTTP'ye oldukça benzer RESTful mimarisi ile UDP üzerinde çalışan CoAP protokolü geliştirilmiştir. IoT ağlarında TCP kullanılmadığından tıkanıklık kontrol görevini CoAP protokolü yerine getirir. Bu yüzden de farklı RTO hesaplamalarının baz alındığı birden fazla CoAP protokolü bulunmaktadır. Ayrıca IoT ağ yığnında TCP üzerinde çalışan ve IBM tarafından geliştirilmiş MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protokolü de bulunmaktadır (Locke, 2010).

3.1.3.2. İletim Katmanı (Transport Layer)

İletim katmanında geleneksel ağlarda TCP ve UDP protokolleri kullanılır. IoT ağlarında her ne kadar TCP ile çalışmak mümkün olsa da ağın gereksinimi ve çalışma şekli dikkate alındığında UDP kullanmak daha faydalı olacaktır. Çünkü TCP düşük enerji gerektiren ağlarda iletim için uygun değildir ve başlık değeri oldukça uzundur. UDP de ise daha kısa olup bağlantısız olması nedeniyle TCP'ye göre daha az kaynak harcar ve TCP'den daha hızlı çalışır (RFC768, 1980).

3.1.3.3. Ağ Katmanı (Network Layer)

IoT ağlarında ağ katmanında yönlendirmeyi yapan protokol olan RPL anahtar rol oynamaktadır. Bu protokol bir ağ topolojisinde kullanılan tüm cihazlara ait adres ve konum verisini toplayarak ağın adeta bir haritasını çıkarır. Uzaklık vektörleri kullanarak cihazlar arası mesafeyi ağa getireceği yük bakımından hesaplar. Bu sayede veri aktarımının yapılacağı en uygun ve hızlı yolu belirlemeye çalışır. Uzaklık vektörlerinin yanı sıra RPL içerisinde barındırdığı amaç fonksiyonlarını kullanarak belirli bazı metrikler ile iki cihaz arasındaki transferin maliyetini belirler. Bu amaç fonksiyonlarından en çok bilinenleri OF0 (RFC6552, 2012) ve MRHOF'tur (RFC6719, 2012). Bunların yanı sıra ağ katmanında IoT ağlarında kullanılacak yoğun cihaz sayısı da düşünüldüğünde IPv4 adres sayısının yetmeyeceğinden dolayı IoT ağlarında tercih edilen ve daha fazla sayıda cihaz adresleme yeteneğine sahip IPv6 (Rayes ve Salam, 2017) kullanılmıştır.

3.1.3.4. Uyarılama Katmanı (Adaptation Layer)

IoT ağları için IPv4 yerine ölçeklenebilirlik ve kararlılık açısından daha uygun olan IPv6 tercih edilir. IPv6 1280 bayt MTU (Maximum Transmission Unit - Maksimum İletim Birimi) kullanır. Ancak IEEE 802.15.4 bağlantıları 127 bayt MTU kullandığından IPv6 paketlerinin de 127 baytlık çerçeveler halinde uygun bir şekilde parçalanması ve yeniden birleştirilmesi için ekstra bir katman bulunur. Uyarılama katmanı adı verilen bu katmanda bulunan 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) protokolü verilerin parçalanmasını ve başlıkların sıkıştırılmasını sağlayarak cihazların daha az enerji ile çalışmasını sağlayarak dışardaki farklı ağlarla da haberleşmesini sağlar. Bu yüzden IoT ağlarında bir sınır yönlendirici kullanılır ve ağ bu yönlendirici vasıtasıyla dışarıya açılır (Vasseur ve Dunkels, 2010).

3.1.3.5. Ağ Erişim Katmanı (MAC Layer)

MAC (Medium Access Control - Ortam Erişim Yönetimi) katmanı ağ yığnında en önemli görevlerden biri olan paket çarpışmalarını tespit etmeye ve önlemeye sağlayan protokoller bulundurur. Bu katmanda bulunan protokoller bir çarpışma tespit ettiklerinde farklı yeniden gönderim mekanizmaları kullanarak paket kayıplarının telafi edilmesini sağlarlar (Halcu vd., 2016). Contiki işletim sistemi üzerinde farklı MAC protokolleri (TSCH, NullMAC) bulunsa da NullMAC protokolü ağ üzerinde paket çarpışması yokmuş gibi tasarlandığından gerçek senaryoların test edilmesi açısından uygun değildir ve çalışma sonuçlarının yorumlanması konusunda olumsuz etkilere neden olacaktır. Bu nedenle bu çalışmada sadece SMA (Carrier-Sense Medium Access - Taşıyıcı Dinleyen Çoklu Erişim) kullanılmıştır.

3.1.3.6. RDC Katmanı (RDC Layer)

Geleneksel ağların aksine IoT ağlarında kullanılan cihazlar sürekli açık (always-on devices) olduklarından radyo aktivitesini düzenlemek ve harcanan enerjiyi minimum seviyeye getirip cihazların az enerji ile uzun süreler çalışabilmesi için ağ yığnında bu görevi üstlenen farklı protokollerin bulunduğu RDC (Radio Duty Cycle – Radyo Görev Döngüsü) katmanı yer alır. Cihazların enerji tasarrufu yapması için kullanılacak en basit yöntem cihazların iş yapmadığı süre içerisinde kapalı kalmasını sağlayıp, iş yapacağını anlayacağı esnada ise kendini açmasıdır. Bunun için de kullanılan RDC protokolü ortamı periyodik olarak dinleyerek aktivite tespit ettiğinde cihazı uyandırmalıdır (“MAC Protocols in ContikiOS”,2014). Bu katmanda kullanılan ContikiMAC, NullRDC, X-MAC, CX-MAC gibi birden fazla protokol bulunsa da bu çalışmanın gereksinimine en uygun olan ContikiMAC ve NullRDC seçilmiştir. ContikiMAC protokolü cihazların çalışma süresinin %99’u kadar bir süre boyunca kapalı kalmasını sağlayarak oldukça iyi bir enerji tasarrufu vaat eder (Dunkels, 2011). NullRDC kullanıldığında ise radyo sürekli olarak açık konumda bulunur.

3.1.3.7. Fiziksel Katman (Physical Layer)

IoT ağ yığnında radyo katmanı olarak da adlandırılan fiziksel katman; paketlerin bit bazında yorumlanarak elektrik sinyali haline dönüştürülüp iletim ortamına aktarımından veya bu ortamdan gelen elektrik sinyallerinin yorumlanmasından sorumludur. Bu katmanda standart olarak kabul edilen IEEE 802.15.4 protokolü kullanılır (“IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4)”, t.y.). Bu protokol fiziksel katmanın ve veri bağlantı katmanının standartlarını ve kurallarını belirler. IoT ağlarının kısıtlı ortamlarda çalıştığı dikkate alınarak bu protokol kısa mesafe ve düşük enerjili iletişim için tasarlanmıştır. Bu yüzden paket boyutu 127 bayt, bant genişliği de 250 kbps ile sınırlandırılmıştır.

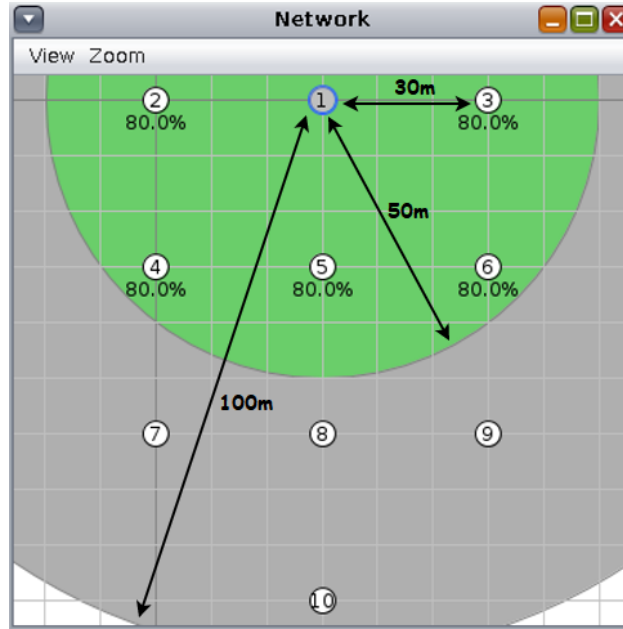
3.2. Yöntem (Method)

3.2.1. Performans Metrikleri (Performance Metrics)

Bu çalışmada işlem hacmi ve ortalama gecikme olmak üzere en yaygın kullanılan iki performans metriği ile analiz yapılmıştır. Birim zamandaki başarılı transferlerin sayısı dikkate alınarak her bir testin sonuçlarından ortalama işlem hacmi elde edilmiştir. İstemcinin hiç mesaj alamadığı durumlar ayıklanarak hesaplamalarda göz ardı edilmiştir. Ayrıca gecikme bazlı ölçümler bir ağın performansını test etmek için oldukça etkili bir yöntem olduğundan, bir paketin kaynaktan hedefe ulaşması için gereken süre, yani ortalama gecikme, ikinci metrik olarak kullanılmıştır.

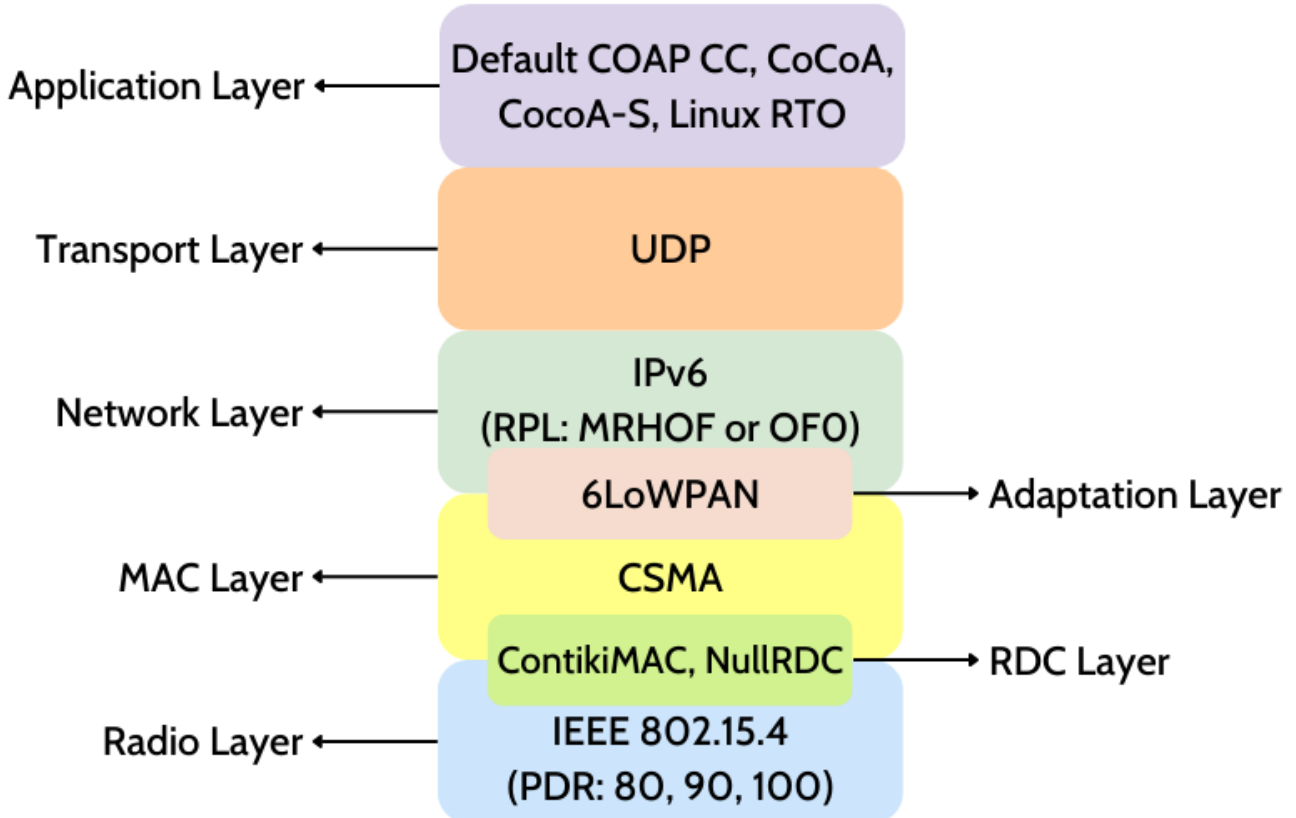
3.2.2. Benzetim Ortamı (Simulation Environment)

Deneyler hazırlanırken olabildiğince fazla kombinasyon kullanılarak ağ performansının ölçülmesinde tüm etmenlerin ne derece etki ettiğini analiz etmek esas alınmıştır. Contiki-NG içerisinde bulunan ağ benzetim ortamı Cooja üzerinde 1 tane sınır yönlendiricisi (border router) ve 9 adet CoAP serverdan oluşan bir ağ topolojisi hazırlanmış, farklı trafik yoğunluğunda tıkanıklığı gözlemlemek için de istemci sayısı 3 ve 9 olarak belirlenmiştir. Cooja ortamındaki sunucular üzerinde CoAP’ın Erbium uygulaması kullanılmış, istemci tarafında ise testlerde kullanılacak tüm CoAP uygulamalarını içeren Californium kullanılmıştır. Şekil 3 deneyler için tasarlanmış ağ topolojisini göstermektedir. 1 numaralı düğüm sınır yönlendiricisidir. Her bir düğüm, en yakın düğüme 30 metre uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. İletim menzili 50 metre, girişim menzili ise 100 metre olarak belirlenmiştir. Düğümler üzerinde görünen %80 ise PDR değerini göstermektedir.



Şekil 3. Benzetimler için tasarlanan ağ topolojisi (Network topology designed for simulations)

Her benzetim senaryosu düğümler üzerindeki kuyruğun tamamen boşalması ve sonuçlara etki edecek olası bir gürültüyü engellemek adına aralarında 1 dakikalık bekleme süresi olacak şekilde 3 kez tekrarlanmıştır. İstemciler aynı anda çalışmaya başlayarak 3 dakika boyunca sunucudan veri çekmeye çalışmıştır. Tıkanıklığın daha iyi gözlemlenmesi için birden fazla istemci art-arda (back-to-back) olarak mesaj göndermiştir.



Şekil 4. Simülasyonlarda kullanılan ağ yığını ve her katmanda kullanılan protokoller (The network stack used in the simulations and the protocols used at each layer)

Şekil 4'te görülebileceği üzere CoAP sunucularının ağ yığınları farklı protokoller kullanılarak programlanmıştır. RDC katmanı için ContikiMAC ve NullRDC, ağ katmanındaki RPL için ise MRHOF ve OFO kullanılmıştır. Taşıma

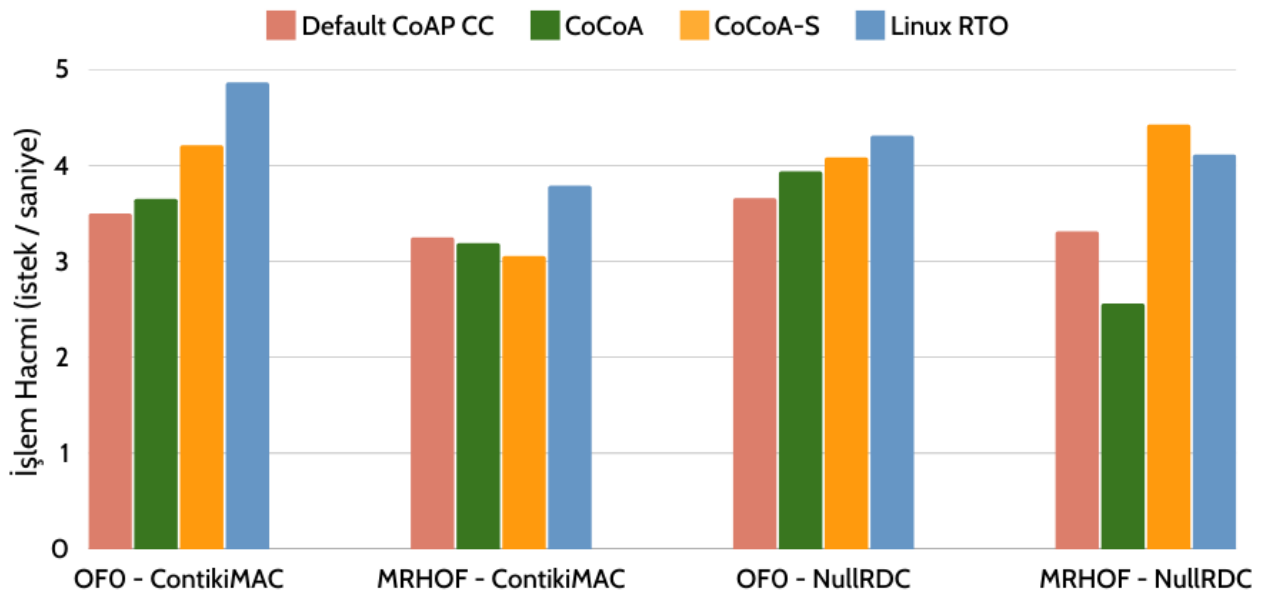
katmanında ise UDP kullanılmış, TCP ise kullanılmamıştır. NullMAC protokolü Contiki-NG üzerinde kullanıma hazır olsa da deneylere etkisi olmayacağından MAC katmanında sadece CSMA kullanılmıştır. Radyo katmanı için PDR değerleri Cooja üzerinde %80, %90, ve %100 olarak 3 farklı şekilde alınmıştır. İstemciler için ise uygulama katmanında Default CoAP CC, CoCoA, CoCoA-S ve Linux-RTO protokolleri kullanılmıştır. Bu protokollere benzer yöntemler kullanan tıkanıklık kontrol mekanizmaları PeakHopper-RTO ve Basic RTO daha önceki çalışmalar (Betzler vd., 2015; Betzler vd., 2016) incelendiğinde benzetim sonuçlarına etki etmeyeceği görüldüğü için kullanılmamıştır.

4. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Hazırlanan deney ortamı üzerinde toplam 96 farklı senaryo kullanılmıştır. Her bir senaryo üç kez tekrarlandığı için de 288 adet test yapılmıştır. Bu testlerden alınan sonuçlar iki farklı metrik kullanılarak analiz edilmiştir. Bu metrikler işlem hacmi ve ortalama gecikmedir.

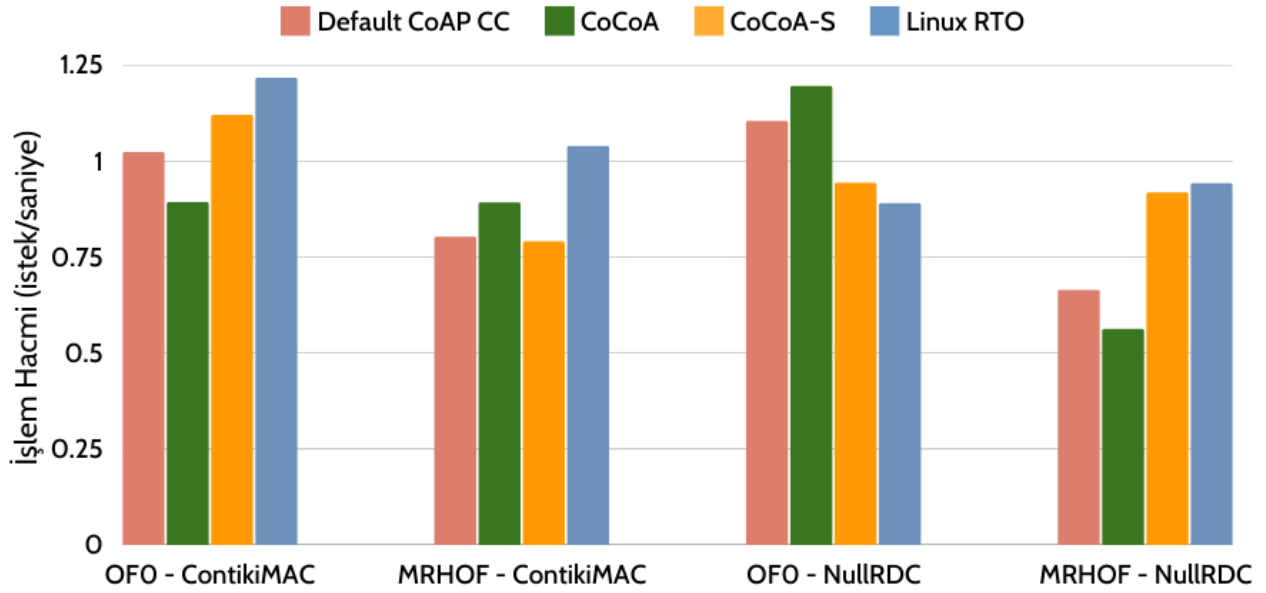
4.1. İşlem Hacmi (Throughput)

Bu bölümde performans kriteri olarak işlem hacmi alınmış, oluşturulan grafiklerle de tıkanıklık kontrol mekanizmaları ile amaç fonksiyonlarının karşılaştırması yapılmıştır.



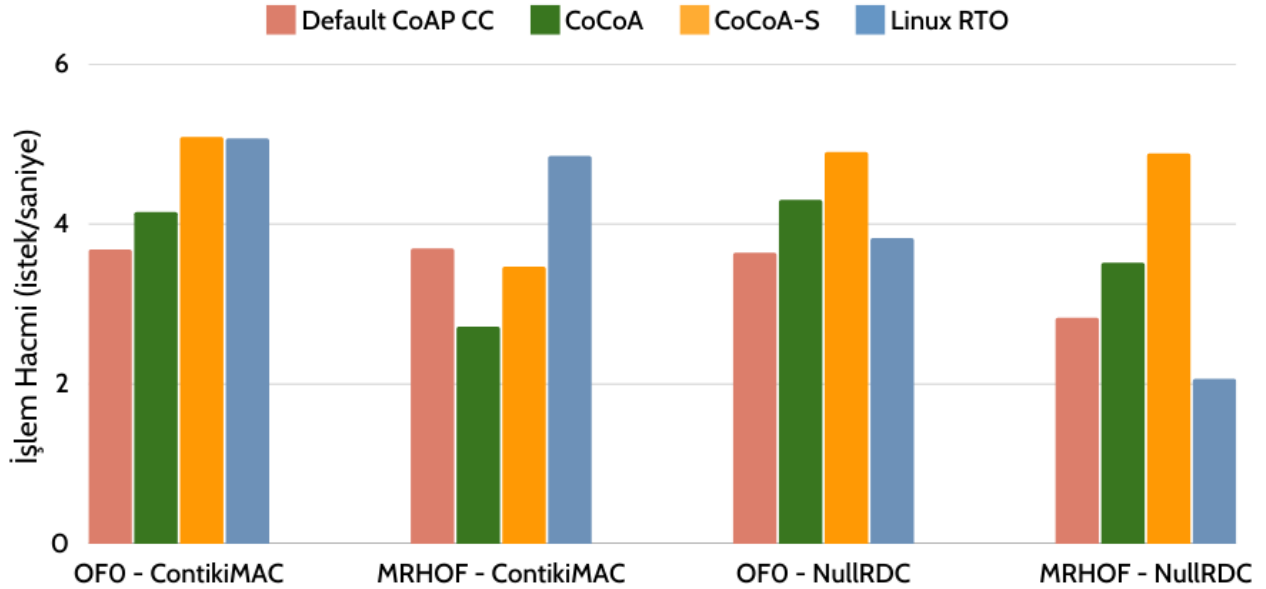
Şekil 5. PDR değeri %80 ve istemci sayısı 3 iken alınan işlem hacmi sonuçları
(Throughput results when the PDR value is 80% and the number of clients is 3)

Şekil 5'teki grafiğe bakıldığı zaman PDR değeri %80, istemci sayısı 3 iken hem ContikiMAC hem de NullRDC için OFO, MRHOF'tan daha iyi sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte ContikiMAC yerine NullRDC kullanıldığında da OFO yine daha iyi performans sergilemiştir. Grafiğe tıkanıklık kontrol mekanizmaları açısından bakıldığında genel olarak Linux-RTO'nun diğer mekanizmalardan daha başarılı olduğu görülmektedir.



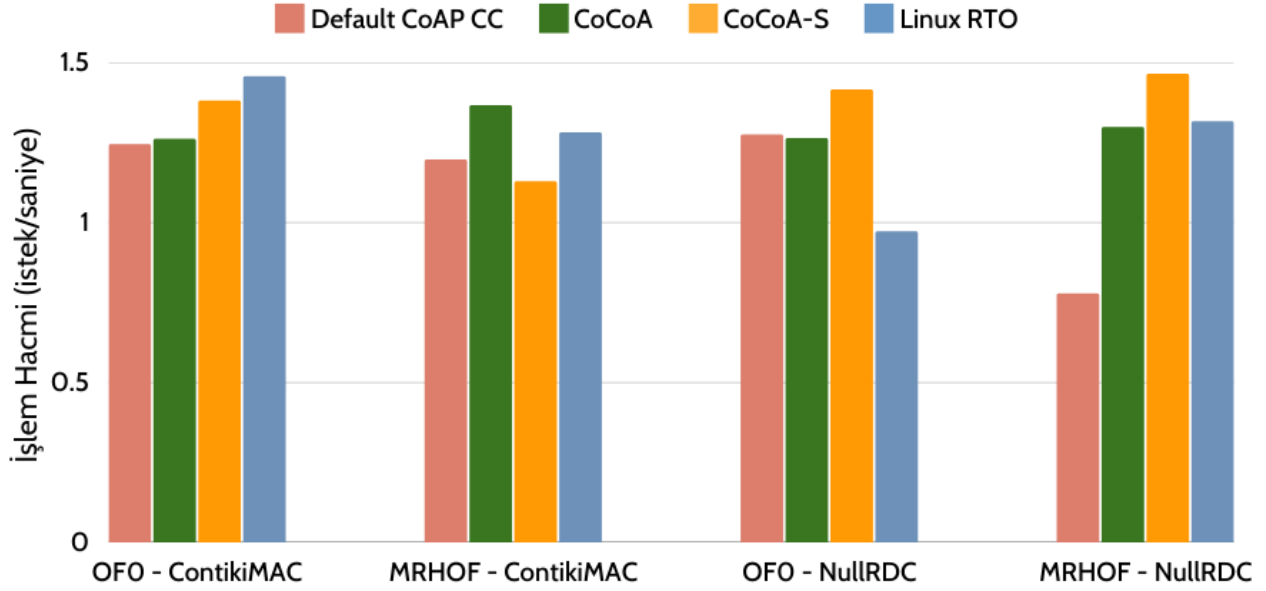
Şekil 6. PDR değeri %80 ve istemci sayısı 9 iken alınan işlem hacmi sonuçları
(Throughput results when the PDR value is 80% and the number of clients is 9)

Şekil 6’da görüldüğü üzere PDR değeri % 80 olduğunda ve istemci sayısı 9’a çıkarıldığında, MRHOF kullanılan senaryolarda en iyi performansı Linux-RTO gösterirken, OFO kullanılan senaryolarda ise tıkanıklık kontrol mekanizması performansının RDC katmanındaki protokole bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Genel anlamda bir değerlendirme yapılırsa işlem hacmi, Linux-RTO kullanılan senaryolarda daha yüksek çıkmıştır. OFO kullanılan senaryolar incelendiğinde işlem hacminin MRHOF kullanılan senaryolara göre daha yüksek çıktığı görülmektedir.



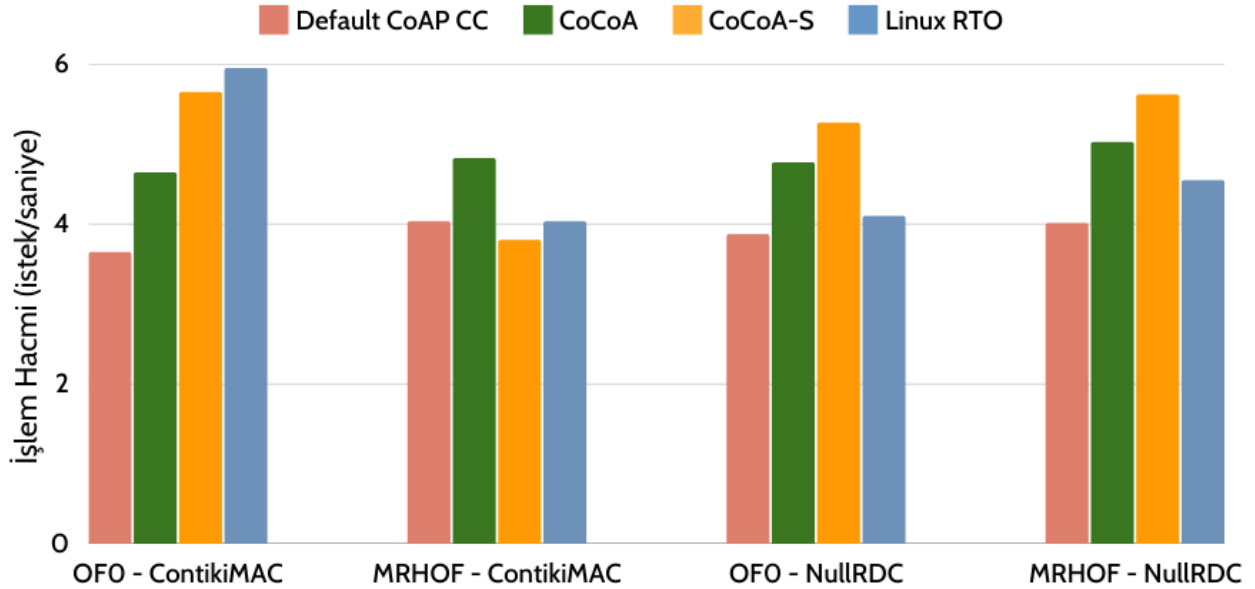
Şekil 7. PDR değeri %90 ve istemci sayısı 3 iken alınan işlem hacmi sonuçları
(Throughput results when the PDR value is 90% and the number of clients is 3)

PDR değerinin % 90 ve istemci sayısının 3 olarak belirlendiği benzetimlerde alınan sonuçların yer aldığı Şekil 7’ye bakıldığında genel itibarıyla CoCoA-S diğer tıkanıklık algoritmalarına göre genel anlamda üstünlük sağlamıştır. OFO’nun tıkanıklık kontrol mekanizmalarının performansı açısından genellikle MRHOF’a göre daha üstün olduğu görülmektedir.



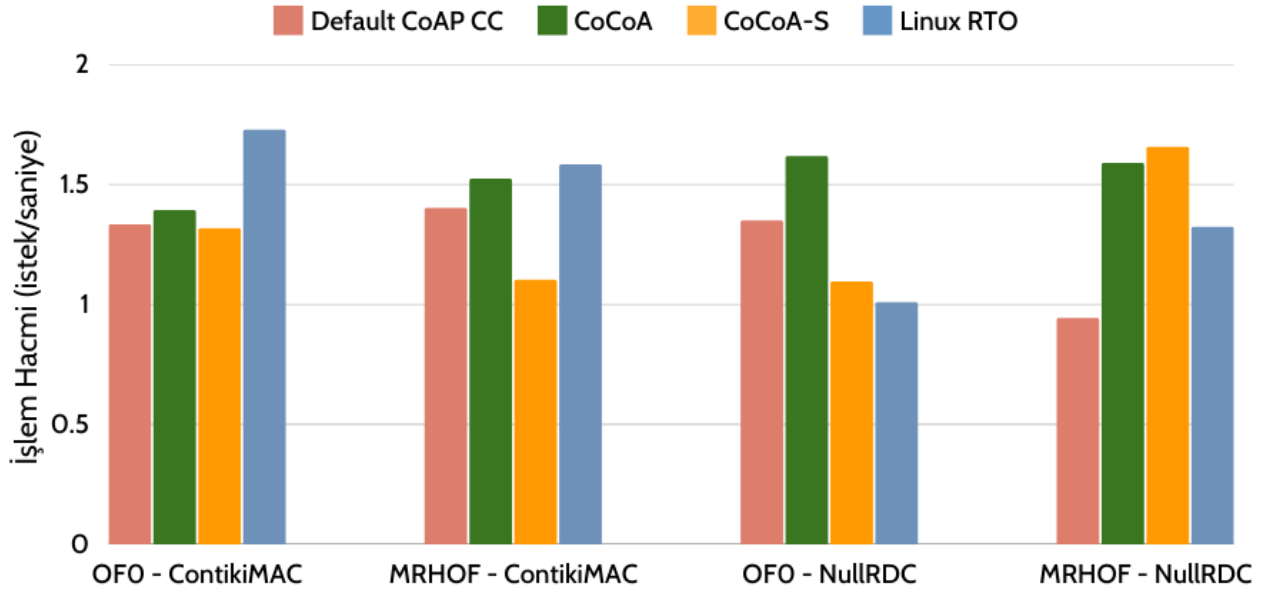
Şekil 8. PDR değeri %90 ve istemci sayısı 9 iken alınan işlem hacmi sonuçları
(Throughput results when the PDR value is 90% and the number of clients is 9)

İstemci sayısının 9 ve PDR değerinin ise % 90 olarak alındığı senaryolarda ise alınan sonuçlar benzer olsa da Şekil 8 dikkatli incelendiğinde ContikiMAC kullanılan senaryolarda OFO ile tıkanıklık kontrol mekanizmalarının daha iyi performansa sahip olduğu, ancak CoCoA için bu durumun tam tersinin mevcut olduğu görülmektedir. NullRDC kullanılan senaryolarda MRHOF'un OF'a göre Linux-RTO üzerinde pozitif, Default CoAP CC açısından negatif etki yarattığı görülmüştür. Tıkanıklık kontrol mekanizmalarından CoCoA performans olarak CoCoA-S ten daha iyi sonuçlara sahiptir.



Şekil 9. PDR değeri %100 ve istemci sayısı 3 iken alınan işlem hacmi sonuçları
(Throughput results when the PDR value is 100% and the number of clients is 3)

PDR değerinin % 100 olarak alındığı ve istemci sayısının 3 olduğu senaryoların sonuçlarının gösterildiği Şekil 9'a bakıldığında, OFO kullanıldığında ContikiMAC; MRHOF kullanıldığında ise NullRDC daha etkili performans vermiştir. Tıkanıklık kontrol mekanizmaları, NullRDC kullanılan senaryolarda amaç fonksiyonlarının performansa etkisi pek olmasa da ContikiMAC kullanılan senaryolarda OFO ile elde edilen sonuçlarının MRHOF'tan daha iyi olduğu görülmektedir. Her şart altında en stabil sonuçları CoCoA verse de en başarılı performansı CoCoA-S sağlamıştır.

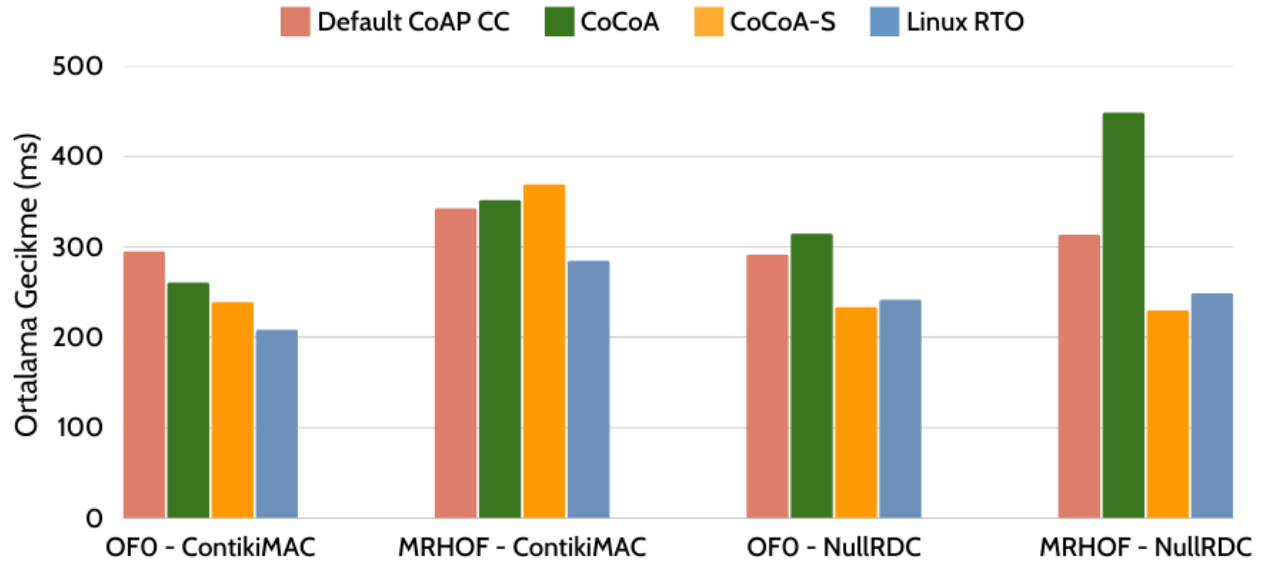


Şekil 10. PDR değeri %100 ve istemci sayısı 9 iken alınan işlem hacmi sonuçları
(Throughput results when the PDR value is 100% and the number of clients is 9)

Şekil 10 PDR değerinin % 100 olarak alındığı ve istemci sayısının 9 olduğu senaryoların sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde ContikiMAC kullanıldığında Linux-RTO daha verimli sonuçlar verirken, NullRDC kullanılan testlerde CoCoA'nın daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. ContikiMAC kullanılan testlerde MRHOF'un kullanılması CoCoA-S ile Linux-RTO'nun verimliliğini düşürdüğü, Default CoAP CC ile CoCoA'nın daha verimliliğini artırdığı gözlenmiştir. NullRDC kullanılan senaryolar baz alındığında ise bunun tam tersi olarak CoCoA-S ile Linux-RTO'nun performansının yükseldiği, Default CoAP CC ile CoCoA'nın performansının ise düştüğü görülmüştür.

4.2. Ortalama Gecikme (Average Delay)

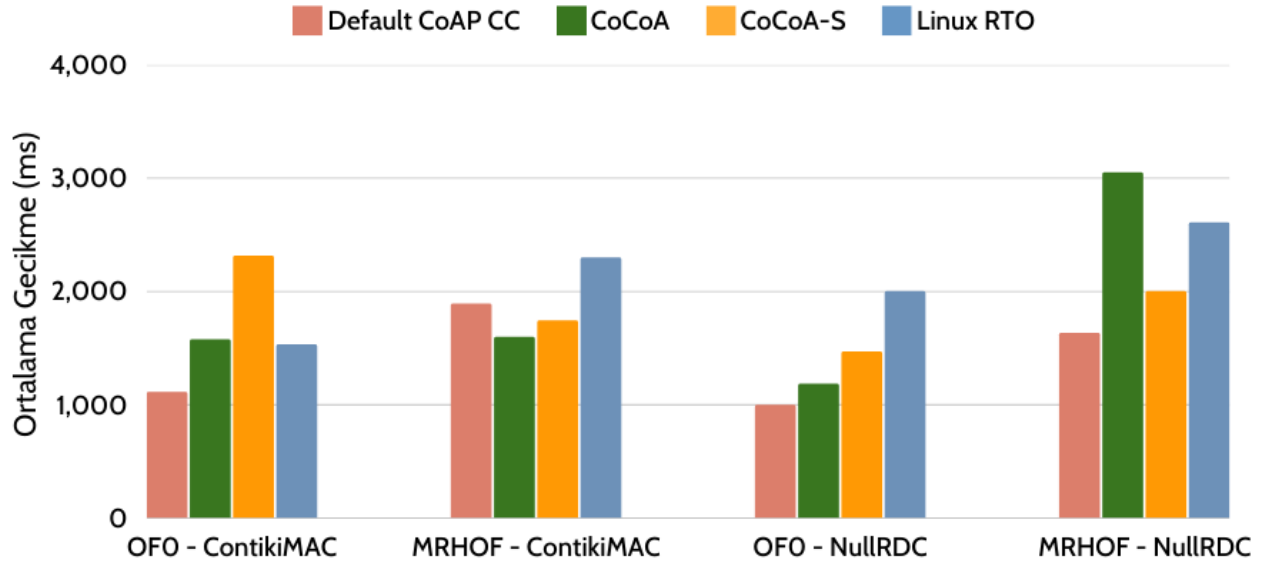
Bu bölümde performans kriteri olarak ortalama gecikme süresi alınmış, bir önceki bölümde de olduğu gibi oluşturulan grafiklerle tıkanıklık kontrol mekanizmaları ile amaç fonksiyonlarının karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 11. PDR değeri %80 ve istemci sayısı 3 iken alınan ortalama gecikme sonuçları
(Average latency results at 80% PDR and 3 clients)

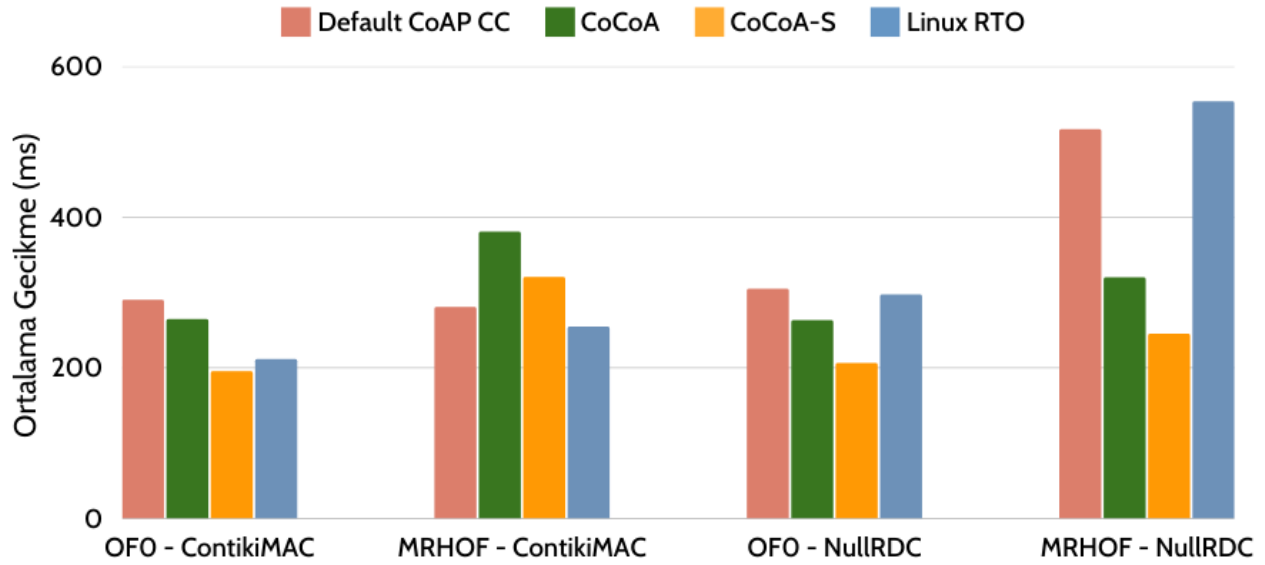
Ortalama gecikme sonuçlarını, PDR değeri % 80 ve istemci sayısı 3 iken Şekil 11 yardımıyla incelediğimizde Linux-RTO diğer mekanizmalara göre performans konusunda üstünlük sağlamıştır. NullRDC kullanılan senaryolarda CoCoA için OFO yerine MRHOF kullanılmasının performansı düşürerek daha fazla gecikmeye sebebiyet verdiği, ancak diğer algoritmaların çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Ancak ContikiMAC için elde edilen sonuçlar

incelendiğinde MRHOF'un her algoritma için daha fazla gecikmeye neden olduğu ve OFO'nun daha başarılı olduğu sonucu çıkmıştır.



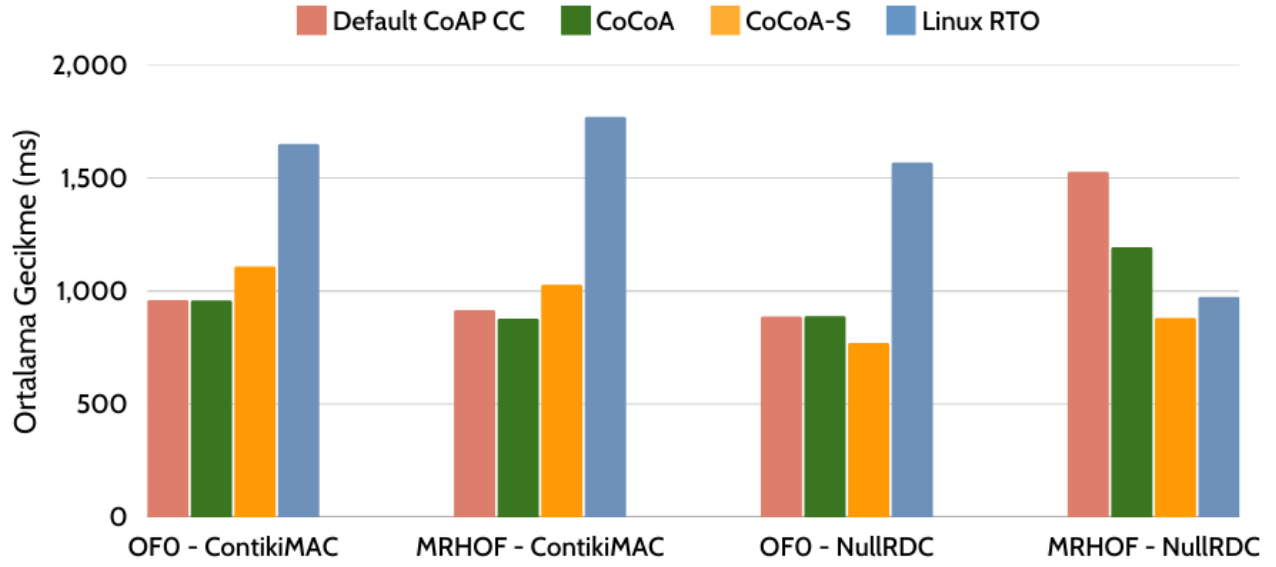
Şekil 12. PDR değeri %80 ve istemci sayısı 9 iken alınan ortalama gecikme sonuçları
(Average latency results at 80% PDR and 9 clients)

Ancak Şekil 12 incelendiğinde PDR değeri % 80 iken istemci sayısı 9 olduğunda Default CoAP CC daha verimli sonuçlar vermiştir. MRHOF ise OFO ile kıyaslandığında daha önceki sonuçlara benzer şekilde daha fazla gecikmeye sebebiyet vermiştir. OFO kullanıldığında NullRDC, MRHOF kullanıldığında ise ContikiMAC protokolleri kullanılan senaryolarda daha iyi performans alınmıştır.



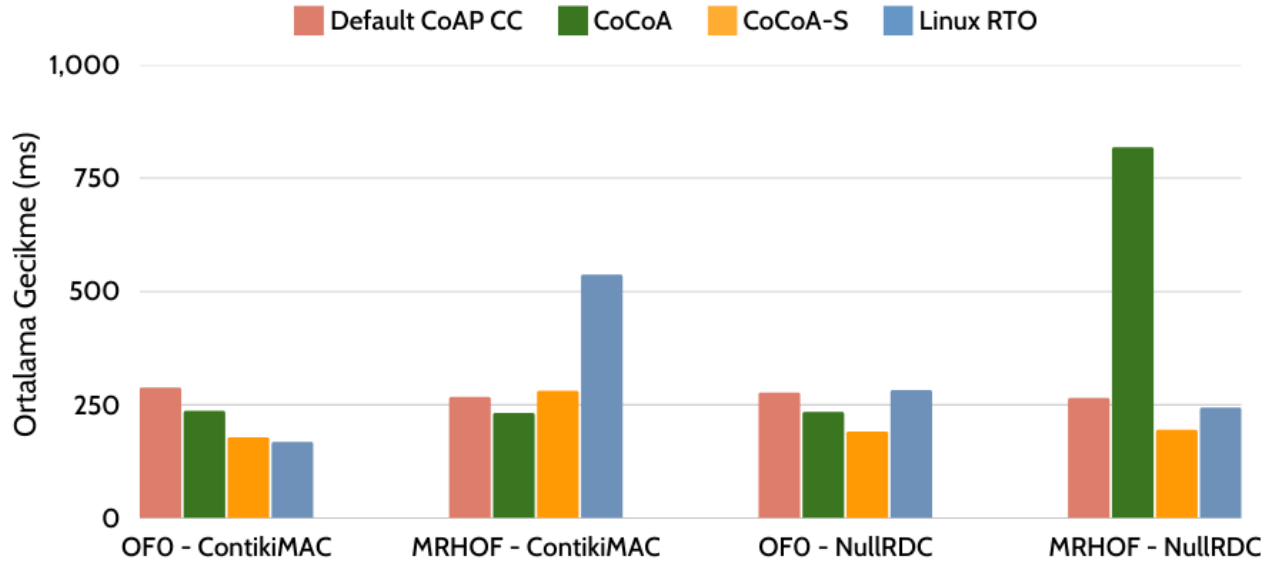
Şekil 13. PDR değeri %90 ve istemci sayısı 3 iken alınan ortalama gecikme sonuçları
(Average latency results at 90% PDR and 3 clients)

Şekil 13'te görüldüğü üzere PDR değerini % 90 olarak aldığımızda CoCoA-S diğer algoritmalarla nazaran daha iyi performans sergilemiştir. Yine OFO'nun MRHOF'a göre üstünlüğü kendini göstermektedir. Genel itibariyle ContikiMAC, NullRDC'ye göre daha iyi sonuçlar vermiştir.



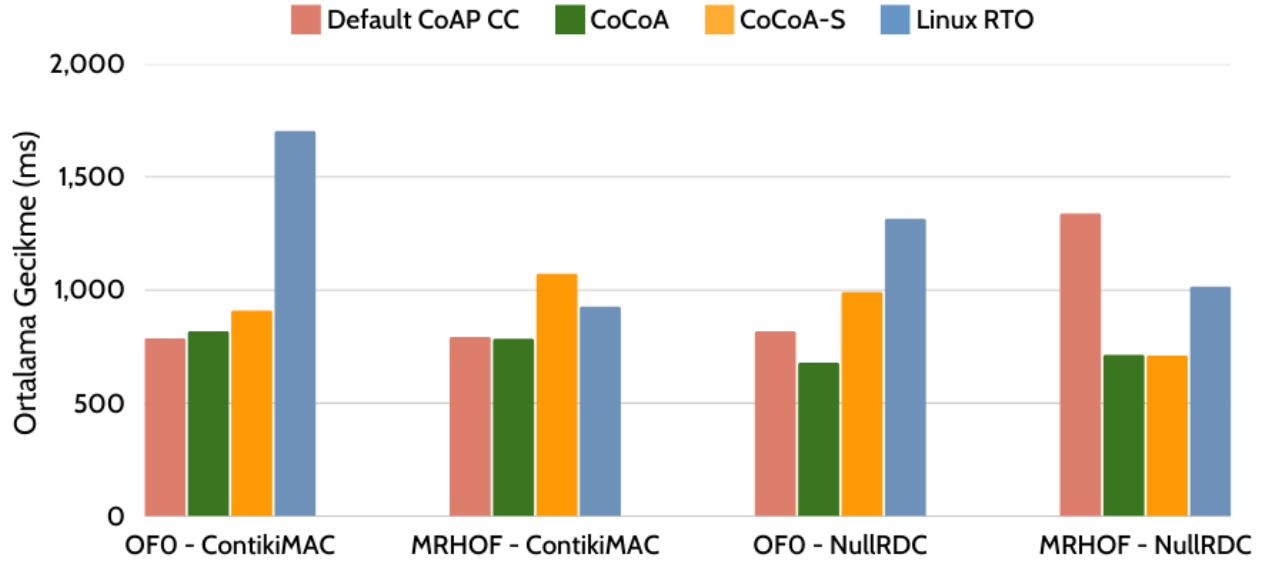
Şekil 14. PDR değeri %90 ve istemci sayısı 9 iken alınan ortalama gecikme sonuçları
(Average latency results when PDR is 90% and number of clients is 9)

PDR değeri %90 ve istemci sayısı 9 olarak alındığında, Şekil 14'te de görüldüğü üzere, dikkat çeken husus Linux-RTO'nun diğer mekanizmalara göre ciddi anlamda kötü performans sergilediğidir. Bunun dışında ise istemci sayısının 3 olduğu senaryolarla benzer sonuçlar alınmıştır.



Şekil 15. PDR değeri %100 ve istemci sayısı 3 iken alınan ortalama gecikme sonuçları
(Average latency results when PDR is 100% and number of clients is 3)

PDR değeri %100 olarak belirlenen, 3 istemci kullanılan testlerin sonuçlarının gösterildiği Şekil 15 incelendiğinde dikkat çeken iki sonuç bulunmaktadır. CoCoA'nın MRHOF ve NullRDC kullanılan testlerde, Linux-RTO'nun ise MRHOF ve ContikiMAC ile bir arada kullanıldığında oldukça kötü performans sergilediği görülmüştür. Bu testlerde tıkanıklık kontrol mekanizmaları içerisinde en başarılı sonuçları CoCoA-S almıştır.



Şekil 16. PDR değeri %100 ve istemci sayısı 9 iken alınan ortalama gecikme sonuçları
(Average latency results when PDR is 100% and number of clients is 9)

Ancak PDR değeri %100 iken 9 istemci ile veri çekilen testler Şekil 16 yardımıyla incelendiğinde CoCoA'nın daha verimli olduğu görülmektedir. OFO kullanılan testlerde alınan sonuçların birbirine daha yakın olduğu görülürken en belirgin sapmalar MRHOF kullanılan testlerde görülmektedir. Bu sebeple OFO'nun hem daha verimli hem de daha stabil bir çalışma performansına sahip olduğu görülmüştür.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada RPL amaç fonksiyonları ve tıkanıklık kontrol mekanizmaları arasında performansa dair bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmıştır. Tüm sonuçlar incelendiğinde, en iyi performansın CoCoA-S'in OFO ile beraber kullanıldığında alındığı görülmüştür. Ancak sonuçlar çoğunlukla bunu gösterse de bazı istisnai durumlar da vardır. Bu yüzden her durum için amaç fonksiyonları ve tıkanıklık kontrol mekanizmalarının en iyi kombinasyonunu önermek yerine, kurulacak ağıın karakterine ve ihtiyaçlarına göre bu mekanizmaların belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden farklı benzetimler ile ağ kurulmadan önce test yapılması faydalı olacaktır.

Örneğin, CoCoA-S 3 istemci ile aynı anda veri çekilen bir ağda daha iyi sonuçlar verirken, istemci sayısı 9 olduğunda CoCoA daha iyi sonuçlar vermektedir. Buradan da istemci sayısının fazla olduğu ağ topolojilerinde CoCoA'nın kullanılmasının daha iyi olacağı söylenebilir. Benzer şekilde, genelde OFO'nun daha iyi sonuçlar verdiği görülse de istemci sayısı arttıkça Linux-RTO kullanılan topolojilerde MRHOF'un OFO dan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen sonuçların göz önüne alınmasıyla, probleme özgü ağ topolojisinin karakterinin belirlenmesi en iyi yöntem olacaktır.

Bu çalışma ile, RPL amaç fonksiyonları ile farklı CoAP tıkanıklık kontrol mekanizmalarının birbirleri ile kombinasyonlarının kullanıldığı ağ topolojilerinin performansı iki farklı metrik kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Şimdiye kadar IoT ve WSN ağları için tıkanıklık mekanizması olarak tamamen standart haline dönüştürülmüş bir protokol bulunmaması, IoT ve WSN ağlarındaki ağ örüntüsünün geleneksel ağlardan farklılığından ötürü mevcut TCP tıkanıklık kontrol mekanizmalarının yeterli olmamasından dolayı, bu çalışmadaki performans analizinin bir genelleme oluşturma adına oldukça faydalı olacağına inanılmaktadır.

Benzetim sonuçları incelendiğinde OFO ve CoCoA-S birlikte kullanıldığında sonuçlar diğer olası kombinasyonlardan daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca RDC katmanında ContikiMAC kullanılmasının da yine performansı olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Bir IoT ağı kurmadan önce bu çalışmada olduğu gibi hazırlanacak farklı test senaryoları ile bir ön çalışma yapılması, kurulacak IoT ağ katmanının en iyi performansı vermesi adına oldukça faydalı olacaktır.

Sonraki çalışmalarda Default CoAP CC ile daha uyumlu çalışacak amaç fonksiyonlarının tasarlanması araştırmaya açıktır. Bununla birlikte OFO ve MRHOF'tan daha efektif bir RPL amaç fonksiyonu geliştirilecektir. Ayrıca farklı CoAP CC mekanizmaları ile beraber bu çalışmada yer almayan 6TiSCH standardının (Vilajosana vd., 2020) performanslarının incelenmesi hedeflenmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- A Quick Introduction to the Erbium (Er) REST Engine. (2016). Çevrimiçi: <https://github.com/contiki-os/contiki/tree/master/examples/er-rest-example> (Erişim tarihi: 11.12.2020)
- Al-Kashoash, H. A., Al-Nidawi, Y., & Kemp, A. H. (2016). Congestion-aware RPL for 6LoWPAN networks. 2016 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 1-6.
- Abuein, Q., Yassein, M. B., Shatnawi, M. Q., & Bani-Yaseen, L. (2016). Performance Evaluation of Routing Protocol (RPL) for Internet of Things. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 7.
- Betzler, A., Gomez, C., Demirkol, I., & Paradells, J. (2015). CoCoA+: An advanced congestion control mechanism for CoAP. Ad Hoc Networks, 33, 126-139.
- Betzler, A., Gomez, C., Demirkol, I., & Paradells, J. (2016). CoAP Congestion Control for the Internet of Things. IEEE Communications Magazine, 54(7), 154-160.
- Buratti, C., Martalo, M., Ferrari, G., & Verdone, R. (2011). Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems: Distributed Processing, MAC, and Connectivity (1 ed.). Berlin: Springer.
- Buratti, C., Martalo, M., Verdone, R., & Ferrari, G. (2011). Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems. In Signals and Communication Technology. Berlin: Springer.
- Cao, H., Wachowicz, M., Renso, C., & Carlini, E. (2019). Analytics Everywhere: Generating Insights From the Internet of Things. IEEE Access, 7, 71749-71769.
- CoAP in Java. (2020). Çevrimiçi: <http://www.eclipse.org/californium> (Erişim tarihi: 14.10.2020)
- Contiki-NG: The OS for Next Generation IoT Devices. (2020). Çevrimiçi: <https://github.com/contiki-ng/contiki-ng> (Erişim tarihi: 18.03.2021)
- Cooja Simulator. (2016). Çevrimiçi: http://anrg.usc.edu/contiki/index.php/Cooja_Simulator (Erişim tarihi: 14.10.2020)
- Demir, A. K., & Abut, F. (2018). Comparison of CoAP and CoCoA Congestion Control Mechanisms in Network Topologies. GÜFBED CMES 2018 Sempozyum Ek Sayısı, (pp. 53-60). Gümüşhane.
- Development tools Archives. (2017). Çevrimiçi: <https://zolertia.io/product-category/development-tools/> (Erişim tarihi: 23.03.2020)
- Dunkels, A. (2011). The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol.
- Dunkels, A., Gronvall, B., & Voigt, T. (2004). Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks., (pp. 455-462). Tampa, FL, USA.
- Espressif. (2020). ESP8266EX Datasheet. Retrieved from Espressif: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
- Halcu, I., Stamatescu, G., Stamatescu, I., & Sgârciu, V. (2016). IPV6 Sensor Networks Modeling for Security and Communication Evaluation. In E. Pricop, & G. Stamatescu, Recent Advances in Systems Safety and Security (p. 251). Berlin: Springer International Publishing.
- IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4). (2010). Çevrimiçi: <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> (Erişim tarihi: 12.05.2020)
- Insense Examples. (2011). Çevrimiçi: <https://insense.cs.st-andrews.ac.uk/examples> (Erişim tarihi: 23.03.2020)
- İkizoğlu, K. (2020) Nesnelerin İnterneti için NodeMCU. Çevrimiçi: <http://blog.ikizoglu.com/2020/02/nesnelerin-interneti-icin-nodemcu/> (Erişim tarihi: 12.04.2022)
- Kovatsch, M., Lanter, M., & Shelby, Z. (2014). Californium: Scalable cloud services for the Internet of Things with CoAP. International Conference on the Internet of Things, (pp. 1-6). Seoul, Korea.
- Lamaazi, H., Benamar, N., & Jara, A. J. (2017). Study of the Impact of Designed Objective Function in the RPL-Based Routing Protocol. In R. El-Azouzi, D. Menasche, E. Sabir, F. De Pellegrini, & M. Benjillai, Advances in Ubiquitous Networking 2. UNet 2016. Lecture Notes in Electrical Engineering (Vol. 397). Singapore: Springer.
- Locke, D. (2010). MQ telemetry transport (MQTT) v3.1 protocol specification. IBM developerWorks Technical Library.
- MAC protocols in ContikiOS. (2014). Çevrimiçi: https://anrg.usc.edu/contiki/index.php/MAC_protocols_in_ContikiOS (Erişim tarihi: 23.12.2019)
- Mardini, W., Ebrahim, M., & Al-Rudaini, M. (2017). Comprehensive performance analysis of RPL objective functions in IoT networks. International Journal of Communication Networks and Information Security, 9, 323-332.
- Onwuegbuzie, I., Ajibade, S., Fele, T., & Akinwamide, S. (2020). Performance Evaluation of RPL Objective Function: A Case of Contiki Operation System. Preprints.
- Pradeska, N., Widyawan, Najib, W., & Kusumawardani, S. S. (2016). Performance analysis of objective function MRHOF and OF0 in routing protocol RPL IPV6 over low power wireless personal area networks (6LoWPAN). 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), (pp. 1-6). Yogyakarta.
- Qasem, M., Altwassi, H. S., Yassein, M. B., & Al-Dubai, A. Y. (2015). Performance Evaluation of RPL Objective Functions. 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing, 1606-1613.
- Rayes, A., & Salam, S. (2017). Internet of Things From Hype to Reality: The Road to Digitization. Springer.
- RFC768, "User Datagram Protocol", (2012).
- RFC6550, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks", (2012).

- RFC6552, "Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)", (2012).
- RFC6719, "The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function", (2012).
- RFC7228, "Terminology for Constrained-Node Networks", (2014).
- Sonia, K., & Virani, H. (2021). Design of an Efficient RPL Objective Function for Internet of Things Applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6), 228-235.
- The Z1 Mote. (2018). Çevrimiçi: <https://github.com/Zolertia/Resources/wiki/The-Z1-mote> (Erişim tarihi: 25.12.2019)
- Tiburski, R., Moratelli, C. R., Filho, S. J., & Neves, M. V. (2019). Lightweight Security Architecture Based on Embedded Virtualization and Trust Mechanisms for IoT Edge Devices. *IEEE Communications Magazine*, 57(2), 67-73.
- Xiao, W., Liu, J., Jiang, N., & Shi, H. (2014). An optimization of the object function for routing protocol of low-power and Lossy networks. *Systems and Informatics (ICSAI) 2014 2nd International Conference on. IEEE*, 515-519.
- Vasseur, J.-P., & Dunkels, A. (2010). Interconnecting Smart Objects with IP. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Vilajosana, X., Tuset, P., Watteyne, T., & Pister, K. (2015). OpenMote: Open-Source Prototyping Platform for the Industrial IoT. *ADHOCNETS*, 155.
- Vilajosana, X., Watteyne, T., Chang, T., Vučinić, M., Duquennoy, S., & Thubert, P. (2020). IETF 6TiSCH: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 595-615.



VERİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİ İLE TARIMSAL VERİ ANALİZİ: BİR AKILLI TARIM SİSTEMİ ÖNERİSİ

Burak ÖZER^{1*}, Sümeyra KUŞ², Oktay YILDIZ³

¹ Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Ankara, Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Akıllı Tarım,
Veri Madenciliği,
Veri Analizi,
Coğrafi Bilgi Sistemleri.

Öz

Gıda kıtlığı ve nüfus artışı, dünya çapında sürdürülebilir kalkınmanın karşı karşıya olduğu en büyük zorluklardır. Bununla beraber iklim değişikliğinin etkisi diğer birçok alanda olduğu gibi tarım alanında da belirsizliklere neden olacaktır. Yapay zekâ (AI), Nesnelerin İnterneti (IoT), Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve mobil internet gibi gelişmiş teknolojiler, dünyanın karşı karşıya olduğu zorluklara gerçekçi çözümler sağlayabilmektedir. Günümüzde sensör cihazlarının yaygınlaşması ile tarım alanlarından veri elde etmek ve ham veriden bilgi üretmek yaygınlaşmıştır. Bu çalışma, Akıllı tarımda veri analizi ile ürün tahmini üzerine yoğunlaşmıştır. Kaggle üzerinden sağlanan toprak (ph, azot, potasyum ve fosfor değeri) ve iklim verileri (sıcaklık yağış ve nem) kullanılarak veri madenciliği algoritmaları ile farklı modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller doğruluk, kesinlik, duyarlılık, f-skor ve algoritmanın çalışma zamanına göre kıyaslanmıştır. Rastgele Orman algoritmasıyla geliştirilen model, çalışma süresi yaklaşık 0,05 s ve %99,5'lik doğruluk değeri ile en optimum sonuçları vermiştir. Daha sonra, Rastgele Orman algoritması Hindistan bakanlıklarınca sağlanan toprak verileri ve meteoroloji verilerine uygulanmış ve Hindistan'ın tarımsal ürün haritası oluşturulmuştur.

AGRICULTURAL DATA ANALYSIS WITH DATA MINING METHODS: A SMART FARMING SYSTEM PROPOSAL

Keywords

Smart Farming,
Data Mining,
Data Analysis,
Geographic Information
Systems.

Abstract

Food scarcity and population growth are among the biggest challenges facing sustainable development worldwide. However, the impact of climate change will cause uncertainties in agriculture, as in many other areas. Advanced technologies such as artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), Geographic Information Systems (GIS) and mobile internet can provide realistic solutions to the challenges facing the world. Today, with the widespread use of sensor device, it has become widespread to obtain and examine data from agricultural areas. This study focuses on product forecasting with data analysis in smart agriculture systems. Machine learning models are created using soil data (ph value, nitrogen value, potassium value and phosphorus value) and climate data (temperature, rainfall and humidity) provided via Kaggle. The created models are compared according to accuracy, precision, recall, f-score and the running time of the algorithm. The model developed with the Random Forest algorithm gave the most optimum results with a running time of approximately 0.05 s and an accuracy of 99.5%. Then, the Random Forest algorithm was applied to the data provided by the Indian ministries and finally, the agricultural product map of India is created.

Alıntı / Cite

Ozer, B., Kus, S., Yildiz, O., (2022). Veri Madenciliği Yöntemleri ile Tarımsal Veri Analizi: Bir Akıllı Tarım Sistemi Önerisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1417-1429.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
B. Özer, 0000-0003-2615-9389	Başvuru Tarihi / Submission Date	04.03.2022
S. Kuş, 0000-0002-5288-769X	Kabul Tarihi / Accepted Date	27.04.2022
O. Yıldız, 0000-0001-9155-7426	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Tüm dünyada tarım sektörü milli gelirin önemli bir payını oluşturmaktadır. Bu nedenle, tarım sektörünü iyileştirmek için yeni teknolojilerin uygulanması, ulusal ekonomiyi desteklemek için önemli bir konudur. Tarımsal üretim, endüstriyel süreç için ihtiyaç duyulan hammaddelere ek olarak, insanlar ve hayvanlar için gıda üretimini içerir. Antik çağlardan bu yana, pek çok tarımsal kalkınma devrimi vardır; İlk tarım devrimi, eski insanların ilgisini tarım yöntemlerinin geliştirilmesinde yansıtan Mısır ve Yunan eski uygarlıkları tarafından yapılmıştır. İkinci tarım devrimi, Avrupa kıtasında feodalizmin sona ermesini takip eden 17. yüzyılda ortaya çıkmıştır. Üçüncü tarım devrimi (Yeşil Devrim) geçen yüzyılın 1930-1960 döneminde görülmüş; burada tarımsal üretimi artırmak için mineral gübrelerin kullanımının yaygınlaşması ve çeşitli tarım makinelerinin geliştirilmesine paralel olarak pestisit kullanımının artması (Bochtis) olmuştur. Dördüncü tarım devrimi, bilgi iletişim teknolojisi (BİT) ve yapay zekada önemli bir gelişme olan son yirmi yılda meydana gelmiştir. Bu teknolojiler, robotların hasat ve ot ayıklama gibi tarımsal işlemlerde kullanıldığı ekipman ve cihazların uzaktan kontrol edilmesini kolaylaştırmış ve ayrıca mahsulleri gübrelemek ve mahsulün büyüme aşamalarını izlemek için dronlar da kullanılmıştır (Mohamed vd., 2021).

Akıllı tarım, iklim faktörleri, toprak özellikleri, toprak nemi vb. değişikliklerin izlenmesine izin verdiği için yetiştirilecek ürün tahmini ve daha sonra eşzamanlı sağlanan veri ile diğer analizler gibi ilgili birçok konuyu ele almaktadır. Günümüzde IoT (Internet of Things), hemen hemen her alanda yaygınlaşmaya başlamıştır. Akıllı tarımda IoT sadece büyük çiftçilik uygulamalarında değil, aynı zamanda hayvancılığın bakımı, sera çiftçiliği, çiftliklerin yönetimi vb. alanlarda da kullanılabilir. IoT için kullanılan en önemli araç sensörlerdir. Sensörler, istenen analizi elde etmek için yorumlanan temel verileri toplayan cihazlardır. Tarım için, sensörler esas olarak azot, potasyum ve fosfor değerlerini ölçmek, hastalıkları ve topraktaki nem içeriğini tespit etmek için kullanılan okumaları almak için kullanılmaktadır. Akıllı tarım sistemlerinde IoT cihazları, yenilikçi uygulama araçları kullanılarak gerçek zamanlı olarak toplanan ve analiz edilen büyük miktarda değerli tarımsal veri üretir (Ratnaparkhi vd., 2020; Roukha vd., 2020).

Yaşanan teknolojik gelişmelere rağmen iklim değişikliği, tarımda yaşanan en büyük zorluklardan birisidir. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri, artan sıcaklıklar, hava değişkenliği, değişen tarımsal ekosistem sınırları, istilacı mahsuller ve zararlılar ve daha sık görülen aşırı hava olayları şeklinde şimdiden hissedilmektedir. Çiftliklerde iklim değişikliği mahsul verimini, başlıca tarım besin kalitesini düşürmektedir. Mevcut verimi korumak ve talebi karşılamak için üretim ve gıda kalitesi artışlarını sağlamak için adaptasyona önemli yatırımlar gerekecektir (CLIMATE-SMART AGRICULTURE, 2021). İklim değişikliği ile belirli bir bölgede yetişen tarım ürünleri de adaptasyon sürecine girmektedir. Belirli tarım ürünleri değişen iklim koşullarıyla beraber artık o bölgede yetişemeyecek duruma gelmektedir. Tarımla uğraşan insanların buna karşı tedbir almaları kaçınılmazdır. Mevcutta çoğu arazide yanlış ürün tercihleri yapılmaktadır. Bazı bölgelerde yıl içinde iklim değerlerine göre iki kez hasat yapılacaktır yanlış tarım ürünleri yetiştirme tercihinden dolayı bir kez hasat yapılabilir. Ayrıca çoğu bölgelerde yetişen tarım ürünleri o bölgenin iklimine duyarlı olduğu için tarım ürününden yeterince verim alınmamaktadır.

Bu makalede ürün yetiştiricileri için bölgesel toprak özelliklerinin yanı sıra iklim şartlarını da dikkate alarak ürün önerisinde bulunan akıllı tarım sistemi geliştirilmiştir. Tarımı etkileyen parametreler arasındaki gizli kalıpları çıkarmada veri madenciliğinden faydalanılmıştır. Oluşturulan ürün haritası, bir bölgede yetişecek doğru tarım ürünlerini göstermektedir. Diğer bir deyişle, o bölgedeki sıcaklık, nem, yağış ve toprak özelliklerine göre yetiştirilecek en uygun tarım ürünü belirlenmektedir. Oluşturulan ürün haritası, tarımla uğraşan insanlara yaşadıkları bölgenin özelliklerine göre yetişebilecek en doğru tarım ürünlerini belirlemede bir rehber niteliğinde olacaktır. Ayrıca tarım bir ekonomik değerdir ve oluşturulan tarımsal ürün haritası sayesinde, ekonomisinin büyük bölümü tarım üzerine olan ülkelerde doğru tarım ürünlerinin tercihi ile elde edilen tarımsal üretim artmaktadır. Dolayısıyla tarım ülkelerinin ekonomilerine büyük katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. Literatür taraması (Literature review)

Makalenin bu bölümünde literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiştir.

Tarımsal bitkilerin optimum şekilde sulanmasını sağlayacak bir sistem, akıllı telefon ve web uygulaması kullanılarak mahsul alanında kullanılan sensörlerden alınan verinin analizini yapacak şekilde geliştirilmiştir.

Birliktelik kuralları (Association rules), bu çalışmada uygulanan veri madenciliği tekniğidir. Sıcaklık, nem ve toprak nemi ile limon verimleri ve evde yetiştirilen sebze arasındaki ilişkileri bulmak için kullanılmışlardır. Apriori algoritması bu çalışmada kullanılan birliktelik kuralları modelidir. Ayrıca, birkaç girdi değişkeni ile bir çıktı değişkeni arasındaki ilişkiyi modellemek için doğrusal regresyon modeli uygulanmıştır. Sonuçlar tarıma açık faydalar göstermiştir. Topraktaki nem içeriği sebzeler için uygun şekilde kontrol edilmiş, böylece maliyetler düşürülmüş ve tarımsal verimlilik artmıştır (Muangprathuba vd., 2018).

İklim değişikliklerine göre hasat zamanını planlamak, geçmiş çiftlik verilerine dayalı mahsul hastalıklarını önleyici olarak azaltmak ve yıllık mahsul üretimini tahmin etmek gibi görevlerde çiftçilere yardımcı olmak için örnek bir Kolombiya çiftliğinde uygulanan IoT-Agro sistemi geliştirilmiştir. Bu çalışma diğer çalışmaların eksikliklerini görerek üç katmanlı bir mimariye (Tarımsal Algı, Sınır Bilişim (Edge Computing) ve Veri Analitiği) dayalı bir Akıllı Tarım Sistemi önermiştir. Veri Analitiği Katmanında, Karar Ağaçları, Yapay Sinir Ağları, XGBoost, Destek Vektör Makinesi ve Rastgele Orman gibi kahve üretimini tahmin etmek için farklı algoritmalar değerlendirildi. XGBoost algoritması en düşük Ortalama Mutlak Hatayı (0.032) elde etmiştir (Rodríguez vd., 2021).

Mahsul hasadı tahmininden eksik veya yanlış sensör verilerinin yeniden yapılandırılmasına, çeşitli makine öğrenimi tekniklerinden yararlanma ve karşılaştırmaya kadar çeşitli pratik görevlerin tasarımı ve konuşlandırılması mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmaya göre, İstat veri setindeki elma ve armut toplam mahsullerinin tahminine %90'a yakın bir başarı oranlarına sahip bir sinir ağı modeli ile ulaşılabileceği gösterilmiş, CNR bilimsel verileri için polinomsal regresyon ve karar ağaçlarının eksik verilerin tahmininde kullanışlı olduğu belirlenmiştir (Balducci vd., 2018).

Mahsul ekimleri arasındaki herhangi bir zamanda, bitki hastalıkları yaprağı etkileyebilir ve bu da mahsul üretiminde büyük zararlara ve ekonomik kayıplara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, Veri Madenciliği algoritmaları (Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman ve Olasılıksal Dereceli Azalma) ve Derin Öğrenme (Inception-v3, VGG-16, VGG) algoritmalarının turuncgiller bitkisi hastalık tespiti açısından performansları karşılaştırılmıştır. Hastalık sınıflandırma doğruluğu (CA), hastalık tespiti durumunda Derin Öğrenme yöntemlerinin Makine Öğrenmesi yöntemlerinden daha iyi performans göstermiştir. VGG-16, CA açısından en iyi değerleri göstermiştir (Sujatha vd., 2021). Zararlı böcekler, tüm dünyada tarımsal ürün verimini ve kalitesini etkileyen başlıca nedenlerden biridir. Yapılan çalışmanın amacı araştırmacılara ve teknisyenlere, Çeşitli akıllı haşere izleme (SPM) modellerinin uygulanmasını teşvik edebilecek Derin Öğrenme tekniklerini ve akıllı haşere izlemede kullanılan son teknolojileri özetlemektir. Bu çalışmaya göre böcek zararlılarının sınıflandırma yöntemleri üç açıdan özetlenebilir: Klasik CNN ağlarını geliştirmek, transfer öğrenme ve birkaç adımlı öğrenme (Li vd., 2021).

IoT ve akıllı görüntü tanıma dayalı bir hasat sisteminde sinir ağı modelleri eğitilerek nesne tespiti yoluyla mahsul olgunluğu belirlenebilir ve daha sonra olgun mahsuller robotik kollar kullanılarak hasat edilebilmektedir. Ampirik kanıtlar, önerilen MobileNet-SSD model eğitiminin diğer modellerden daha yüksek olan %84'lük bir ortalama kesinliğe (mAP) sahip olduğunu göstermiştir. Araştırma yöntemi olarak MobileNet-SSD modeli seçilmiştir (Horng vd., 2019). Bina çatıları, açık bahçeler ve kapalı tarım gibi kentsel alanlarda çiftçilik yapılabilir hale gelmiştir. Bu çalışmada, kentsel tarım bağlamında nem, sıcaklık ve toprak nemini gerekli tarım parametreleri olarak kabul eden IoT tabanlı bir Smart AgroTech sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem, tarım arazisinin durumuna bağlı olarak sulama eyleminin başlayıp başlamayacağına karar verir ve çiftlik sahibine izleme olanağı ve uzaktan kontrol sağlar. Önerilen denklem, nem ve toprak nemi için ortalama hata oranını %3'ün altında ve sıcaklık için %1,5'in altında değer bulmuştur (Podder vd., 2021).

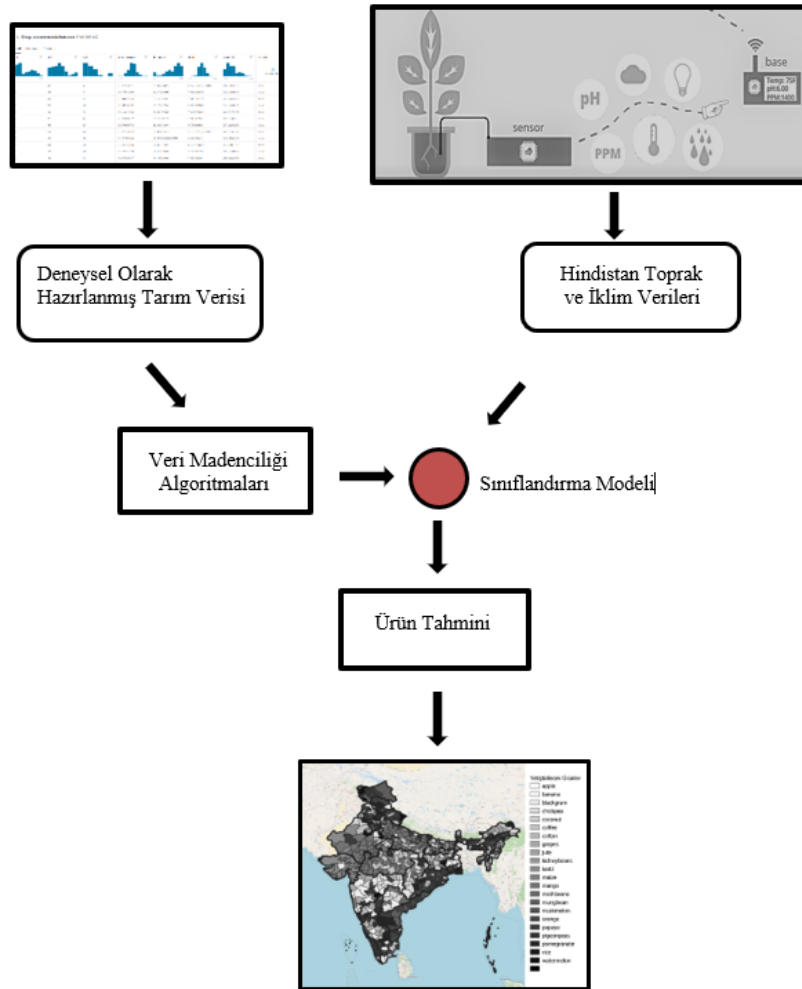
Guguk Kuşu Arama Algoritması ile suyun her koşulda çiftçilik için tahsis edilmesi sağlanmaktadır. Sıcaklık, bulanıklık, pH, nem gibi çeşitli veriler, ilgili sensörler ve kablosuz iletişim sistemleri ile donatılmış Nesnelerin İnterneti (IoT) platformu kullanılarak toplanmıştır (Pathak vd., 2019). Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) yaklaşımı, IoT tarımında şeker verimi üretim miktarını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen MLP algoritmasının şeker kamışı verimini tespit etmek için maksimum %99 doğruluğa, %95 hassasiyete, %96 duyarlılık ve %0.04 Minimum Ortalama Mutlak Hataya (MAE) ve %0.006 Ortalama Karekök Hatasına (RMSE) sahip olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2021).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde akıllı tarım sistemlerinde veri analizinin genellikle iki ana bölümde yapıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar (Muangprathuba vd., 2018; Rodríguez vd., 2021; Balducci vd., 2018; Podder vd., 2021; Pathak vd., 2019; Wang vd., 2021) sensor, gps vs. cihazlardan elde edilen yapısal özellikteki toprak ve iklim verilerinin veri madenciliği algoritmaları kullanılarak analiz edilmesinden oluşmaktadır. Sensor verileri toprağın özellikleri (azot değeri, potasyum değeri vs.), iklim verilerinden oluşmaktadır. Diğer çalışmalarda (Sujatha vd., 2021; Li vd., 2021; Horng vd., 2019) derin öğrenme ile görüntü sınıflandırma ve görüntü algılama ile tarım alanlarından ve tarım ürünlerinden elde edilen yapısal olmayan görüntü verilerinin analiz edilmesinden oluşmaktadır.

Bu makalede yapısal özellikli veriler kullanılmıştır. Kullanılan veri, iklim (sıcaklık, yağış, nem) ve toprağın azot, fosfor, potasyum ve ph değerlerinden oluşmaktadır. Daha sonra, veri madenciliği algoritmalarından olan K-en yakın komşu, Rastgele Orman ve XGBOOST algoritmaları kullanılarak model oluşturulmuştur. Hindistan bölgesinden elde edilen iklim ve toprak verileri sayısallaştırılmış ve en yüksek başarıyı veren model ile ürün haritası oluşturulmuştur.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Makalenin bu bölümünde, önerilen sistemin metodolojisi ve çalışmada kullanılan veri kümesine ilişkin bilgilere yer verilmiştir. Makalede önerilen sistemin genel yapısı Şekil 1’de özetlenmiştir. Buna göre önerilen Akıllı Tarım sisteminde veri analizi, deneysel olarak hazırlanmış tarım verisinin veri madenciliği algoritmaları kullanılarak bir sınıflandırma modeli oluşturulur. Daha sonra Hindistan toprak ve iklim verileri oluşturulan sınıflandırma modeline göre düzenlenir ve ürün tahmini için kullanılır. Çalışmanın son kısmında Hindistan için ürün haritası oluşturulmuştur.



Şekil 1. Sistem metodolojisi (System methodology)

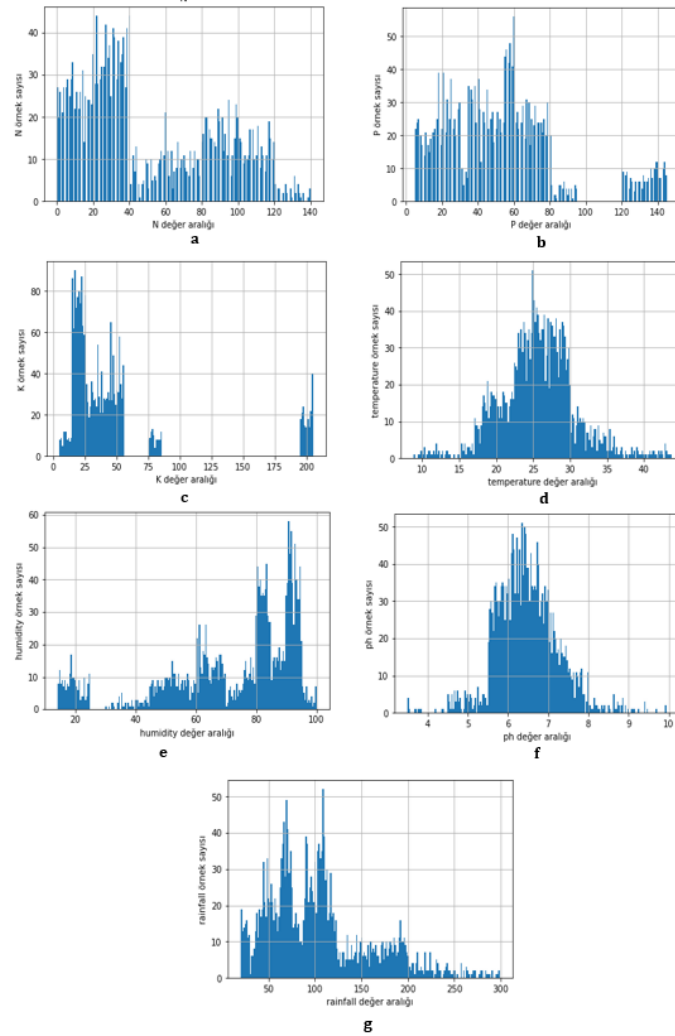
3.1 Veri kümesi

Makalede kullanılan veri kümesi iki bölümden oluşmaktadır. Model oluşturmada kullanılan veri kümesi (Ingle, 2020) Kaggle üzerinden sağlanmıştır. Bu veri kümesi, Hindistan için mevcut olan yağış, iklim ve gübre verilerinin veri kümelerini artırarak oluşturulmuştur. Veri kümesi kullanıcıların çeşitli parametrelere dayalı olarak belirli bir çiftlikte yetiştirmek için en uygun mahsulleri önermek için tahmine dayalı bir model oluşturmalarını sağlar.

	N	P	K	temperature	humidity	ph	rainfall	label
0	90	42	43	20.879744	82.002744	6.502985	202.935536	rice
1	85	58	41	21.770462	80.319644	7.038096	226.655537	rice
2	60	55	44	23.004459	82.320763	7.840207	263.964248	rice
3	74	35	40	26.491096	80.158363	6.980401	242.864034	rice
4	78	42	42	20.130175	81.604873	7.628473	262.717340	rice
...
2195	107	34	32	26.774637	66.413269	6.780064	177.774507	coffee
2196	99	15	27	27.417112	56.636362	6.086922	127.924610	coffee
2197	118	33	30	24.131797	67.225123	6.362608	173.322839	coffee
2198	117	32	34	26.272418	52.127394	6.758793	127.175293	coffee
2199	104	18	30	23.603016	60.396475	6.779833	140.937041	coffee

Şekil 2. Kaggle tarımsal veri kümesi (Kaggle agricultural dataset)

Makalede kullanılan veri kümesi Şekil 2’de gösterilmiştir Şekilde görüldüğü gibi veri kümesi 2200 örnekten ve 7’si bağımsız 1’i bağımlı olmak üzere 8 özelliğten oluşmaktadır. Bu veri kümesindeki özellikler topraktaki Azot içeriği oranı (N), topraktaki Fosfor içeriği oranı (P), topraktaki Potasyum içeriği oranı (K), santigrat derece cinsinden sıcaklık değeri (temperature), yüzde olarak bağıl nem (humidity), toprağın ph değeri (ph), mm cinsinden yağış (rainfall) ve bu 7 özelliğe bağlı olarak değişen Hindistan’da yetişen 22 farklı bitki türünü ifade eden etikettir (label).



Şekil 3. a) Azot değer aralığı, b) Fosfor değer aralığı, c) Potasyum değer aralığı, d) Sıcaklık değer aralığı, e) Nem değer aralığı, f) Ph değer aralığı, g) Yağış değer aralığı (a) Nitrogen value range, b) Phosphorus value range, c) Potassium value range, d) Temperature value range, e) Humidity value range, f) Ph value range, g) Precipitation value range)

Kullanılan veri kümesinde değişkenlerin histogram grafikleri Şekil 3'te ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu grafiklerden daha sonra modelde kullanılacak veri kümesinin değer aralıklarını belirlemede yararlanılmıştır. Hindistan bakanlıklarından sağlanan toprak verileri (ph, azot, potasyum, fosfor) ve iklim verileri (sıcaklık, nem, yağış) bu doğrultuda oluşturulmuştur. Bu veriler QGIS ortamında sayısallaştırılarak oluşturulan modele göre parametre değerleri ayarlanmıştır.

Etiket değişkeni Hindistan da yetişen farklı ürün çeşitlerini içermektedir. Bunlar, pirinç, mısır, nohut, barbunya, güvercin bezelyesi, güve fasulyesi, maş fasulyesi, siyah mercimek, yeşil mercimek, nar, muz, mango, üzüm, karpuz, kavun, elma, portakal, papaya, hindistan cevizi, pamuk, hint keneviri ve kahvedir.

3.2 Veri madenciliği yöntemleri

Deneysel çalışma kapsamında, veri madenciliğinde sıklıkla kullanılan sınıflandırma algoritmalarından K-En Yakın Komşu, Rastgele Orman ve XGBoost algoritmaları kullanılmıştır.

3.2.1 K-en yakın komşu (KNN)

Komşu tabanlı bir sınıflandırma olan KNN, örnek tabanlı öğrenmenin veya genelleştirmeyen öğrenmenin bir türüdür. KNN, genel bir dahili model oluşturmaya çalışmaz, yalnızca eğitim verilerinin örneklerini depolar. Sınıflandırma, her noktanın en yakın komşularının basit çoğunluk oyu ile hesaplanır: bir sorgu noktasına, noktanın en yakın komşuları içinde en fazla temsilciye sahip olan veri sınıfı atanır (Nearest Neighbors, 2022).

```

Sınıflandır (X, Y, x) // X: eğitim verisi, Y: X sınıf etiketleri, x: bilinmeyen örnek
for i = 1 to m do
    Hesapla mesafe  $d(X_i, x)$ 
end for
k en küçük uzaklık  $d(X_i, x)$  için indisleri içeren I hesap kümesi.
return  $\{Y_i \text{ i elemanı } I\}$  için çoğunluk etiketi

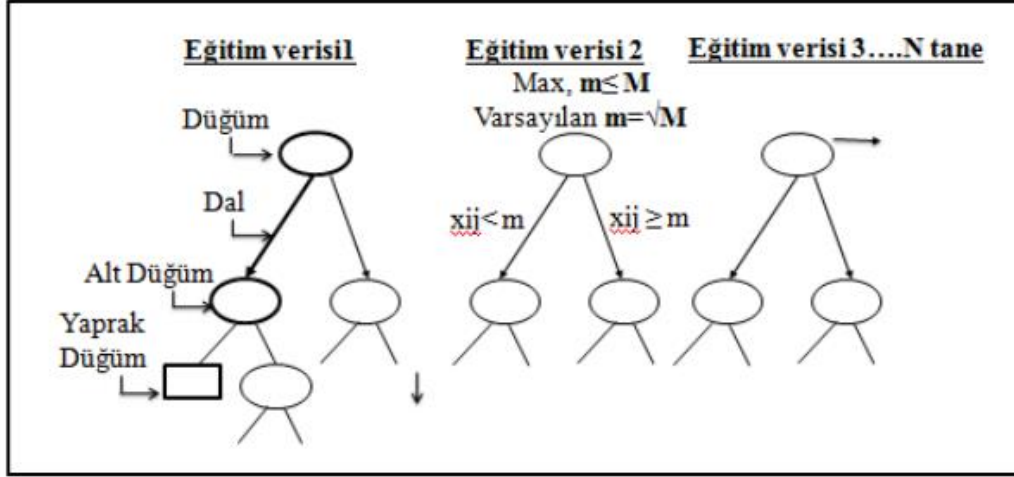
```

Şekil 4. KNN sınıflandırması için sözde kod (Pseudocode for KNN classification) (Tay vd., 2014)

Şekil 4'te KNN algoritmasının genel işleyişi özetlenmektedir. KNN algoritmasının performansı için kritik öneme sahip noktalardan birisi örnekler arası yakınlığın nasıl ölçümleneceğidir. Yakınlık, Öklid uzaklığı ya da bir başka uzaklık ölçütü kullanılarak hesaplanabilir. Algoritma 1'den de görülebildiği gibi, KNN algoritması basit bir yapıya sahiptir ve az sayıda parametre gerektirmektedir. Parametre seçiminde farklı teknikler kullanılmaktadır. Grid Search bu çalışmada parametre seçiminde kullanılmıştır.

3.2.2 Rastgele orman

Rastgele Orman algoritması, veri kümesinin çeşitli alt örneklerinde bir dizi karar ağacı sınıflandırıcısına uyan bir meta tahmin edicidir ve tahmin doğruluğunu iyileştirmek ve aşırı öğrenmeyi kontrol etmek için karar ağaçlarının ortalamasını kullanır. Burada ağaçlar rastgele seçilmektedir. Bu rastgelelik kaynağının amacı, Rastgele Orman tahmincisinin varyansını azaltmaktır. Karar ağaçları tipik olarak yüksek varyans sergiler ve fazla uyum gösterme eğilimindedir. Rastgele Orman'da rastgelelik, bir şekilde ayrılmış tahmin hatalarına sahip karar ağaçları verir. Bu tahminlerin bir ortalaması alınarak bazı hatalar ortadan kaldırabilir. Rastgele Orman, çeşitli ağaçları birleştirerek, bazen sapmada hafif bir artış pahasına, azaltılmış bir varyans elde eder. Uygulamada, varyans azalması genellikle önemlidir, dolayısıyla genel olarak daha iyi bir model vermektedir (Ensemble methods, 2022)



Şekil 5. Rastgele Orman yöntemine ait ağaç yapısı (Tree structure of the Random Forest method) (Ok vd., 2011)

Şekil 5'te x_{ij} , girdi verilerini temsil etmektedir. M toplam değişken sayısını, m ise rastgele seçilir. m değerinin M (toplam değişken sayısı) değişkeninin kareköküne eşit olarak alınması genellikle optimum sonuçlar vermektedir.

Rastgele Orman algoritmasında ana parametreler N ($n_estimators$) ve M ($max_features$)'dir. N ($n_estimators$) ormandaki ağaç sayısıdır. Ne kadar büyük olursa o kadar iyidir, ancak hesaplamak o kadar uzun sürmektedir. M ($max_features$), bir düğümü bölerken dikkate alınması gereken rastgele özellik alt kümelerinin boyutudur. Ne kadar düşük olursa, varyansın azalması o kadar büyük olur, fakat aynı zamanda yanlılıktaki artış da o kadar büyük olmaktadır.

3.2.3 XGBOOST algoritması

XGBoost, yüksek verimli, esnek ve taşınabilir olacak şekilde tasarlanmış optimize edilmiş bir dağıtılmış gradyan artırma tekniğidir. XGBoost hem sistem (donanım ve yazılım) optimizasyonu hem de algoritmik geliştirmeler ile günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

XGBoost Sistem Optimizasyonları:

- Paralel Çalıştırma: XGBoost, karar ağaçlarını oluştururken paralelizasyon yaparak çok daha hızlı oluşturulmasını sağlar. Bunu yapabilmesinin altında temel-öğrenenleri (base-learners) oluştururken, iç ve dış döngüler arasında geçiş yapabiliyor olması vardır. Normalde dış döngüler, karar-ağacının yapraklarını oluştururken iç döngüler de öznitelikler hesaplanır. Ancak, iç döngüler bitmeden dış döngüler tamamlanamayacağı için yani öznitelikler hesaplanmadan ağacın yaprakları oluşmayacağı için paralelizasyon sınırlanır. XGBoost, iç ve dış döngülere ayrılan hesaplama gücünü değiştirerek çalışma zamanını hızlandırır.
- Ağaç-Budama: XGBoost, en başından maksimum derinlik(max_depth) parametresi ile ağacın derinliğini belirleyerek, eğer ağaç aşağı yönde fazla ilerledi ise geriye doğru budama yapar. XGBoost derinliğe öncelik verdiği için karmaşıklığı, dolayısıyla hesaplama performansını önemli ölçüde artırır.
- Donanım Optimizasyonu: XGBoost, en başta geliştirilirken donanım kaynaklarını daha iyi kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bunun dışında, "out-of-core" hesaplama gibi iyileştirmeler sayesinde disk alanını optimize ederek daha büyük verileri belleğe sığdırabilmektedir.

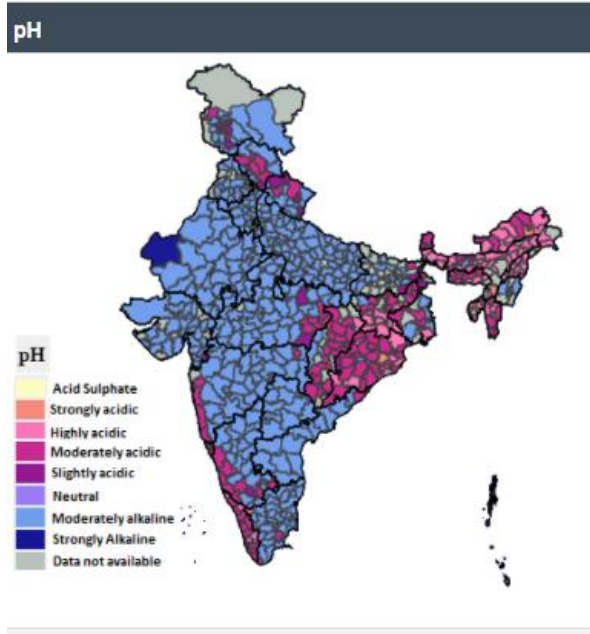
XGBoost Algoritmik İyileştirmeler:

- Regülasyon: Hem LASSO hem de Ridge regularizasyonu kullanarak aşırı öğrenme engellenir.
- Seyreklik Uyumu: Gerçek hayatta veri setleri maalesef birçok eksik değer bulundurur. XGBoost, zayıf öğrenenler ile kayıp değeri eğitim kaybına bakarak en doğru şekilde öğrenebilmektedir.
- Ağırlıklı Çeyrek Çizim: XGBoost'un en büyük avantajlarından biri ağaçlara ayırırken en doğru noktadan ayırabilmek için veri setindeki gözlem noktalarını ağırlandırarak kullanıyor olmasıdır.
- Çapraz-doğrulama: XGBoost, kendi içinde cross-validation (cv) uygulamasını yapabilmektedir. Ayrıca her çalıştırmada kaç iterasyon yapılacağına belirtilmesine gerek yoktur (XGBoost Documentation, 2022).

4. Deneysel çalışma (Experimental study)

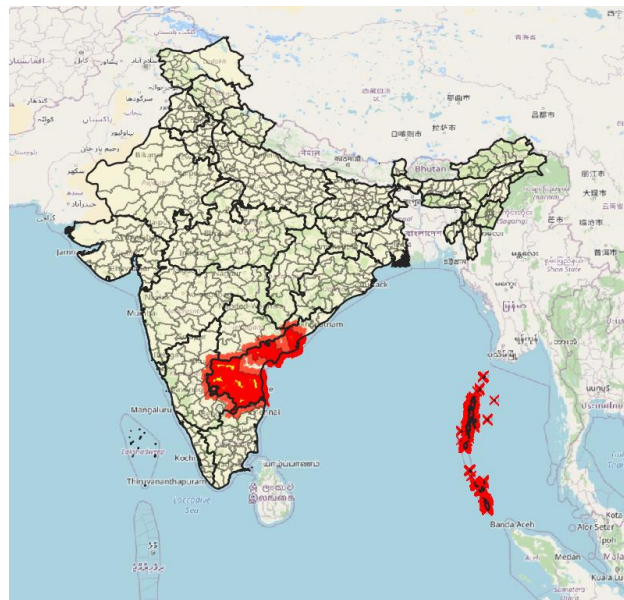
Bu çalışmada veri madenciliği yöntemi olan sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Sınıflandırma, verilerdeki kalıpları belirlemek için algoritmaları kullanır. Tahmin yapabilen bir veri modeli oluşturmak için de bu kalıplar kullanılır (What is machine learning?, 2021).

Bu çalışmada kullanılan sınıflandırma algoritmaları KNN, Rastgele Orman, XGBOOST sınıflandırma algoritmalarıdır. Çalışma Jupyter Notebook ortamında modellenmiştir. TensorFlow, Keras, Scikit-learn, pandas, numpy, matplotlib kütüphanelerinden faydalanılmıştır. Sınıflandırma algoritmaları, çalışma sürelerine ve doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skor metriklerine göre iki farklı şekilde değerlendirilmiştir.



Şekil 6. Hindistan haritası ph değerleri (India map ph values)

Çalışmanın ikinci bölümünde Hindistan bakanlıklarınca yayınlanan toprak verileri (Soil Maps- Cycle I, tarih yok) ve iklim verileri (Annual Rainfall Map of India, 2021), (India - Current Temperature [°C], 2021), (Average Humidity for India in January, tarih yok), (South Asia Network on Dams, Rivers and People, tarih yok) Qgis ortamında sayısallaştırılmıştır. Şekil 4, Hindistan topraklarının ph değerlerini göstermektedir. Buna göre lejant aralığından ph değerleri Qgis ortamında sayısallaştırılmıştır.



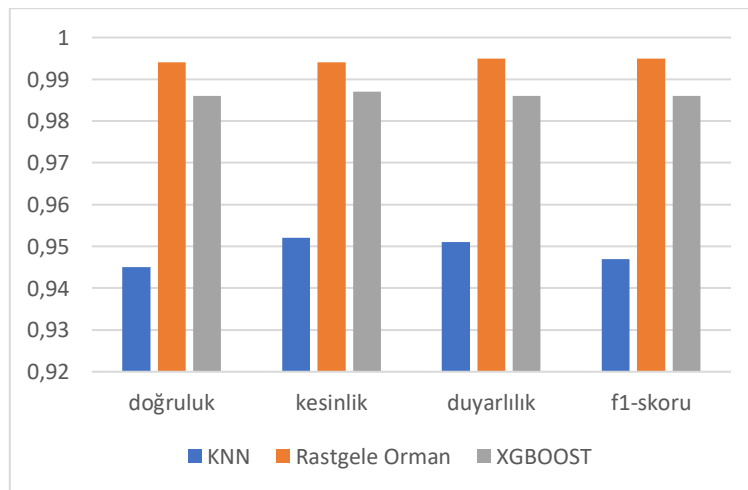
Şekil 7. Qgis ortamında oluşturulmuş Hindistan haritası (India map created in Qgis environment)

	NAME_1	NAME_2	ph	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	first_temp	sec_temp	first_rain	sec_rain	first_hum	s
1	Andaman and ...	Andaman Islands	5,200	45	27	29	29	25	301	1503	75	
2	Andaman and ...	Nicobar Islands	4,500	46	26	22	28	24	301	1503	75	
3	Andhra Pradesh	Anantapur	4,700	13	25	35	26	27	59	492	74	
4	Andhra Pradesh	Chittoor	5,300	34	24	5	32	25	59	492	70	
5	Andhra Pradesh	Cuddapah	5,400	38	25	30	27	28	59	492	70	
6	Andhra Pradesh	East Godavari	5,300	35	25	20	31	24	59	492	70	
7	Andhra Pradesh	Guntur	6,300	32	24	20	31	26	59	492	70	
8	Andhra Pradesh	Krishna	5,400	32	91	23	33	28	59	492	70	
9	Andhra Pradesh	Kurmoor	6,400	26	49	35	30	25	59	492	70	
10	Andhra Pradesh	Nellore	6,300	21	63	20	31	26	59	492	70	

Şekil 8. Qgis ortamında sayısallaştırılmış ve tablolaştırılmış veri kümesi (Digitized and tabulated dataset in Qgis environment)

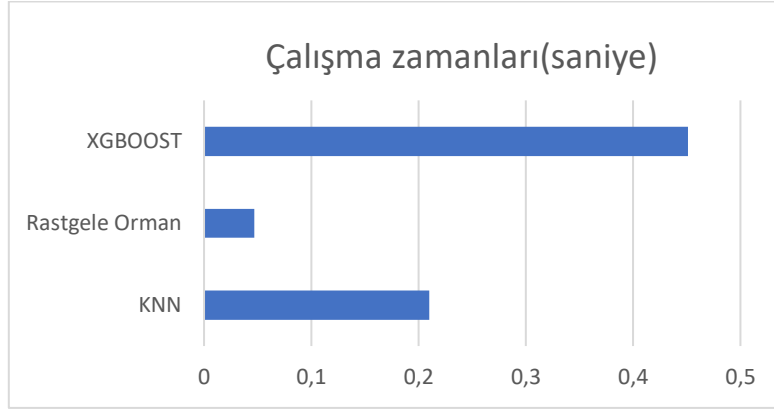
Şekil 7’de Hindistan haritası ve örnek olarak seçilen 10 nokta gösterilmiştir. Şekil 8’de ise bu haritanın tablolaştırılmış hali gösterilmektedir. Şekil 8 ‘de NAME_1 Hindistan’da bulunan eyaletleri NAME_2 Hindistan’da bulunan şehirleri ve diğer değişkenler Hindistan bakanlıklarınca sağlanan haritalardan yola çıkılarak oluşturulmuştur. İklim verileri (temp, rain, hum) yine aynı şekilde bazı haritalardan ve meteoroloji verilerinden elde edilerek oluşturulmuştur. Burada “first” ayın ilk altı ayının ortalama iklim verilerini belirtirken “sec” terimi ikinci altı ayı belirtmektedir. Örneğin “first_temp” Hindistan’ da 2019 yılının ilk altı ayının sıcaklık ortalamasının gösterirken “sec_temp” ise ikinci altı ayın sıcaklık ortalamalarını göstermektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada sınıflandırma algoritmasında en uygun parametre değerlerinin seçimi için Izgara Araması (Grid Search) kullanılmıştır. Izgara aramasında KNN için n_neighbors (komşu sayısı) 2-15 aralığındaki tam sayılar denenmiş, Rastgele Orman için n_estimators (ağaç sayısı), 5 ile 50 arasında 5’er artacak şekilde ve max_depth (maksimum derinlik), 10 ile 50 arasında 10’ar artacak şekilde değerler ve XGBOOST için n_estimators (ağaç sayısı), 5 ile 50 arasında 5’er artacak şekilde, max_depth (maksimum derinlik), 10 ile 50 arasında 10’ar artacak şekilde ve learning_rate (öğrenme oranı), 0.01, 0.1, 1 değerlerinin farklı bütün kombinasyonları denenmiş ve en yüksek doğruluk değerini veren kombinasyon her algoritma için seçilmiştir. KNN için n_neighbors= 3, Rastgele Orman için n_estimators=20, max_depth= 45 ve XGBOOST için max_depth = 10, n_estimators = 20, learning_rate = 0.1 parametre değerleri en yüksek doğruluk oranlarını vermiştir.



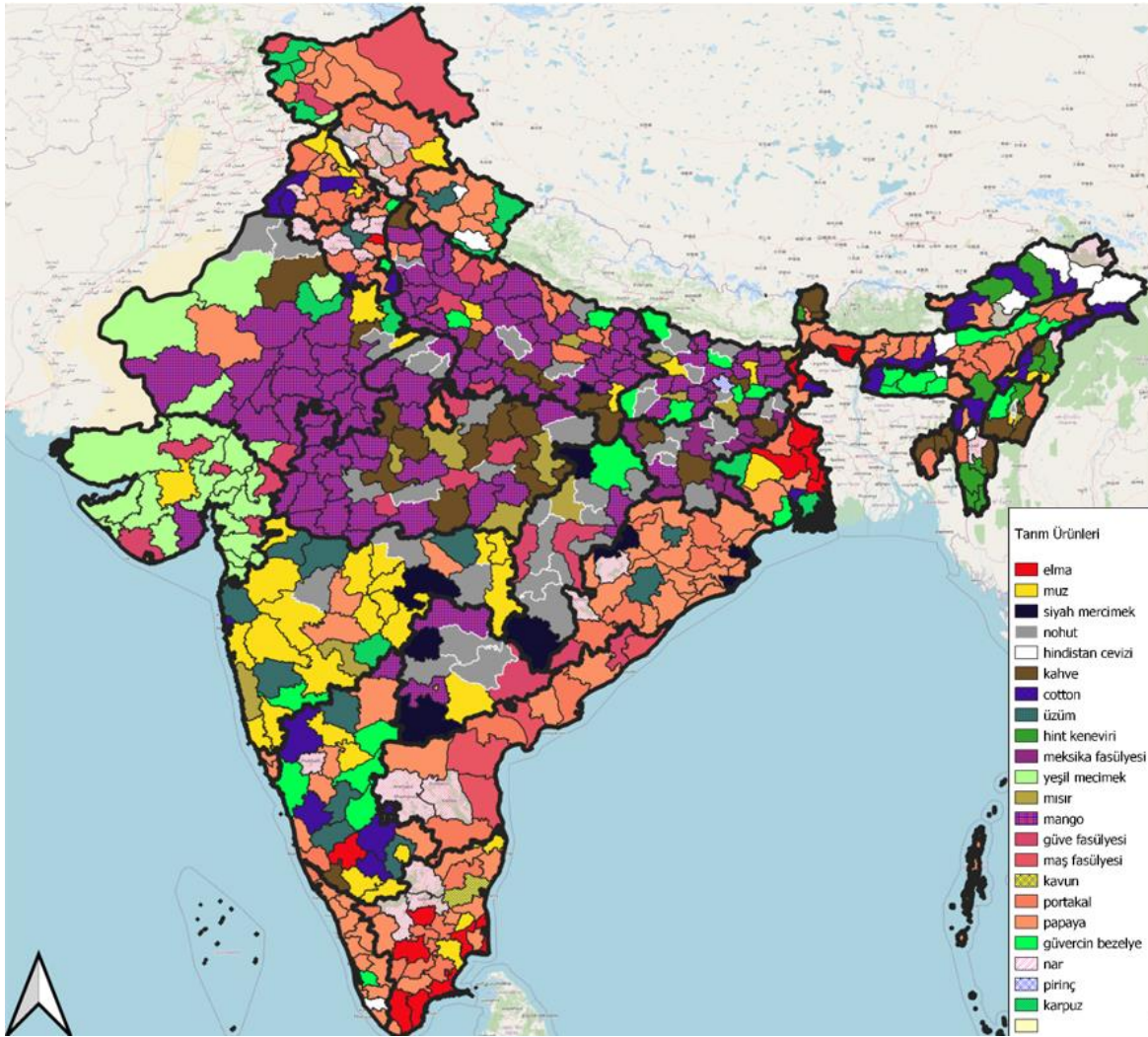
Şekil 9. Sınıflandırma algoritmalarının doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f1- skoru değerlerine göre karşılaştırılması (Comparison of classification algorithms according to accuracy, precision, sensitivity and f1-score values)

Şekil 9’da sınıflandırma algoritmaları doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f1- skoru değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi Rastgele Orman algoritması diğer algoritmalara göre daha iyi değerler vermiştir.

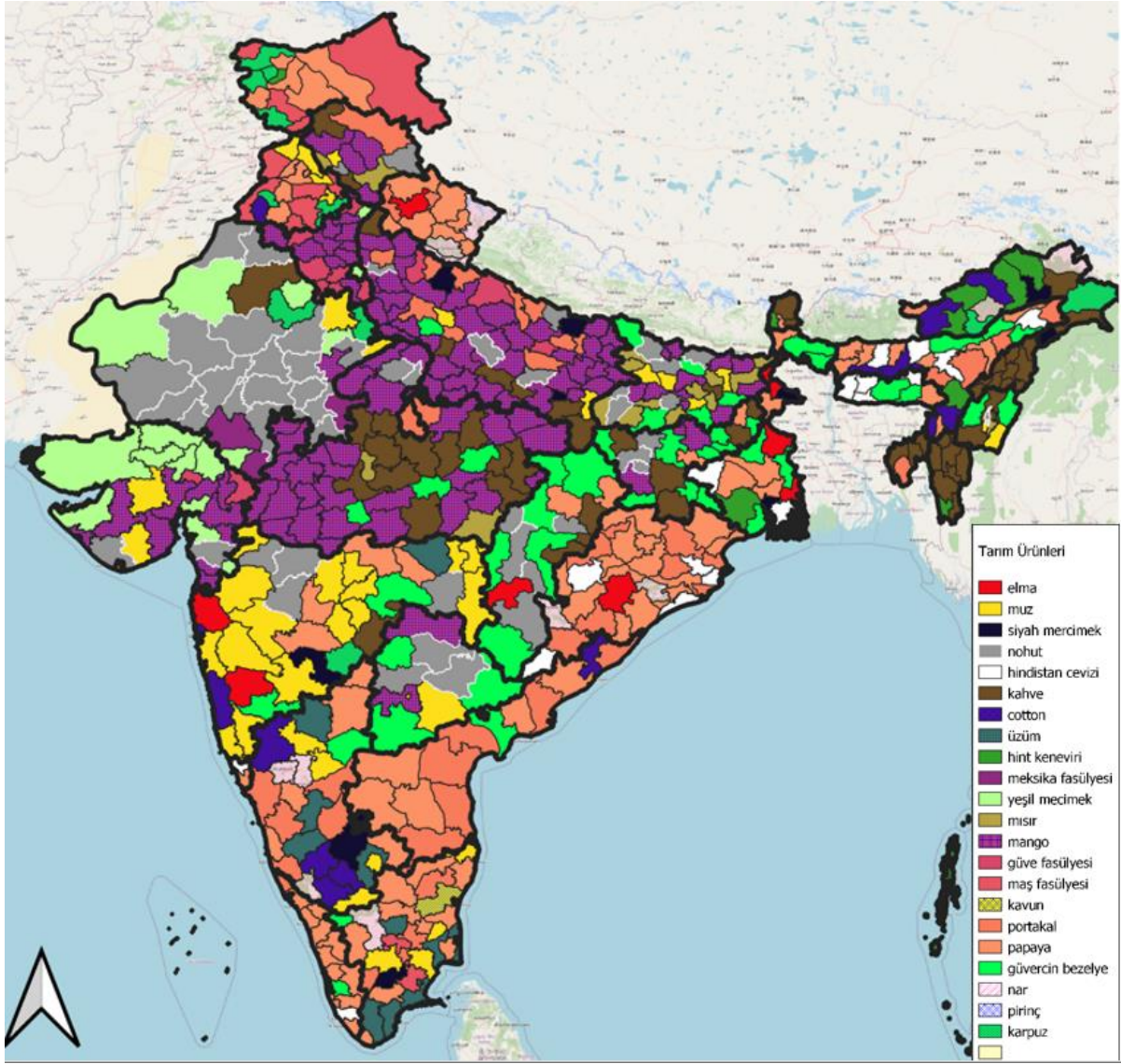


Şekil 10. Sınıflandırma algoritmalarının çalışma zamanlarına göre karşılaştırılması (Comparison of classification algorithms by runtime)

Şekil 10'da sınıflandırma algoritmaları çalışma zamanlarına göre karşılaştırılmıştır. Şekil 10'a göre Rastgele Orman çalışma zamanı diğer algoritmalara göre daha kısadır. Şekil 9 ve Şekil 10'daki karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlara göre Rastgele Orman algoritması diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Buna göre Rastgele Orman algoritması bu çalışmada kurulacak model için kullanılmıştır.



Şekil 11. Hindistan bölgesinde ilk 6 ay için yetiştirilebilecek ürün harita (Map of crops that can be grown in India for the first 6 months)



Şekil 12. Hindistan bölgesinde ikinci 6 ay için yetiştirilebilecek ürün haritası (Map of crops that can be grown in India for the second 6 months)

Rastgele Orman algoritması kullanılarak Hindistan tarımsal ürün haritası yılın ilk 6 ayı ile ikinci 6 ayı için ayrı ayrı yapılmıştır. Yılda birden fazla ürün alınacağı düşünülmüştür. Hindistan bölgesinde ilk 6 ay için yetiştirilebilecek ürün haritası Şekil 11 'de gösterilmiştir. Yine aynı şekilde Hindistan bölgesinde ikinci 6 ay için yetiştirilebilecek ürün haritası Şekil 12 'de gösterilmiştir. Şekil 11 ve 12'de gösterildiği gibi farklı tarım ürünleri farklı renklerle ifade edilmiştir. Hindistan'ın bazı bölgelerinde aynı ürün yılın ilk 6 ayı ve ikinci 6 ayı içinde yetiştirilebilecekken bazı bölgelerde yılın ilk 6 ayı ve ikinci 6 ayı içinde farklı ürünler yetiştirilebilmektedir.

5. Sonuç ve Değerlendirme (Result and Evaluation)

Literatürdeki benzer çalışmalar ile bu makalede önerilen modelin hangi akıllı tarım uygulamalarına hangi yöntemlerin uygulandığı ve uygulanan yöntemlerden en başarımı yüksek model ve başarıım değeri Tablo 1'de gösterilmiştir. Literatürde farklı akıllı tarım uygulamalarına farklı yöntemler uygulanmaktadır. Tablo 1'de de görüldüğü gibi bu makalede geliştirilen modelin doğruluk değeri diğer çalışmalara göre daha yüksektir. Ayrıca, bu makale literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak sistem başarımında modelin çalışma zamanını da değerlendirmeye almaktadır. Akıllı tarım uygulamalarında veri boyutu gittikçe artmaktadır. Bu nedenle algoritmanın çalışma zamanı bazı durumlarda algoritmanın doğruluk değerinden daha fazla dikkate alınmaktadır.

Tablo 1. İncelenen çalışmalar ve önerilen çalışmanın karşılaştırmalı değerleri (Comparative values of the studies reviewed and the proposed study)

Kaynak	Akıllı Tarım Uygulaması	Kullanılan Yöntemler	En Başarılı Yöntem	Sistem Başarısı
(Muangprathuba vd., 2018)	Akıllı Sulama Sistemi	Birliktelik Kuralları (Association rules) (Apriori algoritması), Doğrusal regresyon	Birliktelik kuralları (Apriori algoritması)	-
(Rodríguez vd., 2021)	Kahve Üretim Tahmini	Karar Ağaçları, Yapay Sinir Ağları, XGBoost, Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman	XGBoost Algoritması	Ortalama Mutlak Hata:0.032
(Sujatha vd., 2021)	Görüntü Sınıflandırma ve Görüntü Algılama ile Turunçgiller Bitkisi Hastalık Tespiti	Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman, Olasılıksal Dereceli Azalma, Derin Öğrenme (Inception-v3, VGG-16, VGG)	VGG-16	Doğruluk: %89,5
(Horng vd., 2019)	Akıllı Görüntü Tanımaya Dayalı Bir Hasat Tespiti Sistemi	Inception, ResNet, MobileNet, Faster R CNN, YOLO, SSD,	MobileNet-SSD	Ortalama Kesinlik Değerlerinin Ortalaması %84
(Wang vd., 2021)	Şeker Üretim Miktarının Tahmini	Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı, Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman, Doğrusal Regresyon, Karar Ağacı, Naive Bayes	Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı	Doğruluk: %99
Yapılan Çalışma	Tarım Ürünü Haritası	K- En Yakın Komşu, XGBoost Algoritması, Rastgele Orman	Rastgele Orman	Doğruluk: %99,5 Çalışma zamanı: yaklaşık 0,05 s

Bu çalışmada Akıllı tarım sistemlerinde incelenen makalelerde, hasat tahmini, yabancı ot tespiti, sulama, tarımsal zararlıların ilaçlanması vb. gibi birçok problem, insansız hava araçları (İHA) ve robotlar, IoT cihazları, yapay zekâ (AI), Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) derin öğrenme (DL), makine öğrenimi (ML) ve kablosuz iletişim kullanılarak gerçek zamanlı olarak ele alınmıştır. Bu çalışma Akıllı tarımda veri analizi ile ürün tahmini üzerine odaklanmıştır. Kaggle üzerinden sağlanan toprak verileri (ph değeri, azot değeri, potasyum değeri ve fosfor değeri) iklim verileri (sıcaklık yağış ve nem) kullanılarak veri madenciliği algoritmaları ile farklı modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller doğruluk, kesinlik, duyarlılık, f-skör ve algoritmanın çalışma zamanına göre kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f-skör değerlerine göre en kötü sonuçları KNN en iyi sonuçları Rastgele Orman algoritması vermiştir. Modeller çalışma zamanlarına göre kıyaslandığında XGBOOST algoritması en kötü sonucu vermiş, Rastgele Orman algoritması en iyi sonucu vermiştir. Her iki karşılaştırmada da en iyi sonucu veren Rastgele Orman ile kurulan model, Hindistan bakanlıklarınca sağlanan verilere uygulanmış ve Hindistan'ın ilk altı ay ve ikinci altı aylık tarımsal ürün haritası oluşturulmuştur. Tarımsal ürün haritasına göre belirli bölgelerde yılın ilk altı ayı ve ikinci altı ayı için yetiştirilebilecek ürünler değişmezken belirli bölgelerde yılın farklı aylarında farklı ürünler yetiştirilebilmektedir.

Günümüzde iklim konusu önemli bir konuma sahiptir. Günümüzde belli bölgeler iklim ve toprak özelliklerine göre belirli tarım ürünleri ile özdeşleşmiştir. İklim özelliklerinin hızla değiştiği bu bölgelerde yetişen ürünlerden ileride yeterince verim alınamayacaktır. Bu bölgeler artık farklı tarım ürünleri için daha uygun olacaktır. Bazı tarım ürünleri çok yıllık olup yetiştirilmesi ve ürün vermesi yıllar almaktadır. İleriye yönelik iklim özellikleri tahminlerinin gelişmesi, şimdiden bazı tedbirlerin alınmasını gerektirmektedir. Bu çalışma ile ileriye dönük tahmin edilen iklim verileri ile bölgelerin gelecek yıllar için ürün haritası oluşturulabilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Annual Rainfall Map of India (n.d.). <https://www.mapsofindia.com/maps/india/annualrainfall.htm>
Average Humidity for India in January (n.d.). <https://www.currentresults.com/Weather/India/humidity-january.php>
Balducci, F., Impedovo, D., & Pirlo, G. (2018). Machine Learning Applications on Agricultural Datasets for Smart Farm Enhancement. MDPI, machines, 6(38), 1-22.

- CLIMATE-SMART AGRICULTURE. (2021, Nisan 5). <https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture>.
- Ensemble methods (2022). <https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html#forest>
- Horng, G.-J., Liu, M.-X., & Chen, C.-C. (2019). The Smart Image Recognition Mechanism for Crop Harvesting System in Intelligent Agriculture. *IEEE Sensors Journal*, 1-16.
- Idoje, G., Dagiuklas, T., & Iqbal, M. (2021). Survey for smart farming technologies: Challenges and issues. *Computers & Electrical Engineering*, 96, 1-14.
- India Current Temperature [°C] (2021). <https://www.weatheronline.in/weather/maps/current?LANG=in&DATE=1604127600&CONT=inin&LAND=II&KEY=II&SORT=2&UD=0&INT=06&TYP=temperatur&ART=karte&RUBRIK=akt&R=310&CEL=C&SI=kph>
- Ingle, A (2020, Aralık 2020). Crop Recommendation Dataset. https://www.kaggle.com/atharvaingle/crop-recommendation-dataset?select=Crop_recommendation.csv
- Li, W., Zheng, T., Yang, Z., Li, M., Sun, C., & Yang, X. (2021). Classification and detection of insects from field images using deep learning for smart pest management: A systematic review. *Ecological Informatics*, 66(101460), 1-18.
- Mohamed, E. S., AA.Belal, Abd-Elmabod, S., El-Shirbeny, M. A., A.Gad, & Zahran, M. B. (2021). Smart farming for improving agricultural management. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 971-981.
- Muangprathuba, J., Boonnama, N., Kajornkasirata, S., Lekbangponga, N., Wanichsombata, A., & Nillaorb, P. (2018). IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 467-474.
- Nearest Neighbors (n.d.). <https://scikit-learn.org/stable/modules/neighbors.html#classification>
- Ok, A., Akar, Ö., & Gungor, O. (2011). Rastgele Orman Sınıflandırma Yöntemi Yardımıyla Tarım Alanlarındaki ürün Çeşitliliğinin Sınıflandırılması. *TUFUAB 2011 VI. Teknik Sempozyumu*, (s. 1-7). Antalya.
- Pathak, A., AmazUddin, M., Abedin, M. J., Andersson, K., Mustafa, R., & Hossain, M. S. (2019). IoT based Smart System to Support Agricultural Parameters: A Case Study. *Procedia Computer Science*, 155, 648-653.
- Podder, A. K., Bukhari, A. A., Islam, S., Mia, S., Mohammed, M. A., Kumar, N. M., . . . Abdulkareem, K. H. (2021). IoT based smart agrotech system for verification of Urban farming parameters. *Microprocessors and Microsystems*, 82(104025), 1-10.
- Ratnaparkhi, S., Khan, S., Arya, C., Khapre, S., Singh, P., Diwakar, M., & Shankar, A. (2020). Smart agriculture sensors in IOT: A review. *Materials Today: Proceedings*, 1-6.
- Rodríguez, J. P., Montoya-Munoz, A. I., Rodríguez-Pabon, C., Hoyos, J., & Corrales, J. C. (2021). IoT-Agro: A smart farming system to Colombian coffee farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 1-18.
- Roukha, A., Fotea, F. N., Mahmoudia, S. A., & Mahmoudia, S. (2020). Big Data Processing Architecture for Smart Farming. *The 11th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks*. Madeira.
- Soil Maps- Cycle I (n.d.). <https://soilhealth.dac.gov.in/NewHomePage/SoilMap>
- South Asia Network on Dams, Rivers and People. (n.d.). <https://sandrp.in/category/rainfall/page/2/>
- Sujatha, R., Chatterjee, J. M., Jhanjhi, N., & Brohi, S. N. (2021). Performance of deep learning vs machine learning in plant leaf disease detection. *Microprocessors and Microsystems*, 80, 1-11.
- Tay, B., Hyun, J. K., & Oh, S. (2014). A Machine Learning Approach for Specification of Spinal Cord Injuries Using Fractional Anisotropy Values Obtained from Diffusion Tensor Images. *Comput Math Methods Med*.
- Wang, P., Hafshejani, B. A., & Wang, D. (2021). An improved multilayer perceptron approach for detecting sugarcane yield production in IoT based smart agriculture. *Microprocessors and Microsystems*, 82(103822), 1-7.
- XGBoost Documentation. (n.d.). <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/>



APPLICATION OF REBA AND KARAKURI KAIZEN TECHNIQUES TO REDUCE ERGONOMIC RISK LEVELS IN A WORKPLACE

Aynur GÜRSOY ÖZCAN*

Toyotetsu Automotive Parts Industry and Trade Inc., Kocaeli, Türkiye

Keywords

*Ergonomics,
Ergonomic Design,
Kaizen,
Karakuri,
Rapid Entire Body
Assessment.*

Abstract

Repetitive works and the works done with inappropriate body postures cause musculoskeletal disorders and workforce losses. Design, technology, and humans must come together in ergonomic conditions. In this study, the ergonomic risk levels that employees in automotive production lines being exposed to were determined by the rapid entire body assessment (REBA) method and by considering anthropometric measurements and ergonomic body postures at a line with high risk level, and a shelf system was designed in accordance with the Karakuri working principle. Through the computer-aided design, the system operation was simulated and solutions for ergonomic risks could be provided before the production. The ergonomic risk level, which was "high" in the current situation, could be reduced with the newly designed mechanism, and an ergonomic workspace could be provided for employees. In the new situation, the ergonomic risk level is "low." In addition to ergonomic improvements, as the manual transportation works of the employee were eliminated, the cycle time of the line, which was 120 s in the first state, was reduced to 100 s after the use of the Karakuri mechanism and the efficiency of the line increases by 17%.

İŞ YERİNDE ERGONOMİK RİSK DÜZEYLERİNİ AZALTMAK İÇİN REBA VE KARAKURİ KAİZEN TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI

Anahtar Kelimeler

*Ergonomi,
Ergonomik Tasarım,
Kaizen,
Karakuri,
Hızlı Tüm Vücut
Değerlendirmesi.*

Öz

Tekrarlayan işler ve uygun olmayan vücut duruşları ile yapılan işler kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına ve iş gücü kayıplarına neden olmaktadır. Tasarım, teknoloji ve insan ergonomik koşullarda bir araya gelmelidir. Bu çalışmada, hızlı tüm vücut değerlendirme yöntemi ile otomotiv üretim hatlarında çalışanların maruz kaldıkları ergonomik risk seviyeleri belirlenmiş ve risk seviyesi yüksek olan bir hatta antropometrik ölçümler ve ergonomik vücut duruşları dikkate alınarak Karakuri çalışma prensibine göre raf sistemi tasarlanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım sayesinde üretim öncesi sistemin çalışması simüle edilmiş ve ergonomik risklere yönelik çözümler sunulabilmiştir. Mevcut durumda "yüksek" olan ergonomik risk seviyesi, yeni tasarlanan mekanizma ile azaltılabilmemiş ve çalışanlar için ergonomik bir çalışma alanı sağlanabilmiştir. Yeni durumda ergonomik risk seviyesi "düşük"tür. Ergonomik iyileştirmelere ek olarak, çalışanın manuel taşıma işleri ortadan kaldırıldığından, ilk durumda 120 saniye olan hattın çevrim süresi, Karakuri mekanizmasının kullanımından sonra 100 saniyeye düşürülmüş ve hattın verimliliği %17 artmıştır.

Alıntı / Cite

Gürsoy Özcan, A., (2022). Application of Reba and Karakuri Kaizen Techniques to Reduce Ergonomic Risk Levels in a Workplace, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(4), 1430-1444.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Gürsoy Özcan, 0000-0003-3629-0911

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	25.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.02.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.03.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: gursoya@toyotetsu.com.tr, +90-262-658-87 10

1. Introduction

Ergonomic improvements made for the working environment of the labor-intensive automotive industry are very important for both the health of the employees and the increase of production efficiency (Tanır et al., 2013). The cost resulting from musculoskeletal disorders (MSD) is high.

MSD may occur due to physical factors such as improper working position, work environment, or lifting the excessive load. If ergonomic arrangements are not made in such working environments, these ailments may increase and as a result, labor losses may occur. To be able to say that an environment or product is ergonomic, a living environment is expected to be created, or in the design of a product, it is expected to be in accordance with the characteristics and capacities of those who will benefit from it or will use it (Kaya and Özok, 2017). To create a workspace that meets ergonomic criteria, first of all it is necessary to pay attention to the anthropometric dimensions of the person who will use the equipment in the workspace (Parsons, 2000).

Ergonomics is a branch of science that studies the physical and mental characteristics and abilities of the people related to work and environmental conditions and human-machine interaction, and examines the harmony of the physical environment with the human (Kıraç, 2005).

One of the other important criteria in human-machine harmony is anthropometry. When anthropometric measurements ranging from person to person are properly determined in accordance with the size of the group to work in the work environment, the strain points of the person working on that system can also be easily estimated, thus it becomes possible to make ergonomic improvements before the design (Kaya and Özok, 2017). With a working environment where the system, equipment, and tools are arranged according to ergonomic and anthropometric data, the ergonomic workload affecting the employee can be minimized and the risks that may cause MSD can be eliminated. To increase employee productivity, the tools and mechanisms used by the individuals in the workspace must be appropriate to their sizes (Gönen and Kalınkara, 1993).

It is important to create the necessary environment and conditions for people who try to adapt to rapidly developing technological development and production conditions to work effectively and efficiently. Companies that want to increase their production power in a rapidly growing competitive environment have begun to find new methods for productivity-enhancing studies. One of the biggest increases in these studies has been mechanization and automation, but these were found to be insufficient over time. Because in the production sector, where human resources are still mainly used, productivity changes not only with the machine improvement, but also with the influence of the human factor (Akyol, 2017). The ergonomic workload can be reduced by the workspaces designed according to ergonomic and anthropometric data. A suitable workplace design for manufacturers is ergonomics studies that increase quality and efficiency (Boulila et al., 2018).

In this study, which was applied in an automotive supply industry company, firstly, ergonomic risk exposure levels of the production lines were determined according to the rapid entire body assessment (REBA) method and their primary action areas have been identified. In the production line designated as high exposure, the parts are placed in the box and then transported to the shelf system at different heights. Ergonomic improvement is aimed with Karakuri Kaizen, which is a mechanical system that can be designed and manufactured with the least cost and operational possibilities to eliminate the load carrying work and reduce the production time, and the vertical movement of the material in line with the purposes of use of the Karakuri systems is considered as the basis and a solution has been produced to the existing ergonomics problem.

2. Ergonomic Risk Assessment

Ergonomics; it is defined as an applied science branch that sets out the basic rules of human, technical, and environmental harmony, and aims to achieve productivity in terms of production by ensuring the harmony of the work environment and all the systems it contains, with all psychophysiological and sociocultural capacities and limits (Yapıcı and Baş, 2015). Anthropometry, on the other hand, is a branch of science that deals with human body measurements, shape, and working capacity (Pheasant and Haslegrave, 2005). To ensure body comfort in daily life, the equipment, tools, and equipment used should be arranged in accordance with the human dimensions of the working space and area (Kurban et al., 2016).

For an ergonomic working environment, the immediate environment that may affect people's work and also the machines used should be examined and arranged in accordance with anthropometric measures. In human-machine interaction, the arrangements made by considering the reactions of people to their environment have effects that increase the efficiency of the work (Yararel, 2019).

Repetitive, improper body postures and movements increase the possibility of MSD (Calzavara et al., 2021). This, leads to material and moral losses for employees, employers and the state (Esen and Fırlalı, 2013). MSD occur due to forcible, rapid-repetitive movements, works that prevent appropriate movements, inappropriate postures or fixed postures (Akay et al., 2003). In particular, manual lifting of heavy loads should be avoided as much as possible. If it is not possible to eliminate it, it can reduce the risk of discomfort by designing a workplace that reduces repetitive movements, ensuring easy handling of the load, or training employees (Álvarez-Casado et al., 2011). To achieve work efficiency, it is necessary to reduce forceful movements and improve inappropriate posture (David, 2005). Remedial studies are conducted to reduce risks by determining the ergonomic workloads of the work by analyzing the working postures (Yener et al., 2019).

It is largely possible to be protected from work-related MSD and its negative effects, which is one of the most important health problems of employees and decreases work efficiency. For this reason, it is of great importance to define and evaluate ergonomic risks in the working environment to prevent or prevent the effects of work-related MSD (Felekoğlu and Taşan, 2017). It is seen that a wide variety of methods are used in the literature for the analysis of working postures (Kara et al., 2014). Based on the observation, various risk assessment methods such as Revised National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH) Lifting Equation, Snook Tables, Rapid Upper Limb Assessment, The Strain Index, Occupational Repetitive Actions Index, Quick Exposure Checklist, REBA have been developed (Felekoğlu and Taşan, 2017).

First of all, an ergonomic risk assessment method suitable for the jobs defined as a result of the work done during the job analysis phase was chosen. The work under investigation is putting the finished parts into a box and placing them on the shelf. It is done manually by standing and using the whole body, lifting, carrying, and placing loads. Therefore, when choosing the method, the REBA enhanced by Hignett and McAttamney (2000), a method that takes the whole body into account and considers posture, load, repetitive movement, and compound interaction, was found appropriate. The REBA method is one of the most preferred methods because it is a practical method that can be applied according to the schemes of body parts that do not require much expertise, based on direct observation (Joshi and Deshpande, 2020).

3. Karakuri Kaizen

To provide an ergonomic workplace, safety, convenience, and efficiency should be prioritized in work and workstation design. Accordingly, one of the most effective methods used to reduce unnecessary movements and eliminate transport is the lean production philosophy (Paraponiaris and Rodríguez, 2019). Lean manufacturing is a holistic approach based on eliminating system waste and continuously increasing system efficiency. Lean production is also described in many sources with terms such as “Just-in-time production (JIT)” and “Toyota production system.” JIT production system is an increasingly important production approach that increases the efficiency of the enterprise when applied correctly (Kılıç and Ayvaz, 2016; Pavnaskar et al., 2003; Xiaobo et al., 1999).

In the production lines of the automotive sector, many improvement activities are performed, especially in the transportation field. Mechanical solutions developed especially for packaging and shelf systems are of great importance in terms of production time and personnel health. Among these developed mechanical solutions, one of the effective methods suitable for the lean production system is “Karakuri Kaizen” (Katayama et al., 2013). Kaizen is a Japanese originated word, “Kai” means change and “zen” means better. In the industrial area, it is the process of achieving small but continuous improvements covering all levels of the company, from factory employees to management levels (Paraponiaris and Rodríguez, 2019). Karakuri is the application of mechanical appliance instead of electrical, pneumatic, or hydraulic devices. Its name was first mentioned in the 17th and 19th centuries and was derived from the mechanical dolls named Karakuri Ningyo in Japan. The best known example of these dolls is dolls bearing tea (Anggrahini et al., 2020).

In Figure 1, the arm of the puppet moves downward with the weight of the bowl placed in the puppet's hand. The downward bowl movement moves the tension spring attached to the arms and by this means, it enables the movement of the wheels hidden under the mechanism. When these bowls, which are usually full of tea, are taken from the puppet, the movement of the mechanism ends. When the empty bowl is replaced on the puppet, the puppet turns and returns to the starting position. Karakuri made contribution to the industrial rejuvenation of Japan with its working principle (Rani et al., 2015).



Figure 1. Tea serving puppets (Zashiki Karakuri) (Detwiler, 2006)

Today, the machines consist of mechanisms that include simple components such as lever mechanisms, springs, gears, and shafts. Even though electronic technologies continue to develop today, simple mechanical structures remain vital for machines in terms of the subjects such as force transmission and transmission of power from one place to another. Karakuri, on the other hand, ensures that the operations to be performed are conducted more conveniently and comfortably using these simple components and imagination (Bhanu and Kumar, 2018). Karakuri technology is applied to facilitate objective transactions and enhance efficiency (Murata et al., 2013). Karakuri is preferred because it is much cheaper and easier to maintain and develop than electronic systems (Roser, 2017).

4. Literature Survey

In this section, the studies in which the REBA method was applied, and the applications performed on the working principle of Karakuri were briefly mentioned.

Looking at the literature, when the studies that implement REBA are reviewed, it seems that the method is often used for different business areas. From this point of view, the studies conducted between the years of 2015 and 2021 and in which REBA was used were briefly mentioned.

Hignett and McAtamney (2000) examined 600 working positions of people working for some sectors in their study. As a result of the review, REBA, one of the widely used ergonomic analysis methods today, was developed. The REBA method is a practical method often used in the field of ergonomics. Among the studies in which the method was applied, applications in the automotive sector were mainly examined. Atıcı et al. (2015) conducted an analysis on inappropriate working positions in a cable manufacturing company in the automotive sector using the REBA method. In the analysis, the strain that occurred on the employee was determined, and improvements were suggested that could reduce the strain. Ulutaş and Gündüz (2017) identified some problems associated with MSD in a cable manufacturing factory. The Rapid Exposure Assessment and the REBA methods were applied at two special workstations determined. Ertaş and Bulut (2017) determined the ergonomically unsuitable situations by the analysis conducted in the press department of a company that manufactures clutch, improvements were made to eliminate improperness. In a survey created using the Cornell University Musculoskeletal Discomfort Survey, Gönen et al. (2017) analyzed the assembly line employees of a transformer manufacturer with REBA and OWAS. By determining through the analysis that the most risky body parts were the back, waist, foot, neck, and shoulders, they proposed an adjustable assembly stand design to reduce the risks. Thus, by harmonizing the employee and work, employee efficiency was increased, and 5% improvement was achieved on a product basis in terms of press production (cycle) times. Sakalar (2018), in their study, ergonomically evaluated the stations on the assembly line of a company producing engine oil pumps using the REBA method, identified the workstation which creates the highest physical workload and identified the most common musculoskeletal disorder.

When the literature was examined in terms of studies conducted according to the Karakuri working principle, it was observed that the studies were generally being examined in terms of design. The studies in question are briefly mentioned below.

In their study, Anggrahini et al. (2020) reduced the cycle time of mixing and baking by ~39% with an oven automation braced by a conveyor using the Karakuri Kaizen method. Tangl and Vajna (2018), with the results of the study, showed that Karakuri Kaizen can be used as a lean production tool and the productivity improvement methods should be used in parallel and together. Murata et al. (2013) examined examples of visual administration, Poka-Yoke and Karakuri technics according to lean production philosophy and presented their effects on seven key performance indicators. These are quality, cost, delivery, productivity, safety, environment, and morale indicators. They analyzed the effects on business performance by considering the integration of these seven basic performances of the lean manufacturing system. Bhanu and Kumar (2018) made a market study on the Karakuri

with the help of interviews, inquiry and literature research within the scope of a master's thesis, and they emphasized the design, economic, and ergonomic solutions of the Karakuri, which are mainly used in the Asian market, for it to become widespread in the European market.

Rani et al. (2015) express how a small production facility in Asia turned the pneumatic material moving equipment into a cost effective Karakuri design. With the system designed and proposed according to Karakuri working principle, the cycle time was reduced by 27.5%. With their study in the packaging industry, Yashvant and Madnaik (2001) explained a Karakuri for making a cardboard box out of straight boards. With the new Karakuri mechanism, cardboard folding was achieved with the help of only one arm, and thus the efficiency increased by eight times.

In the Asian region, the companies operating in an extensive field, such as Toyota, Denso, Aisin, Panasonic, Mazda, and Mitsubishi, use the Karakuri mechanisms for various purposes in their facilities. In Europe, companies such as AIO, Item, Trilogiq, Virtual Manufacturing, Beewatec, and Volvo use the Karakuri mechanisms in their production plants. Volvo GTO has designed the Karakuri mechanism which it uses on the vehicle assembly line in Belgium. In a specific area of the assembly line, the operator performs the job of selecting the bolt that is identical to the other from the bolt bucket in front of him/her and does the assembly work. A spring-loaded magnetic Karakuri mechanism was designed to eliminate the time loss that occurs when the operator searches for bolts in the bucket and the inappropriate ergonomic situation (Bhanu and Kumar, 2018).

Karakuri mechanisms are low cost, easy to install, and easy to use. In the mechanism, where even electricity is rarely used, the motion is provided by gravity. It ensures the distances of the objects which are positioned too high or too low to be arranged suitable for the worker.

5. Materials and Methods

In this study, the ergonomic risk levels that employees in automotive production lines being exposed to were determined by the REBA method and by considering anthropometric measurements and ergonomic body postures at a line with high risk level, a shelf system was designed in accordance with the Karakuri working principle. According to Karakuri working principle, it was aimed to minimize ergonomic workload with a new shelf system designed by simulating it in a three-dimensional design program. After the design, REBA measurements were made again and the ergonomic risk level was minimized. The simulation allows the prevention of MSD by optimizing the body postures of the employees during the use of the mechanism (Peruzzini et al., 2020).

5.1. Ergonomic Risk Assessment with REBA

The REBA method enhanced by Hignett and McAttamney is a method that determines the risk levels of the postures, depending on the loads on the torso, neck, leg, upper arm, lower arm, and wrists of the employees during working posture and depending on whether the posture is static or dynamic (Hignett and McAttamney, 2000; Janowitz et al., 2006; Sağıroğlu et al., 2015).

When determining the REBA score of a working posture according to the REBA method, firstly the body parts were divided into groups as A and B.

- Group A: Torso, Neck, and Leg
- Group B: Upper arms, Lower arms, and Wrists

By indicating the scores of the torso, neck, and legs severally, a score consisting of a composed of those scores was determined using Table (A) given in Figure 2. A score obtained by adding the Carried Load/Force score to this score. Separated scores of the upper arm, lower arm and wrists were determined and a score consisting of a composed of those scores was defined using Table (B) given in Figure 2. B score was obtained to insert a Holding Score to this score. In the next stage, the C score is obtained by overlapping the A and B scores on Table (C) given in Figure 2. Finally, a single the REBA score is obtained by adding the activity score to the C score. The REBA score takes a value between 1 and 15 (Sağıroğlu et al., 2015).

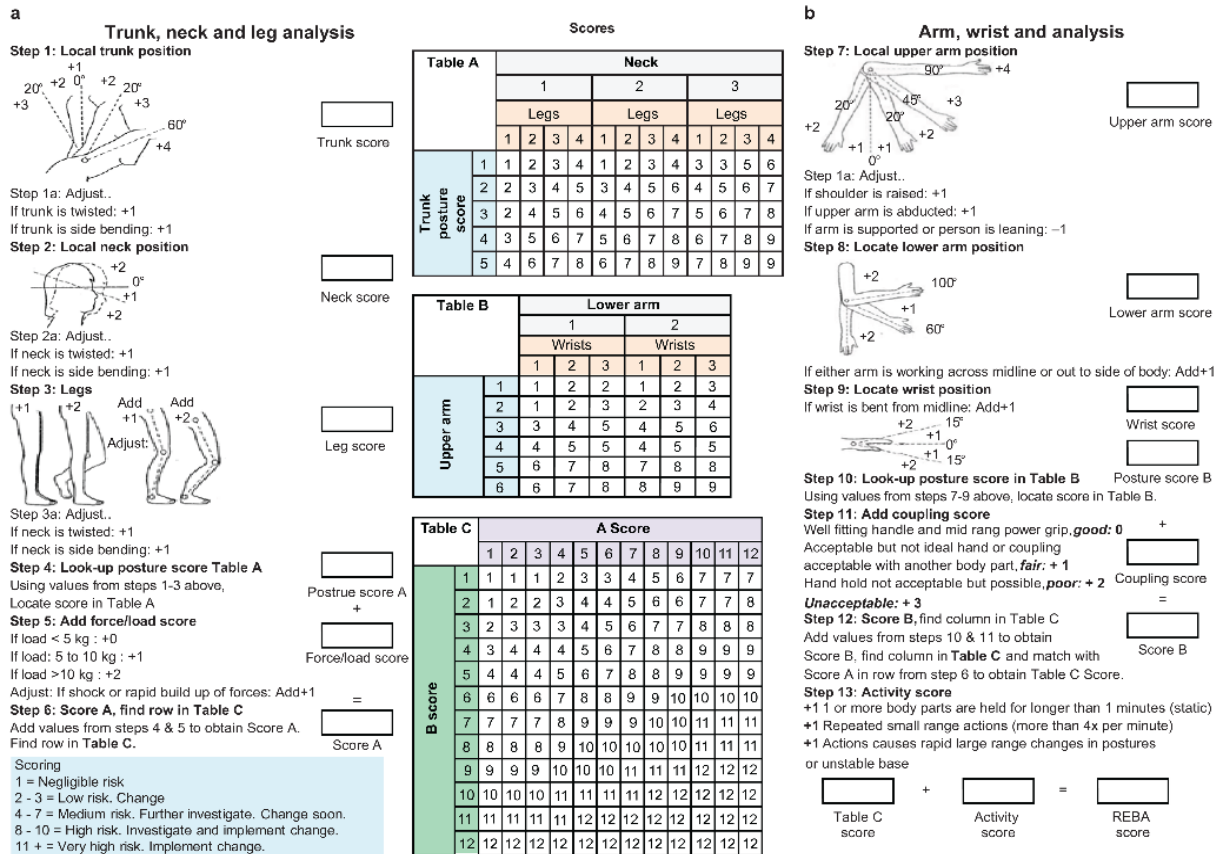


Figure 2. REBA implementation steps (Hignett and McAtamney, 2000)

In this study, the ergonomic risk levels that employees are exposed to in the production lines were determined by the REBA method, and the details of the ergonomic improvement work conducted primarily on a line with a high risk level (8 points) were explained. In the current situation, the positions of the body for the shelf layouts of four different heights during box handling and shelf placement were shown in Figure 3, respectively. As can be seen in Figure 3, the worker leans at most when he/she places the box at the lowest level on the shelf. The worker leans at an angle between 70° and 79° while carrying a 10-kg load.

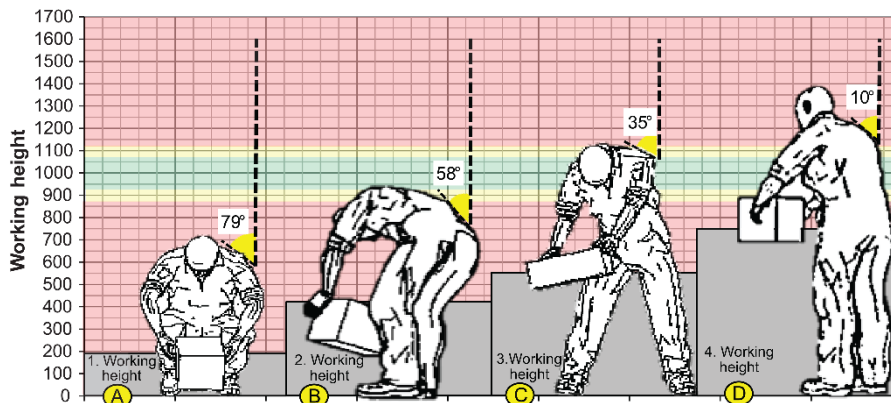



Figure 3. Working heights and body proportions before the Karakuri design

In the current situation, the REBA score of the line is given in Table 1. The torso is leaning forward with 70°–79°, the neck is leaning forward more than 20°, the legs are used bilaterally and there is flexion more than 60°. According to this assessment, through Table A, Group A scores were found. The total weight of a box is 10 kg as there are five pieces of 2 kg parts inside the box. A score was determined as 9 accordingly. In Group B evaluation, the upper arm position was between 45°–90°, and (–1) point was given as there was a gravity support for the posture of the arm. During the work, the lower arm was bent by 60°–100°. 0°–15° bending was seen on the wrists. In terms of holding, the hand grip was considered appropriate but not ideal. The B score was 3 according to these assessments. The score was 7, as the scores of A and B were combined in Table C. In addition to this score, an

activity score of +1 was given, as repetitive works were performed at short intervals. As a result, the REBA score was found 8. "High load" was assessed as an ergonomic risk (See Figure 2 for Tables A, B, and C).

Table 1. Determination of the rapid entire body assessment (REBA) score before Kaizen

Body Posture	Group A			Group B		
		Movement	Score		Movement	Score
	A-Body	>60 flexion	4	B-Upper arm	45-90 flexion	3 -1
	A-Neck	>20 flexion or extension	2	B-Lower arm	60-100 flexion	1
	A-Leg	Legs Bilateral weight, carrying, walking, or sitting	1 +2	B-Wrist	0-15 flexion or extension	1 +1
	Group A Score		7	Group B Score		2
	Load	10 kg	1 +1	Grip	Appropriate	1
	A Score		9	B Score		3

C Score	7
Activity	1
REBA Score	8

5.2. Design Process According to Karakuri Working Principle

The prerequisite in the design of systems is to know the measures of the person who uses the system and develops within that system. For these reasons, anthropometric measurements are the most commonly used ergonomic data (Kaya and Özok, 2017).

By taking ergonomic and anthropometric criteria into account, with the shelf system designed in accordance with the Karakuri principle, it was aimed to create an ergonomic production condition for workers working in production lines. In line with the intended use of Karakuri systems, the vertical movement of the material was considered as the basis and a solution to the existing ergonomics problem was generated.

In current standard working conditions, the worker working on the production line firstly places the finished parts in a box and after the number of pieces in the box is completed, places the box on the shelf. Figure 4 shows the current standard operating mode of the production line. Accordingly, the worker follows the 1st, 2nd, and 3rd steps respectively. The part produced in area 1 is placed inside the box after being checked in area 2. Five pieces are placed in each box and the total box weight is 10 kg. Shelves defined as A, B, and C show the parts with different references. While the reference part "A" is placed in four boxes on a shelf, the part with the reference "B" is placed in a three-box shelf arrangement, and the part with the reference "C" is placed in a two-box shelf arrangement. While doing this, the worker leans while lifting and carrying each 10 kg box and places the boxes on top of each other. Since the parts, which are produced as 675 pieces per shift, are arranged in a way that every five pieces to be placed in a box, the frequency of the worker to carry and arrange 10 kg boxes is $675/5 = 135$ times. The process of carrying 10 kg boxes by leaning and turning for 135 times per shift, poses a risk in terms of MSD.

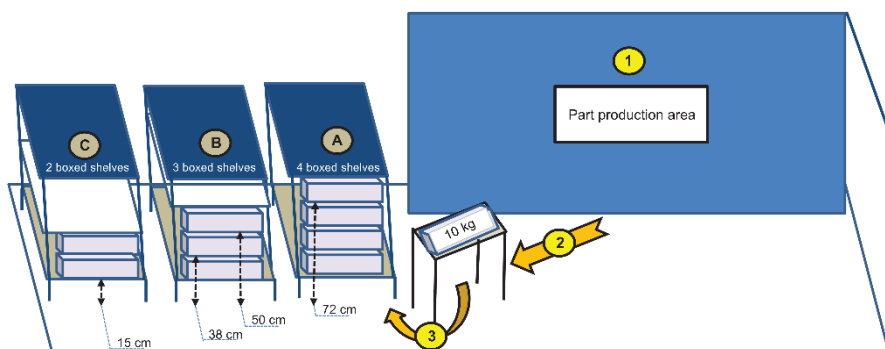


Figure 4. Line operation situation before the Karakuri mechanism design

In the literature review, it was seen that an adult person with a height of 165–185 cm should be working with a lightweight while working, 95–100 cm. Figure 5 shows the sizes of the average human body. Accordingly, the

standard working height under light load should be at the height of the elbow distance when the person is in an upright position. When these dimensions or standard operating conditions are exceeded, the concept of ergonomic working is avoided.

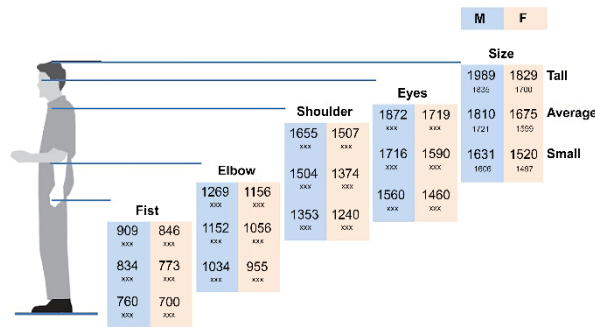


Figure 5. Anthropometric data (Paraponiaris and Rodríguez, 2019)

The strain factors on the employee can be eliminated by the system design created according to anthropometric data. Even small differences in dimensions can have big differences at some design points.

The negative effects of angular changes in body posture during working in a standing position on the spine and joints have also been proven by studies conducted in the literature. Figure 6 shows the bending angle of 20° formed between the spine and the axis of the body during the work in a standing position. The static pressure force created by this angle on the spine affects employee’s health negatively and causes the person to feel pain (Daub et al., 2018).

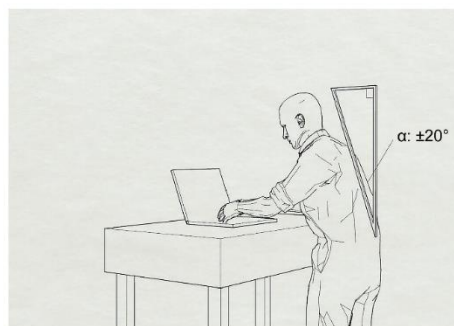


Figure 6. Slight forward leaning of the torso and static tension of the lower back when standing (Daub et al., 2018)

Nachemson’s study examined the pressures on L3 and L4 spines during the operation of people with different body types (Nachemson, 1965). Table 2 shows the pressure forces generated during the operation of an individual weighing 75 kg with a height of 170 cm. According to Table 2, in the case of carrying the 10 kg box subject to our study with a body angle of 20°, it was determined that it creates 49.5% more load per cm² on the L3 spine. This study will be a factor in reducing ergonomic workload and associated MSD for a worker working in mass production conditions, due to the increase in weight on the spine as the body leaning angle increases. For this reason, to obtain reference data before the improvement, the body leaning angles of the individual working in the mass production line were examined in the working positions specified in Figure 4.

Table 2. Pressure forces on the spine during the work while standing (Nachemson, 1965)

Age	Gender	Height	Weight	Body weight pressure on L3 spine	Pressure on the spine kg/cm ²	Pressure on the spine (leaning 10°–20°) kg/cm ²	Pressure on the spine (leaning 10°–20° with 10 kg load) kg/cm ²	Pressure on the spine (leaning 10°–20° with 20 kg load) kg/cm ²
45	Male	170	75	43.9	11.30	14.10	16.9	18.7

According to the current standard working method shown in Figure 4, the shelf layout where the worker put four boxes on top of each other was taken as the basis and the postures of the operator while placing four boxes on top of each other were depicted in Figure 3. It was found that the worker leans between the angles of 70°–79° with a load of 10 kg in his/her hand while placing the first box on the shelf.

It was observed that the work was performed with a maximum body angle of 58° and a minimum angle of 45° while the second box was placed on the shelf. During placing the third box on the shelf, the body working angle varied between 25°–35°. It was found that placing the fourth box on the shelf occurred with a body angle of 5°–10° since it was the nearest working condition to the standard working height value. The “A,” “B,” and “C” situations in Figure 3 significantly affect a person’s health and quality of life. To eliminate this effect and improve the working conditions, a new shelf design has been made in accordance with the Karakuri working principle.

Before starting the equipment design, the standard working order of the production line was analyzed. In conclusion, the height of the parts produced by the worker to be put in the box should always be 1000 mm. A linear motion on a single axis mechanism design is required. The system that will be designed will be able to stand at three different reference points of the shelf. According to the part studied, it will be integrated into three different heights, such as the shelf heights for four boxes, three boxes, and two boxes. According to this information, the three-dimensional design was implemented using a computer-aided design program.

Figure 7 shows the three-dimensional design. The part, which is indicated by the numbers “1” and “2” in the structure, acts as a stopper, limiting the movement of the boxes during their vertical movement. The lower weight moves the counterweights upward with the addition of the boxes to the structure. There are two boxes in the system when the counterweight reaches the stopper “1.” When the counterweight reaches the stopper “2,” there are three boxes in the system. In the four-box system, the lower body of the construction takes on the task of the stopper. For the rope selection in the designed system, Equation (1) (Kutay, 2017) was taken as the basis;

$$\text{Rope force } (F_R) = \frac{1,03 * F_{load}}{n_r * \eta_{ef}} \quad (1)$$

F_{load} : it was considered as the maximum force carried by the ropes when the system was suspended in a balanced way and taken as 840 N.

n_r : Number of the ropes carrying the weights in the system (2 pieces)

η_{ef} : Roller bearing efficiency

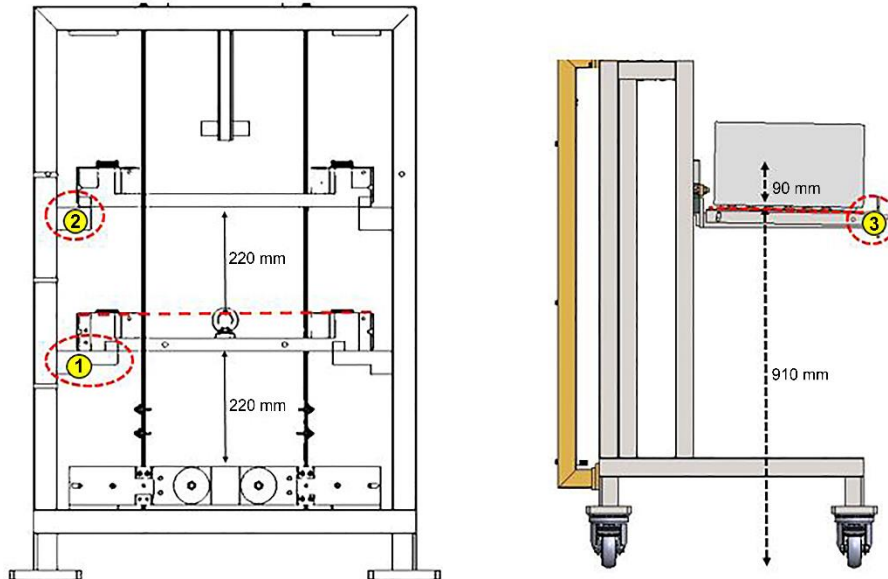


Figure 7. Karakuri mechanism design

Including the deflection rollers, four rollers were used in the system. The efficiency value for one roller was taken from Table 3. Efficiency value for all rollers in the system is Equation (2) (Kutay, 2017):

$$\eta_{ef} = \eta_{RV}^4 = 0.0995^4 = 0.980 \quad (2)$$

then the rope force is equal to;

$$F_R = (1,03 \times 840) / (2 \times 0,980) = 441.4 \text{ N}$$

The diameter of the rope that can handle this force was calculated by Equation (3) (Kutay, 2017):

$$d_R = c_R \times \sqrt{F_R} \quad (3)$$

c_R is the rope factor, and under the conditions of infrequent operation and the normal transport of the system not exceeding 2 hours per day, it is taken as 0.085 for the steel rope with the minimum strength value of 1770 N/mm² by accepting the steel rope that will not rotate or can rotate a little (See Appendix-1). Therefore, it is found as $d_R \approx 2$ mm (rope diameter should be at least 2 mm).

6 mm diameter rope is used for a safer mechanism. Rupture strength is found by Equation (4) (Kutay, 2017).

$$S_r = F_{Rmin} / F_R \quad (4)$$

F_{Rmin} is the breaking strength value of the rope and is found as 19600N using the hemp core standard steel rope table (DIN 3060) for 6 mm diameter rope with a strength of 1770 N/mm² (See Appendix-1). Therefore, it is found as;

$S_r = 19600 / 441.4 = 44$. The system was built to be 44 times safe.

Table 3. Roller efficiency (η_{ef}) (Kutay, 2017)

Description	Symbol Efficiency
Normally lubricated roller bearing	$\eta_{RY} = 0.995$
Normally lubricated seal	$\eta_{Co} = 0.980$
Cylindrical gear level, which is grinded and well lubricated	$\eta_{DT} = 0.995$
Cylindrical gear level, which is processed and well lubricated	$\eta_{Di} = 0.990$
Rope roller without seal	$\eta_{HMa} = 0.980$
Rope reel	$\eta_{Hta} = 0.980$
Pulley (chain) without seal	$\eta_{Zma} = 0.960$

In Figure 7, the plate where the boxes need to be placed was indicated with the number “3.” The plate was located on a vertical axis shaft, so the system was made operational. In order for the boxes to slide comfortably on the shelf, the plate was adjusted with an angle. Due to the given angle, the plate stands at an angle of 5°. In addition, adjustment blocks of 250–500 gr were integrated into the system to ensure the desired operability of the system and to make a precise adjustment. Figure 8 shows the manufactured Karakuri mechanism. The finished parts are put in an empty box on the plate in front of the mechanism. The mechanism table will move downwards depending on the weight of the box to be placed on it. The box filled is lined up on the shelf by being moved by roller system and gravity; it is shown in Figure 9. The process of lifting and transporting has been eliminated.



Figure 8. Karakuri mechanism detail



Figure 9. Karakuri and racking system integration

The working posture after the design is shown in Figure 10. Thanks to the design, it became possible to work at the same height for up to four boxes. After the boxes complete their downward movement, they manually move the locking latch mechanism, which prevents the boxes from sliding out of the table, opening the way of the boxes and ensuring that they slide safely to the shelves.

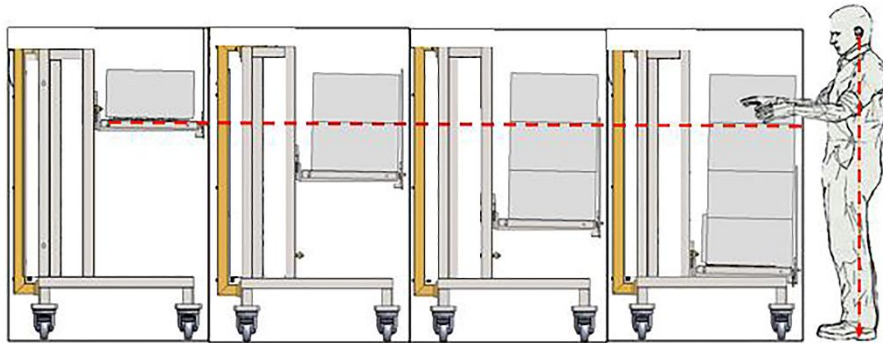


Figure 10. Working posture after the design

6. Result and Discussion

As a result of ergonomic risk assessment, the new shelf system which will work with the Karakuri principle on the existing production line whose risk status was found high was designed by taking anthropometric measurements and ergonomic body posture into account. Pre-design body postures were evaluated by being simulated. The mechanism designed to keep the operation with the minimum level of ergonomic risk was produced and started to be used. In Figure 11, working heights in the old version and after the mechanism design were simulated. In the first case, the 1st working height was 200 mm, the second working height was 430 mm, 3rd working height was 550 mm and 4th working height was 770 mm. Thanks to the mechanism design, the working height remained at a constant value of 1000 mm, within the green ergonomics zone indicated in Figure 11. The values which the graph peaked and bearing the numbers 2, 3, and 4 are the values measured when the worker first put the empty box. After the worker puts the empty box the system moves downward by itself, so the process of lifting and moving of 10 kg box was eliminated. The worker always puts the work pieces in boxes at the same height and after the box is filled, it goes down and moves according to the slope direction of the mechanism according to the Karakuri working principle.

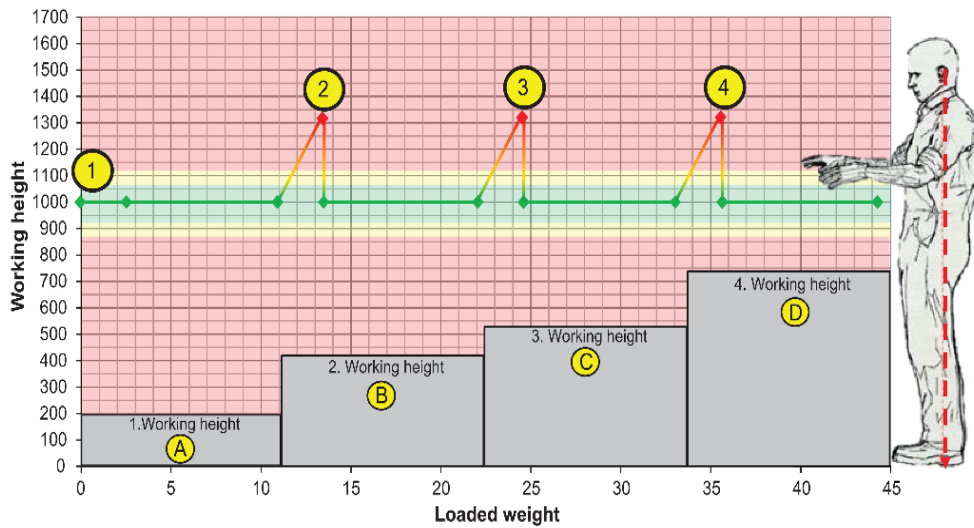
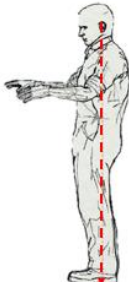


Figure 11. Working heights in the old version and after the mechanism design

Table 4 shows the REBA evaluation results of the new shelf system after the Kaizen. Since the worker will work at the same height, work of the body with a leaning position disappeared, and he/she started to work with an upright posture. The neck slightly leaned forward, accordingly the Table A value is 1. As the box is placed on the lowest level and the legs are in the upright position, there is no bending movement on the lower parts, Table A value is 1. After the worker puts 2 kg parts, which he/she completed the production of, into the box, the box moves downward because of the weight, the load score is 0 since the box lifting and moving process is eliminated. The total A score is found as 2. The B score in the new situation will be 1 point since the angle of the upper arm will be lower than 20°, 1 point since the lower arm will work at an angle of 90°, and 1 point since there will be a 0°-15° bend in the wrist. As there will be no box carrying in the new situation, hand gripping of the part will be evaluated, and in this case, the gripping score is 0, since there will be a good handle and moderate grip strength. The B score is 2 according to these assessments. The score is 2 as the scores of A and B were combined in Table C. In addition to this score, an activity score of +1 was given, as repetitive works were performed at short intervals. In the new situation, the REBA score is 3 and the risk level is assessed as “Low load” (See Figure 2 for Tables A, B, and C). The high level of ergonomic risk was reduced with the help of the study and a more ergonomic working environment was provided for the workers.

Table 4. Determination of the REBA score after Kaizen

Body Posture	Group A		Group B				
	Movement	Score	Movement	Score			
	A-Body	Upright posture	1	B-Upper arm	<20 flexion or extension	1	
	A-Neck	0-20 flexion	1	B- Lower arm	60-100 flexion	1	
	A-Leg	Legs Bilateral weight, carrying, walking, or sitting	1	B-Wrist	0-15 flexion or extension	1	+1
	Group A Score		1	Group B Score		2	
	Load	2 kg	0	+1	Grip	Good	0
	A Score		2		B Score		2

C Score	2
Activity	1
REBA Score	3

It is seen that Karakuri studies in the literature are taking a box, part or any object from a certain point to another. The mechanism designed with this study has the ability to take the part box to three different positions. Furthermore, the effect of the Karakuri mechanism designed by simulating both anthropometric and ergonomic data on ergonomic workload was investigated and information was given about the data to be used during the design.

7. Conclusions

Evaluating working conditions in terms of ergonomics is increasingly becoming more of an issue. Inappropriate ergonomic working conditions increase the risk of musculoskeletal disorder formation. As a result of MSD, workforce losses and indirect cost increases are experienced, which weaken the competitive conditions in the business world.

Body sizes vary from individual to individual. Essentially, the points to be considered are that the person can be in a sitting position during the day when necessary and the person may need to perform some tasks by leaning or standing. Therefore, to ensure that a person can do the job without feeling tired or uncomfortable and without any decrease in performance and motivation throughout the day, the design should be made considering the human-machine harmony. In the study conducted, special emphasis is placed on the undeniable effect of ergonomics science on human health and the importance of the design factor is emphasized.

As part of the study, employees were observed in the situation at first, then ergonomic risk levels were determined using the REBA ergonomic risk assessment method. Kaizen (improvement) studies have been initiated in the work areas that have a "high" level of ergonomic risk and need to be improved. In this study, the mechanism working according to Karakuri working principle was designed by taking into account body postures for the production line where the box handling process is determined with an ergonomic risk score of 8. Body postures were simulated in accordance with the REBA method and the mechanism design was prepared in a three-dimensional design program. Thanks to the simulation, the mechanism could be designed in the most appropriate way to the ergonomic conditions before manufacturing, and in the new situation, a working environment suitable for both anthropometric and ergonomic body postures could be provided. Thus, ergonomic risk levels could be reduced to negligible levels and possible MSD could be prevented.

With the new mechanism designed according to Karakuri working principle, the 10 kg box handling process was eliminated. After the worker puts the finished 2 kg part into the empty box, the box moves to the lowest level without any carrying need due to the mechanism moving up from the lower level, and with the roller system and the slope of the mechanism, the box moves by sliding to the back of the shelf. The employee completes his/her work with a body posture in the upright position without lifting weights or leaning. Thus, the ergonomic risk situation, which was "high" in the current situation, could be reduced with the newly designed mechanism and an ergonomic workspace could be provided for the employee. In the new situation, the ergonomic workload score is "3" and the risk level is "low." At the same time, as the new mechanism will eliminate the lifting, carrying, and pushing works, the employee's distraction will be reduced, and thereby occupational accidents while working will decrease.

In addition to ergonomic improvements, as the manual transportation works of the employee are eliminated, the cycle time of the line, which was 120 s in the first state, decreased to 100 s after the use of the Karakuri mechanism, and the efficiency of the line increased by 17%.

Acknowledgments

None (company information is confidential).

Conflicts of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Akay, D., Dağdeviren, M., Kurt, M., 2003. Ergonomic Analysis of Working Postures. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18, 73-84.
- Akyol, H., 2017. Analysis of Working Positions in Textile Workshop by REBA. Master's Thesis. Çukurova University, Adana.
- Álvarez-Casado, E., Zhang, B., Sandoval, S.T., Pedro, M., 2011. Using Ergonomic Digital Human Modeling in Evaluation of Workplace Design and Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders Aboard Small Fishing Vessels. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 26(4), 463-72.
- Anggrahini, D., Prasetyawan, Y., 2020. Indriyani Diartiwi SI. Increasing Production Efficiency Using Karakuri Principle (A Case Study in Small and Medium Enterprise). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 852:012117.
- Atcı, H., Gönen, D., Oral, A., 2015. Ergonomic Analysis of Postures Causing Strain on Employees with REBA Method. *Suleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design*, 3, 239-244.
- Bhanu, V.M., Kumar, S.M., 2018. Global Study and Implementation of Karakuri. Bachelor Thesis. Sweden Chalmers Tekniska Högskola, Gothenburg.

- Boulila, A., Ayadi, M., Mrabet, K., 2018. Ergonomics Study and Analysis of Workstations in Tunisian Mechanical Manufacturing. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28, 163-226.
- Calzavara, M., Faccio, M., Persona, A., Zennaro, I., 2021. Walking Worker vs Fixed Worker Assembly Considering the Impact of Components Exposure on Assembly Time and Energy Expenditure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2971-2988.
- Daub, U., Gawlick, S., Blab, F., 2018. *Ergonomic Workplace Design*. Germany: Fraunhofer IPA.
- David, G.C., 2005. Ergonomic Methods for Assessing Exposure to Risk Factors for Work-related Musculoskeletal Disorders. *Occupational Medicine*, 55 (3), 190-199.
- Detwiler, B., 2006. The Friendly Faces of Japanese Robots. [Tea serving puppets' photo]. Available at: <https://www.techrepublic.com/index.php/pictures/photos-the-friendly-faces-of-japanese-robots/6/>. (Accessed 24 Nov 2020).
- Ertas, C., Bulut, Y., 2017. Ergonomics Activities Department. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5, 13-22.
- Esen, H., Fiğlalı, N., 2013. Working Posture Analysis Methods and the Effects of Working Posture on Musculoskeletal Disorders. *Sakarya University Journal of Science*, 17(1), 41-51.
- Felekoğlu, B., Taşan, S., 2017. Ergonomic Risk Assessment for Work-related Musculoskeletal Disorders: A systematic reactive/proactive integrated approach. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32, 777-793.
- Gönen, D., Oral, A.D., Ocaktan, M.A.B., Karaoğlan, A., Cicibaş, A., 2017. Ergonomic Analysis of Assembly Unit in a Transformer Company. *Sakarya University Journal of Science*, 21, 1067-1080.
- Gönen, E., Kalınkara, V., 1993. Examining the Dimensional Measurements of Female Students Attending University. *Proceedings of the 4th Ergonomics Congress*, 93-107.
- Hignett, S., McAtamney, L., 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205.
- Janowitz, L.L., Gillen, M., Ryan, G., Rempel, D., Trupin, L., Swig, L., Mullen, K., Rugulies, R., Blanc, P.D., 2006. Measuring the Physical Demands of Work in Hospital Settings: Design and Implementation of an Ergonomics Assessment. *Applied Ergonomics*, 37(5), 641-658.
- Joshi, M., Deshpande, V., 2020. Investigative Study and Sensitivity Analysis of Rapid Entire Body Assessment (REBA). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 79.
- Kara, Y., Atasagun, Y., Peker, A., 2014. Analysis of Working Posture with REBA Method in Assembly Lines and Ergonomic Risk Assessment. VII. *International Occupational Health and Safety Conference*. İstanbul, Turkey May 5-7.
- Katayama, H., 2013. On Design and Analysis of Karakuri Contrivance Template Form Development for Analysis and Its Application. *Proceeding of 16th Annual National Meeting on Japan Society of Logistics Systems (JSLS)*. 25-28.
- Kaya, Ö., Özok, A.F., 2017. The Importance of Anthropometry in Design. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5, 309-316.
- Kılıç, A., Ayvaz, B., 2016. A Lean Manufacturing Application in Turkish Automotive Industry. *İstanbul Commerce University Journal of Science*, 15, 29-60.
- Kıraç, Y., 2005. Ergonomics at Management of Office and the Effect of Ergonomics to Productivity: An Example of Ankara Police Department. Master's Thesis. Gazi University, Ankara.
- Kurban, H., Kaygın, B., Tankut, A.N., 2016. The Usage of Anthropometric Measurement and Ergonomic Analysis in Furniture Design. *İstanbul Commerce University Journal of Science*, 6, 313-320.
- Kutay, M.G., 2017. How Do I Build a Crane. [Calculation formulas and tables]. Available at: http://www.guven-kutay.ch/vinc/40_00_NasilVincYaparim.pdf/. (Accessed 24 Nov 2020).
- Murata, K., Wakabayashi, K., Watanabe, A., Katayama, H., 2013. Analysis on Integrals of Lean Module Technologies. *Research in Electronic Commerce Frontiers*, 1(2), 21-29.
- Nachemson, A., 1965. The Effect of Forward Leaning on Lumbar Intradiscal Pressure. *Acta Orthop Scand*. 35, 314-328.
- Paraponiaris, P.Y., 2019. Rodríguez MA. Implementation of Karakuri Kaizen. Bachelor Thesis. Sweden Skövde University, Skövde.
- Parsons, K.C., 2000. Environmental Ergonomics; A Review of Principles, Method and Models. *Applied Ergonomics*, 31(6), 581-594.
- Pavnaskar, S.J., Gershenson, J.K., Jambekar, A.B., 2003. Classification Scheme for Lean Manufacturing Tools. *International Journal Production Research*, 41(13), 3075-3090.
- Peruzzini, M., Grandi, F., Cavallaro, S., Pellicciari, M., 2020. Using Virtual Manufacturing to Design Human-Centric Factories: An Industrial Case. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-15.
- Pheasant, S., 2005. Haslegrave CM. *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*. 2nd ed. London, England: CRC Press.
- Rani, D., Saravanan, A., Agrewale, M., Ashok, B., 2015. Implementation of Karakuri Kaizen in Material Handling Unit. *SAE Technical Paper*: 26, 0074.
- Roser, C., 2017. Introduction to Karakuri Kaizen. [Karakuri kaizen]. Available at: <https://www.allaboutlean.com/karakuri-introduction/>. (Accessed 24 Nov 2020).
- Sağiroğlu, H., Coşkun, M.B., Erginel, N., 2015. The Ergonomics Risk Analysis with REBA of Workstations Line. *Suleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design*, 3(3), 339-345.
- Sakalar, E., 2018. The Analysis of Ergonomic Risk Factors in an Assembly Line with REBA Method: An Application in the Automotive Industry. Master's Thesis. Izmir University of Economics, İzmir.
- Tangl, A., Vajna, I., 2018. The Results of Lean Productivity Development Combined with Karakuri Kaizen Method. In: *ICOM 8th International Conference on Management*, 614.
- Tanır, F., Güzel, R., İşsever, H., Polat, U., 2013. Musculoskeletal Disorders in an Automotive Manufacturing Plant and the Outcomes of Ergonomics and Exercise Training in Workers Who Used Sick Leave. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 59, 14-21.
- Ulutaş, İ.B., Gündüz, T., 2017. Ergonomic Risk Analysis of Automotive Wire Harnesses. *Uludag University Journal of the Faculty of Engineering*, 22(2), 107-120.

- Xiaobo, Z., Zhou, Z., Asres, A., 1999. A Note on Toyota's Goal of Sequencing Mixed Models on an Assembly Line. *Computers & Industrial Engineering*, 36(1), 57-65.
- Yapıcı, F., Baş H., 2015. Ergonomic Factors in Productivity. *Suleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design*, 3(3), 591-595.
- Yararel, B., 2019. Ergonomic and Antropometric Effects in Office Design. *J Journal Architecture and Life*, 4(1), 141-153.
- Yashvant Khire, M., Madnaik, S.D., 2001. Folding Cartons Using Low Cost Automation – A Case Study. *Assembly Automation*, 21(3), 210-212.
- Yener, Y., Can, G.F., Toktaş, P., 2019. A Job Rotation Proposal Considering Physical Strain and Perceived Workload Level. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 27, 9-20.



SERİ BAĞLI U-BORULU VAKUM TÜPLÜ GÜNEŞ KOLEKTÖRÜNÜN ISIL VERİMİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ

İsmail ÖZCAN^{1*}, Arif Emre ÖZGÜR², Ahmet ÖZSOY²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Keçiborlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi,
Vakum Tüp,
Kolektör Verimi,
Basınç Düşümü.

Öz

Günümüzdeki çevresel sorunların en başında küresel ısınma gelmektedir. Bu sorunun çözümünün temiz enerji kaynaklarından geçtiği genel bir kanıdır. Güneş enerjisi de bu temiz enerji kaynaklarından olup, günümüzde elektrik enerjisi üretimi, sıcak su hazırlama, kurutma ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bununla birlikte, elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılan fotovoltaik sistemlerin verimleri nispeten düşüktür. Düzlemsel toplayıcılar ile elde edilecek akışkan sıcaklığında ise bir sınır vardır. Kurutma uygulamalarının da havalı düzlemsel toplayıcılar ile yapılması, birim kuru ürün için gerekli toplayıcı alanını arttırmaktadır. Dolayısıyla, güneş enerjisinin bu üç ana alanda, daha yüksek verim ile değerlendirilebileceği araştırma geliştirme çalışmaları sürmektedir. Bu çalışmada vakum tüplü, seri bağlı U-borulu bir güneş kolektörü iç ortamda test edilerek verim eğrileri oluşturulmuştur. Çalışmada literatürdeki çoğu çalışmada kullanılan vakum tüplerden farklı olarak dış çapı 70 mm olan 10 adet vakum tüp ve bunların içine yerleştirilen 8 mm dış çaplı, U forma getirilmiş, seri bağlı çelik borular kullanılmıştır. Sirkülasyon pompası ve sisteme entegre edilmiş bir plakalı ısı değiştirici ile kapalı bir çevrim oluşturularak, güneş simülatörü ile iç ortam şartlarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Simülatörden güneş kolektörü üzerine ortalama 902 W/m² ışınım şiddeti halojen lambalarla sağlanmıştır. Deneyler, U-borular içindeki akışkan debisi için 3 farklı değerde ve 4 farklı giriş sıcaklığı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada kolektör veriminin %60 ile %78 arasında değiştiği görülmüştür. U-borulu güneş kolektörünün giriş-çıkış arası basınç düşümü 59-65 kPa arasında değişmektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında, büyük çaplı vakum tüpe sahip ve seri bağlanmış çelik borulu toplayıcı kullanımının, kolektör çıkış sıcaklığında artış sağlamakla birlikte basınç düşümü de yüksek olduğundan, sistem seçiminde pompalama gücünün de dikkate alınması gerekmektedir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL EFFICIENCY AND PRESSURE DROP OF A SERIAL CONNECTED U-PIPE EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTOR

Keywords

Solar Energy,
Evacuated Tube,
Collector Efficiency,
Pressure Drop.

Abstract

Global warming is at the forefront of today's environmental problems. It is a general belief that the solution to this problem is through clean energy sources. Solar energy is one of these clean energy sources, and it is used in electrical energy production, hot water preparation, drying and many industrial applications today. However, the efficiency of photovoltaic systems commonly used in electricity generation are relatively low. Also, there is a limit in the fluid temperature to be obtained with flat plate collectors. Drying applications with planar collectors also increase the required collector area. Therefore, research and development studies are ongoing in which solar energy can be evaluated with higher efficiency. In this study, a solar collector with evacuated tube and series connected U-pipe was tested indoors and efficiency curves were formed. In the study, 10 vacuum tubes with an outer diameter

* İlgili yazar / Corresponding author: ismailozcan@isparta.edu.tr , +90-505-959-4272

of 70 mm and series connected steel tubes with a diameter of 8 mm placed inside them were used. A closed cycle was created with circulation pumps and a plate heat exchanger integrated into the system, and measurements were performed under indoor conditions using a solar simulator. An average of 902 W/m² radiation intensity from the simulator to the solar collector is provided by halogen lamps. The experiments were carried out at 3 different values for the fluid flow rate in the U-pipes and with 4 different inlet temperatures. In the experimental study, it was observed that the collector efficiency ranged between 60% and 78%. The pressure drop between the inlet and outlet of the U-tube solar collector varies between 59-65 kPa. Looking at the analysis results, the use of a series-connected steel tube collector with a large diameter evacuated tube provides an increase in the collector outlet temperature, but since the pressure drop is high, the pumping power should also be taken into account in the system selection.

Alıntı / Cite

Özcan, İ., Özgür, A. E., Özsoy, A., (2022). Seri Bağlı U-Borulu Vakum Tüplü Güneş Kolektörünün Isıl Verimi Ve Basınç Düşümünün Deneysel İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1445-1454.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Özcan, 0000-0003-0541-5662
A. E. Özgür, 0000-0001-6382-5462
A. Özsoy, 0000-0003-0911-9799

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.12.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	09.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.06.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Dünyada her geçen gün nüfusa ve endüstrileşmedeki artış bağlı olarak enerji ihtiyacı artmaktadır. Artan bu enerji talebinin karşılanmasında, fosil yakıtlar halen yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fosil yakıtların yanması ile birlikte ortaya çıkan gazlar sonucunda, küresel ısınma ve asit yağmurları gibi çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınma ve çevresel sorunlar ile mücadele etmede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda gelişim göstermeye mecbur kalınmıştır. Dünya ile birlikte ülkemizde de bu alanda araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapılmakta ve devam etmekte, yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanabilmek için bilimsel ve teknolojik çalışmalar ile bu alandaki yatırımlar her geçen gün artış göstermektedir.

Ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden olan güneş enerjisi, hem güneşlenme süresi, hem de birim alana gelen toplam enerji olarak son derece önemli bir kaynaktır. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve 2023 yılı için 5000 MW kurulu güneş santrali hedefinin olması, güneş enerjisine ilgiyi artırmaktadır (Akdağ ve Yeroğlu, 2019). Güneş enerjisi günümüzde elektrik enerjisi üretimi, sıcak su hazırlanması ve kurutma gibi önemli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Güneş enerjisini kullanmanın en basit ve en verimli yolu, güneş kolektörlerinin kullanıldığı ısıtma uygulamaları için onu termal enerjiye dönüştürmektir ve bu işlem çeşitli sistemlerle geliştirilmektedir (Saydam vd., 2021). Bunlardan birisi de vakum tüplü güneş kolektörleridir. Yapılan çalışmalarda, vakum tüplü toplayıcıların orta çalışma sıcaklığına sahip sistemler arasında toplayıcı verimi açısından daha elverişli olduğu ortaya konmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Sabiha vd. (2015), vakum tüplü kolektörlerin diğer kolektörlere nazaran daha yüksek verimli olduğunu ve bu kolektörlerin orta çalışma sıcaklıklarında kullanım için daha iyi bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Mehmood vd. (2019), vakum tüplü güneş kolektörlerinin benzer çalışma koşulları altında düz plakalı kolektörlere göre %25-%40 daha verimli olduğunu ifade etmişlerdir. Literatürdeki U-borulu vakum tüplü toplayıcılarla ilgili diğer çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir. Bahrami ve Bahrami (2021), İran şartlarında 4 farklı iklim için U-borulu vakum tüplü bir güneş enerjisi modelleyerek termal analizini gerçekleştirmişlerdir. Cam tüp boyu, çapı, kütle akış hızı, absorber alanı gibi parametrelerin toplayıcı verimine etkisinin incelendiği çalışmada, cam tüpün boyunun sabit olduğu durumda çapının artırılmasının toplayıcı verimini arttırdığını belirtmişlerdir.

Dündar (2007), vakum tüp toplayıcılar ile farklı tipteki düzlemsel toplayıcıların performans ve verim karşılaştırmalarının yapıldığı bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışma, Karabük ili şartlarında deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçta vakum tüplü toplayıcıların karşılaştırılan toplayıcı sistemlerine oranla daha verimli oldukları belirlenmiştir. Çalışmada diğer toplayıcılara nazaran vakum tüplü toplayıcıların düşük ışınım şiddetlerinde de iyi bir performans ortaya koyduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada Zambolin ve Col (2010), düzlemsel güneş kolektörleri ile vakum tüplü kolektörlerin günlük enerji verimliliğini karşılaştırmışlardır. Düzlemsel kolektörde, daha fazla yansıma kaybı nedeniyle sabah ve öğleden sonra saatlerinde kolektörün optik veriminin düştüğünü, vakum tüplü kolektörün ise geometrisi nedeniyle absorber alanının çoğunun günün uzun

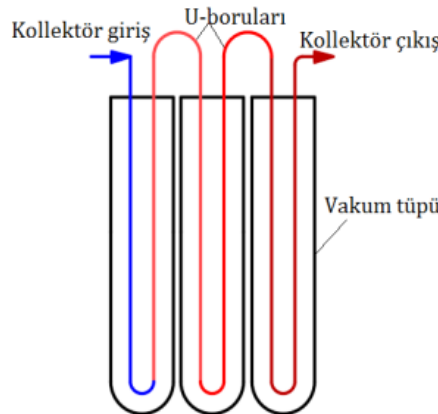
süresi boyunca ışınım maruz kalacağı için bu verim kayıplarının azaldığını belirtmişlerdir. Düz plakalı kolektör ile vakum tüplü kolektörün enerji, ekserji ve ekonomik analizlerinin yapıldığı çalışmada Özdemir ve Yatarkalkmaz (2015), vakum tüplü kolektörün veriminin %59 ile %75, düz plakalı kolektör veriminin ise %33 ile %72 arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Yapılan deneylerde çalışma sıcaklığının artmasıyla kolektör verimleri arasındaki farkın açıldığı görülmüştür. Öte yandan bir güneş kolektörünün daha verimli kullanılması için yataya eğimli ve güneşe azami maruz kalacak şekilde yerleştirilmesi önemlidir. Bu konuda Ong vd. (2013), yaptıkları çalışmada eğimli ve dikey konumdaki aynı tanktan beslenen iki farklı vakum tüplü kolektörü karşılaştırmış, eğimli panel sisteminin dikey panel sistemine göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Toplam güneş ışınımı ortalama 4.5 kWh/m² olan bir günde, beklenen ortalama su sıcaklığı artışı, eğimli panel sistemi için 138 °C ve dikey panel sistemi için yaklaşık 98 °C olacağını belirtmişlerdir.

Suita-Olcha vd. (2021), Lublin (Polonya) şartlarında, hava koşullarının ve çalışma parametrelerinin vakum tüplü güneş kolektörünün ısı ve ekserji verimlerine etkisini araştırmışlardır. Temmuz ve Ağustos ayları için ortalama termal kazanç sırasıyla 163 W/m² ve 145 W/m² olarak bulunmuştur. Güneş kolektörünün ortalama aylık enerji verimlerinin de yine sırasıyla %45,3 ve %32,9 olduğunu ifade etmişlerdir. Bir diğer çalışmada Norveç'in bulutlu ve soğuk iklim koşullarında 7,8 m²'lik bir vakum tüplü güneş kolektörünün performans analizi gerçekleştirilmiş, bir evsel güneş enerji sisteminden %72'ye varan bir termal verimle yılda 2200 kWh'e kadar ısı elde edilebileceği belirtilmiştir (Popsueva vd., 2021).

Yukarıda incelenen literatürdeki bazı çalışmalar göstermektedir ki; güneş enerjisi destekli vakum tüplü sistemlerin kullanımı halen yeniliğini korumakta ve bu alanda yapılan çalışmalar devam etmektedir. Yapılan bu çalışmada, üç farklı çalışma akışkanı debisi ve boru içerisindeki Re sayısı değişimi ile seri bağlı U-borulu vakum tüplü bir kolektörün verimliliği ve basınç düşümü deneysel olarak araştırılmıştır. Literatürde, bu çalışmanın odaklandığı seri bağlı U-borulu vakum tüplü kolektörlerin verimliliğini ve basınç düşümünü inceleyen başka bir çalışmaya rastlanmamıştır.

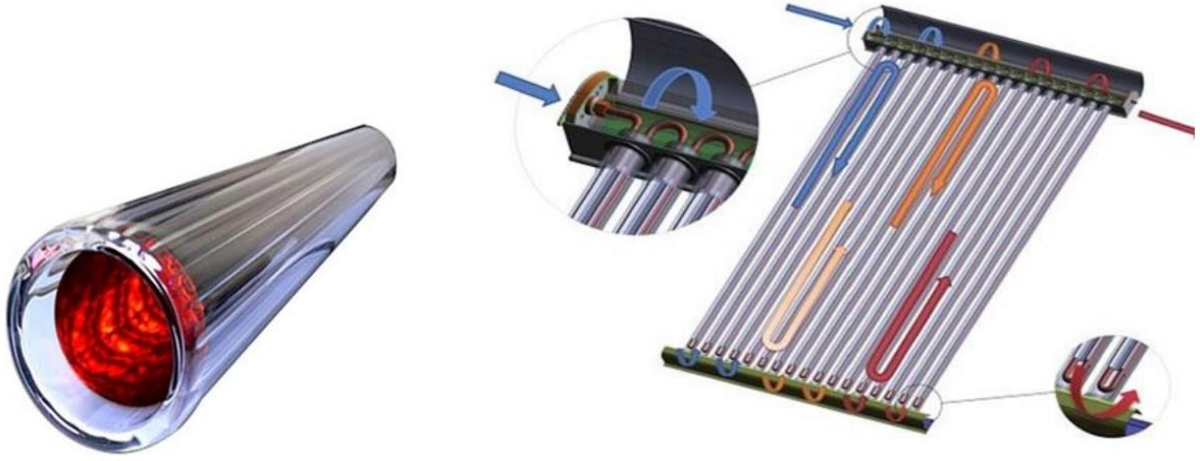
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Vakum tüp teknolojisi borosilikat cam kullanılarak, iki cam tüp arasının vakum edilmesiyle üretilir. Bu vakum, termal enerjiyi yüksek oranda koruyarak, daha yüksek bir verim elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Tüplerin silindirik biçiminden dolayı güneş ışınları daha çok dik açı ile gelir ve verim artışı sağlar. Vakum tüplü kolektörlerde ısı aktarımı cam tüp içerisine yerleştirilen borularla sağlanır. Vakum tüplü kolektör kullanılan sistemlerde U-borular seri ya da paralel bağlanabilir. Seri bağlı sistemlerde (Şekil 1) basınç kayıpları yüksek olabileceği gibi, akışkan çıkış sıcaklığı da nispeten daha yüksektir.



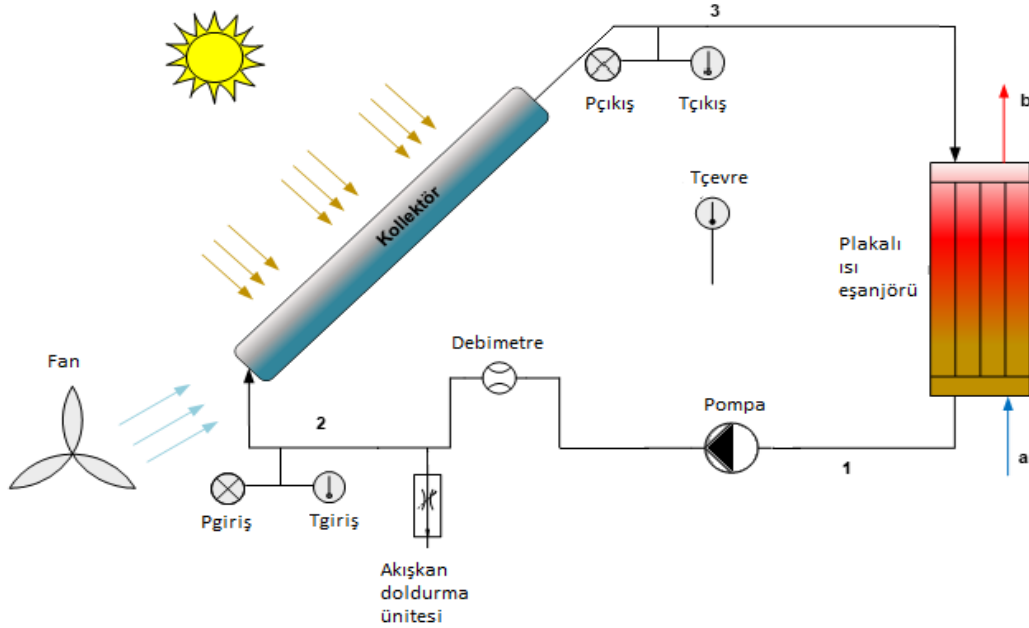
Şekil 1. Seri bağlı U-borulu sistem (Serial connected U-pipe system) (Özsoy ve Galip, 2018a).

Bu çalışmada U-borulu kanatsız bir sistem tercih edilmiştir. Kullanılan vakum tüp ve U-boruların cam tüp içine yerleşimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Vakum tüpü ve U-borularının tüpteki yerleşimi (Evacuated tube and placement of U-pipes in the tube) (Sunmax internet sitesi, 2021).

Bu çalışmada vakum tüplü U-borulu bir güneş kolektörü, sirkülasyon pompası ve sisteme entegre edilmiş bir plakalı ısı değişirici ile güneş simülatörü kullanılarak iç ortam şartlarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de deneysel çalışmada kullanılan sistemin şematik çizimi verilmiştir.



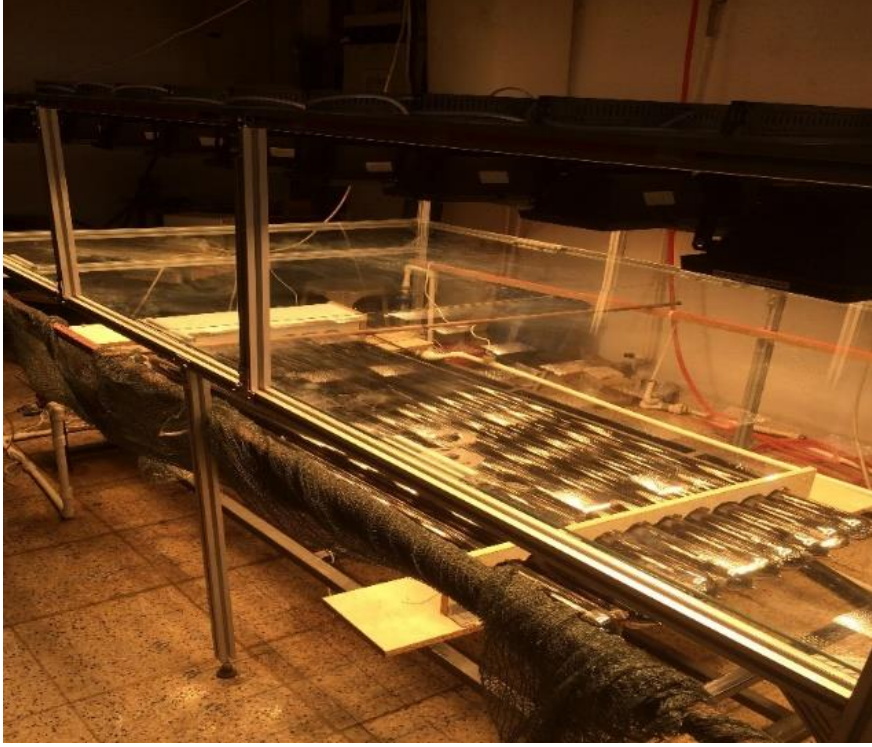
Şekil 3. Sistemin şematik görünümü (Schematic view of the system)

Çalışmada ilk olarak 8 mm dış çapa sahip çelik borunun U-formuna getirilip, toplamda 10 adet U borusundan oluşan seri bağlı bir toplayıcı boru sistemi oluşturulmuştur. Cam tüpler ile ölçme ve kontrol elemanlarının bağlanarak bir sistem haline getirilmiştir. U-borulara herhangi bir kanat eklemesi yapılmamıştır. U-borular, literatürdeki çoğu çalışmada kullanılan vakum tüplerden farklı olarak dış çapı 70 mm olan 10 adet vakum cam tüpün içine yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Vakum tüplü U-borulu kolektörün teknik özellikleri (Technical characteristics of vacuum tube U-tube collector)

Cam tüp	Dış cam tüp çapı (m)	0,070
	İç cam tüp çapı (m)	0,057
	Cam tüp uzunluğu (m)	2
	Cam tüp sayısı (ad)	10
Kolektör Alanı	2,0*0,07*10	1,4
U-borusu	Dış çap (m)	0.008
	Et kalınlığı (m)	0.001

Deneysel çalışma sürecinde, güneş kolektörlerinin dış ortam şartlarında güneş ışınımı ile performans ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, dış ortamın sıcaklığı, ışınımın açısı, şiddeti gibi kolektör veriminde etkisi bulunan verilerin zamana bağlı değişim göstermeleri, sağlıklı veri elde etme konusunda problem teşkil edebilmektedir. Bu sebeple istenilen değerlerde ayarlanabilir ışınım şiddetleri belirleyerek çalışmak ve dış ortamda karşılaşılabilecek risklerden ve diğer unsurlardan kaçınabilmek amacıyla güneş simülatörü kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de güneş simülatöründe test edilen U-borulu vakum tüplü güneş kolektörünün cam tüpleri görülmektedir.



Şekil 4. Güneş simülatörü ve toplayıcının görünümü (View of solar simulator and collector)

TS EN ISO 9806 güneş kolektörleri test standardına uygun olarak oluşturulan güneş simülatöründe ortalama 902 W/m^2 ışınım şiddeti sağlanmıştır. Güneş kolektörlerinin test edilmesinde TS EN 12975 standartlarında belirtilen ve Tablo 2'de verilen, deneylerde müsaade edilen sapma değerlerine uyulmuştur.

Tablo 2. TS EN 12975 Standardında belirlenen sınır şartları (Boundary conditions determined in the TS EN 12975 standard)

Parametre	Müsaade edilen sapma
İşınım şiddeti	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Ortam sıcaklığı	$\pm 1 \text{ K}$
Akışkanın kütle debisi	$\pm \%1$
Kolektör giriş sıcaklığı	$\pm 0,1 \text{ K}$

Kolektörün giriş ve çıkış akışkan sıcaklığı Pt100 tipi sıcaklık ölçüm elemanları ile ölçülmüştür. Sistemde dolaşan akışkanın debisi Krohne marka debimetre ile ölçülmüştür. Kolektörden çıkan akışkanın kolektörde aldığı ısı, plakalı bir ısı değiştirici ile sistemden çekilmiştir. Böylece kapalı devre olarak çalışan deney sisteminde kolektöre giren akışkan sıcaklığı sabit tutulmuştur. Sistemdeki kolektörün altına ve üstüne yerleştirilen birer adet K tipi termokupl ile ortam sıcaklığı ölçülmüş, ölçülen bu sıcaklıkların ortalaması dış ortam sıcaklığı olarak alınmıştır. Basınç ölçümleri ise Ahlborn FDA 602 L marka basınç sensörleri ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve basınç ölçümleri Ahlborn Almemo 5690-2 ile kaydedilmiştir. Kullanılan cihazlar ve ölçüm hassasiyetleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ölçümlerde kullanılan cihazlar ve hassasiyetleri (The devices used in the measurements and their sensitivities)

Cihaz	Kullanım Amacı	Hassasiyet
Pt100	Akışkan sıcaklık ölçümü	$\pm 0,05$ °C
K tipi termokupl	Çevre sıcaklığı ölçümü	$\pm 0,05$ °C
Krohne hacimsel debimetre	Akış debi ölçümü (18-180 l/h)	$\pm \%1,16$
Ahlborn FLA613-GS	Işınım şiddeti ölçümü	$\pm \%10$
Ahlborn FDA 602 L	Basınç sensörü	$\pm 0,05$

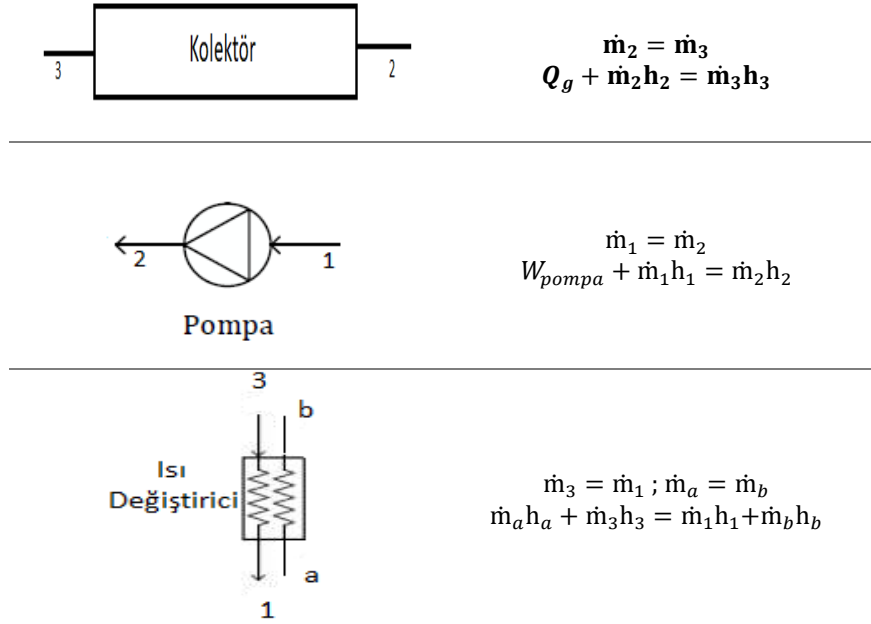
3.1. Verim Analizi (Efficiency Analysis)

Önerilen sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmek için, kütle ve enerji denge bağıntılarının dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\text{Kütle dengesi:} \quad \sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\text{Enerji dengesi:} \quad \sum \dot{m}_g \cdot h_g = \sum \dot{m}_ç \cdot h_ç \quad (2)$$

Yukarıdaki bağıntılarda kullanılan alt indislerdeki “g” ve “ç” ifadeleri sisteme giren ve çıkan olarak tanımlanır. “m” kütleli debiyi, “h” ise entalpiyi ifade etmektedir. Sistem bileşenlerinin kütle ve enerji denge bağıntıları ise **Tablo 4**'te verilmiştir (Dinçer ve Rosen, 2013; Çengel ve Boles, 2015).

Tablo 4. Sistem bileşenlerinin kütle ve enerji denge denklemleri (Mass and energy balance equations of system components)

Güneş kolektörlerinde verim hesaplamaları, toplayıcı tarafından akışkana aktarılan enerjinin (\dot{Q}_a), kolektör yüzeyine gelen toplam ışıma enerjisine (\dot{Q}_g) oranının belirlenmesi ile gerçekleştirilir. Alınan ısı enerjisi, akış hattı üzerinden ölçülen sıcaklıklar ve debi değerleri kullanılarak hesaplanır. Güneş kolektörü verimi Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)'deki gibi yazılabilir.

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_g} \quad (3)$$

$$\eta_k = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A I} \quad (4)$$

Burada \dot{m} (kg/s) akışkanın kütleli debisini, C_p (J/kg°C) akışkanın özgül ısısını, ΔT (°C) akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının farkını, A (m^2) kolektör alanını ve I (W/m^2) ışıma şiddetini ifade etmektedir. Güneş kolektörlerinin verimi dış ortam sıcaklığı, ışıma şiddeti ve kolektörün ortalama akışkan sıcaklığı ile değişir. Bu değişim azaltılmış sıcaklık olarak tanımlanmıştır. T^* ile ifade edilen bu değer Eşitlik (5)'te gösterilmiştir.

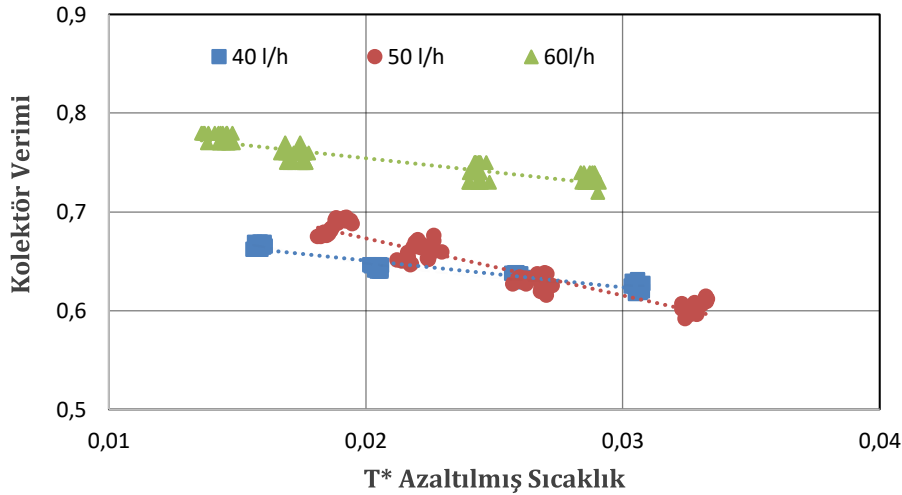
$$T^* = \frac{T_k - T_ç}{I} \quad (5)$$

Burada gösterilen T_k (°C) kolektördeki ortalama akışkan sıcaklığını T_c (°C) ise çevre sıcaklığını ifade etmektedir. Kolektördeki ortalama akışkan sıcaklığı, akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması $((T_2 + T_3)/2)$, çevre sıcaklığı ise kolektörün üst ve alt sıcaklıklarının aritmetik ortalaması olarak alınır. Çünkü güneş simülatöründe lambalar tarafından üretilen ısı bir hava perdesi tarafından ortamdan uzaklaştırılıyor olmakla birlikte, kolektörün üst ve alt tarafındaki ortam sıcaklığı aynı olmamaktadır (Özsoy ve Galip, 2018b). Bu nedenle ortam sıcaklığı olarak kolektörün üst ve alt kısımlarının sıcaklıklarının ortalamasının alınmasının daha uygun olacağı belirlenmiştir.

Düzlemsel kolektörlerin performans analizi için ışınım gelen alan belirlenirken kolektör alanı baz alınmaktadır. Vakum tüplü kolektörlerde ise ışınım gelen alanı belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunun nedeni silindirik yapıdaki vakum tüplerin kullanılmasıdır. Vakum tüplü toplayıcıların dış ortamda, güneş ışınımı altında yapılan performans testlerinde ışınlar paralel olarak gelmekte olup, kolektör absorber alanı üzerinde ısı enerjisine dönüşmektedir. Güneş simülatöründe, iç ortam şartlarında yapılan deneylerde, ışınımın geldiği kaynak kolektöre yakın mesafede olduğu ve çok sayıda ışık kaynağı (lamba) kullanıldığı için, ışınların geliş açıları farklılıklar oluşmaktadır (Özsoy ve Galip, 2018a). Bu çalışmada absorber alanı olarak kolektörün toplam alanı kullanılmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Deneyler, her ölçümden önce sistemin rejimde olması sağlanarak, 3 farklı debi ve 4 farklı kolektör giriş sıcaklığı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçümler standartlara uygun olarak dörder defa tekrarlanmıştır. Kolektör giriş sıcaklıkları 30 °C, 35 °C, 40 °C ve 45 °C olarak belirlenmiştir. Deneyler süresince çevre sıcaklığı 23-27 °C arasında değişmiştir. Kolektörde akışkan debisi, verimdeki değişimi gözlemlemek için, 40 l/h, 50 l/h ve 60 l/h olarak uygulanmıştır. Ölçümler iç ortam şartlarında, ortalama 902 W/m² ışınım şiddeti sağlanan bir güneş simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Absorber alanı olarak kolektörün toplam alanı alınmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen verilerle verim analizi yapılmış ve farklı akışkan debileri için kolektörün verim eğrileri belirlenmiştir. Akışkan debilerine göre kolektör veriminin değişimi Şekil 5'te verilmiştir.

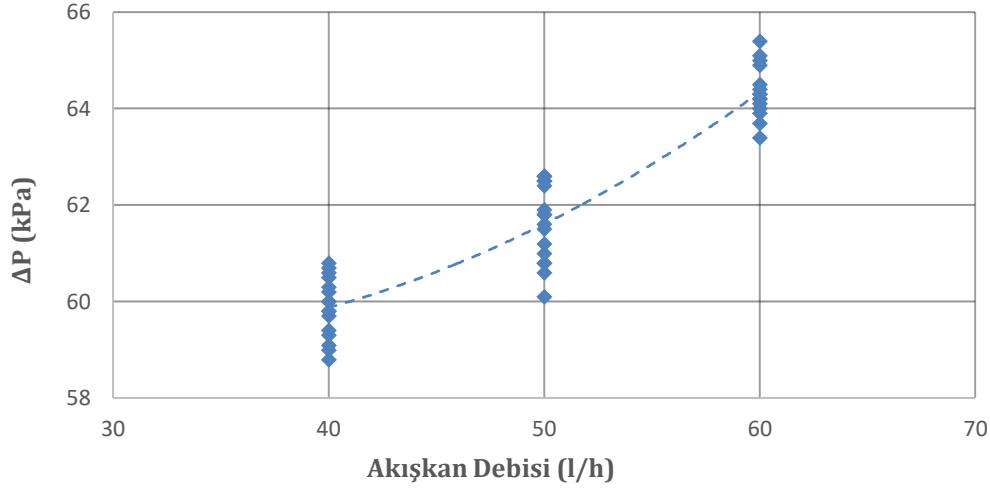


Şekil 5. Akışkan debisi değişiminin kolektör verimine etkisi (Effect of fluid flow rate change on collector efficiency)

Grafikte sabit ışınım şiddetinde, akışkan debisinin artmasıyla kolektör veriminin artışı görülebilmektedir. Bunun yanı sıra azaltılmış sıcaklığın artmasının da kolektör verimine etkisi negatiftir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada da (Nie vd., 2017), azaltılmış sıcaklık azaldıkça termal verimlerin arttığını ve büyüme hızının kademeli olarak azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca kütle akış hızının artmasının da termal verimliliği arttırdığını ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda sabit kütleli akış hızında ve %34,28'lik azaltılmış sıcaklık düşüşünde, 535 W/m² ve 735 W/m²'lik bir güneş ışınımı ile termal verimliliğin büyüme oranlarının sırasıyla %12,21 ve %7,82 olduğunu belirlemişlerdir. Yine sabit azaltılmış sıcaklıkta ve %66,67'lik kütle akış hızı artışında, 535 W/m² ve 735 W/m²'lik güneş ışınımında termal verimliliğin büyüme oranlarını sırasıyla %24,08 ve %14,42 olarak belirlemişlerdir.

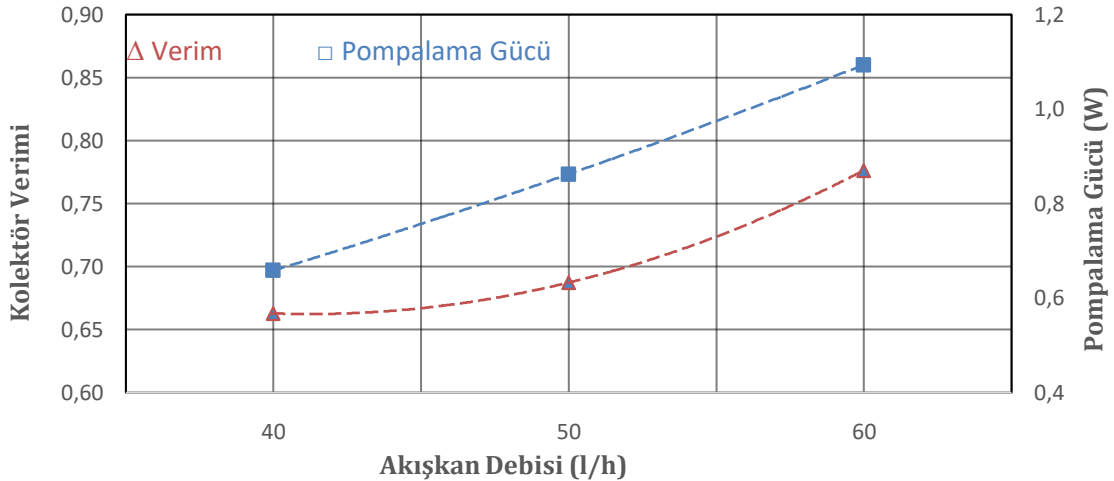
Şekil 6'da ise kolektördeki toplam basınç farkının akışkan debisine göre değişim eğrisi verilmiştir. 30 °C sabit giriş sıcaklığında üç farklı akışkan debisi ile gerçekleştirilen ölçümler neticesinde basınç farkının akışkan debisi ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar Özsoy ve Galip'in (2018a) seri bağlı 17 borudan oluşan toplam 2,4 m² alana sahip güneş kolektöründe de elde edilmiştir. Ancak Özsoy ve Galip'in çalışmasında 17 borulu kolektörde 10/9mm'lik bakır borular kullanılmıştır. Toplam 17 borudaki basınç düşümü bu çalışma için kullanılan 10 boru için karşılığı, akışkan debisine göre yaklaşık 5 kPa ile 21 kPa arasında değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan 10 borulu 8/6 mm'lik çelik borulu sistemdeki basınç düşümü ise akışkan debisine göre 59-

65 kPa arasında değişmektedir. Basınç düşümünün fazla olması, boru malzemesindeki sürtünme katsayısı yüksek (birisi bakır ve diğeri çelik boru) ve boru iç çapının da küçük olmasında (birisi 9 mm ve diğeri 6 mm) kaynaklanmaktadır. Basınç düşümüne etki eden faktörlerden birisi de sıcaklıkla akışkanın viskozitesindeki değişiktir. Sıcaklık artışı ile basınç düşümündeki azalma Bava ve Furbo'nun (2016) çalışmasında, su ve su-glikol karışımı için incelenmiştir.



Şekil 6. Kolektördeki basınç düşümünün akışkan debisi ile değişimi (Variation of pressure drop in the collector with fluid flow rate)

Şekil 7'de kolektördeki basınç düşümünden kaynaklanan pompalama gücündeki artışın akışkan debisiyle değişimi, 30 °C sabit giriş sıcaklığındaki kolektör veriminin değişimiyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Pompalama gücü ve kolektör veriminin akışkan debisiyle değişimi (Variation of pumping power and collector efficiency with fluid flow rate)

Şekilde de görüldüğü üzere pompalama gücü akışkan debisi ile artış göstermiş, kolektör veriminde ise artış debinin artmasıyla birlikte hız kazanmıştır. Kolektördeki basınç düşümü için gerekli pompalama gücü Eşitlik (6)'dan bulunur.

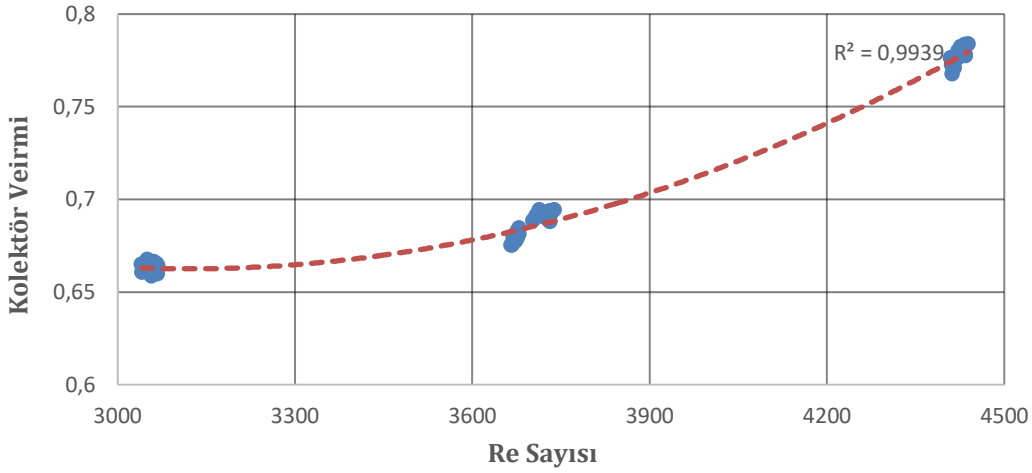
$$PG = \dot{V} \Delta P \quad (6)$$

Burada ΔP kolektör girişinden ve çıkışından ölçülen basınç değerlerinin farkını, \dot{V} (m^3/s) hacimsel debiyi ifade etmektedir.

Kolektör verimi için hata analizi, Eşitlik (7)'de verilen eşitlikten yararlanılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan cihazların Tablo 3'te verilen ölçüm hassasiyetleri kullanılmış ve kolektör verimi için maksimum hata %10,1 olarak hesaplanmıştır.

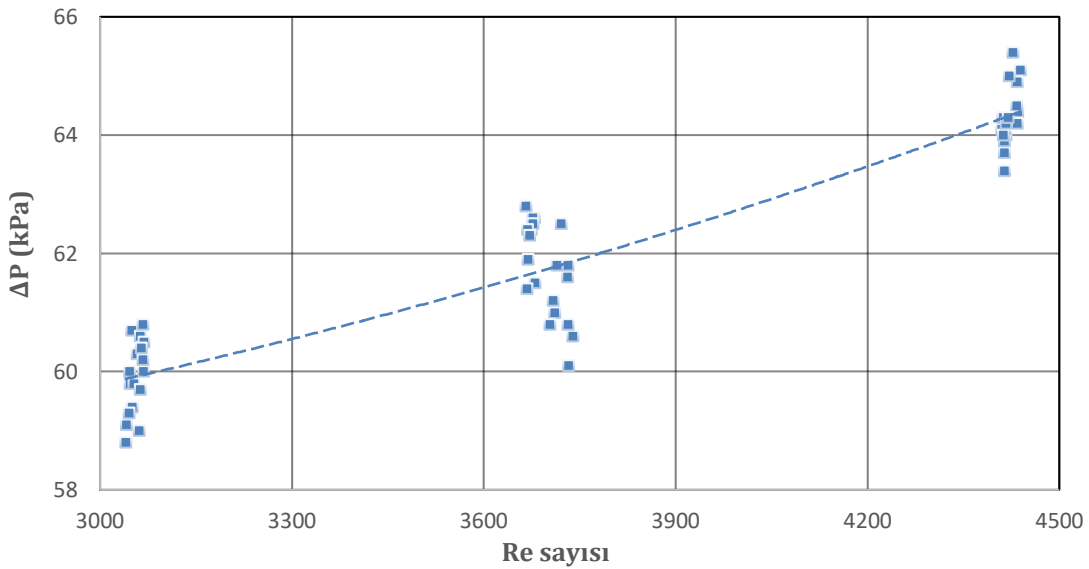
$$W_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial m} W_m\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \Delta T} W_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial I} W_I\right)^2} \quad (7)$$

Bu eşitlikte \dot{m} kütsel debiyi, ΔT kolektör giriş ve çıkış sıcaklık farkını, I ise ışınlm şiddeti ölçümlerini ifade etmektedir.



Şekil 8. Re sayısı ile kolektör veriminin değişimi (Variation of collector efficiency with Re number)

Şekil 8'de ise Re sayısının kolektör verimi üzerindeki etkisinin gösterildiği grafik verilmiştir. Grafikte boru içerisindeki akışın, geçiş rejiminden türbülanslı akış rejimine geçmesi ile kolektör veriminin artışı arasındaki ilişki incelenmiştir. Re sayısının artışı ile birlikte kolektör verimi de artmakta olup, artış türbülanslı bölgede daha fazladır. Akışın türbülanslı rejime geçtiği durumda kolektör veriminin yaklaşık %72 olduğu görülmektedir. Yine Şekil 9'da Re sayısının basınç düşümü ile ilişkisini gösteren grafik verilmiş, beklenildiği gibi Re sayısının artışı ile basınç düşümü de artmaktadır.



Şekil 9. Re sayısı ile basınç düşümünün değişimi (Variation of pressure drop with Re number)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada vakum tüplü seri bağlı U-borulu güneş kolektörünün performans analizi yapılmıştır. İç ortam testi için güneş simülatörü kullanılmış ve 902 W/m^2 ışınlm şiddeti sağlanmıştır. Akışkan olarak su kullanılan test sisteminde üç farklı akışkan debisi ve dört farklı giriş sıcaklığı ile gerçekleştirilen ölçümler neticesinde kolektör veriminin %60 ile %78 arasında değiştiği görülmüştür. Kolektördeki akışkan debisi arttıkça kolektör veriminin de arttığı gözlemlenmiştir. Sistemde kullanılan U-boru çapının küçük olması ve boruların seri bağlı olması nedeniyle sistemdeki basınç kayıplarının fazla olduğu gözlemlenmiştir. U-borulu güneş kolektörünün giriş-çıkış arası basınç düşümü 59-65 kPa arasında değişmektedir. Basınç düşümünün akışkan debisinin artması ile birlikte artış gösterdiği belirlenmiştir. Literatürdeki çoğu çalışmada kullanılan seri bağlı U-borulu vakum tüplü güneş kolektörleri ile daha yüksek sıcaklıklara çıkılması mümkün olmaktadır. Bununla birlikte sistemdeki basınç düşümünün de artması nedeniyle akışkanın sirkülasyonu için daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duyulacağını gösterir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir (No conflict of interest was declared by the authors).

Kaynaklar (References)

- Akdağ, O., Yeroğlu, C., (2019). Malatya yöresi için örnek bir güneş santrali modelinin benzetimi ve şebekeye etkilerinin incelenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 552-560.
- Bahrami M.A., Bahrami M., 2021. Modeling and thermal parametric analysis of U-pipe evacuated tube solar collector for four different climates in Iran. *Journal of Energy Engineering and Management Science and Technology*, 11 (1), 88-101.
- Bava, F., Furbo, S., 2016. A numerical model for pressure drop and flow distribution in a solar collector with U-connected absorber pipes. *Solar Energy*, 134, 264-272.
- Çengel, Y.A., Boles M.A., 2015. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8th ed. Mc. New York: McGraw-Hill.
- Dincer I, Rosen M., 2013. *Exergy: Energy, environment and sustainable development*. 2nd Ed. Oxford, UK: Elsevier Science.
- Dündar, R., 2007. Standart düz kolektörlü güneşli su ısıtma sistemleri ile vakum tüplü güneşli su ısıtma sisteminin verim ve performanslarının Karabük ili şartlarında deneysel olarak karşılaştırılarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mehmood, A., Waqas, A., Said, Z., Rahman, S.M.A., Akram, M., 2019. Performance evaluation of solar water heating system with heat pipe evacuated tubes provided with natural gas backup. *Energy Rep.* 5:1432-4.
- Nie, X., Zhao, L., Deng, S. and Lin, X., 2017. Experimental study on thermal performance of U-type evacuated glass tubular solar collector with low inlet temperature, *Solar Energy*, 150, 192-201.
- Ong, K.S., Tong, W.L. and Choong, J.K., 2013. Performance of U-tube solar water heater with vertical and inclined panels. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 0, 1-6.
- Özdemir, M.B., Yatarkalkmaz, M.M., 2015. Farklı tipteki kolektörlerin enerji, ekserji ve ekonomik analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1/2, 235-252.
- Özsoy A., Galip M., 2018a. Vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün güneş simülatoründeki test sonuçlarının analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(1): 229-236.
- Özsoy A., Galip M., 2018b. Güneş kolektörü testi için güneş simülator tasarımı ve imalatı. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 6(2), 55-62.
- Popsueva, V., Lopez, A.F.O., Kosinska, A., Nikolaev, O., Balakin, B.V., 2021. Field study on the thermal performance of vacuum tube solar collectors in the climate conditions of Western Norway, *Energies*, 14, 2745.
- Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef S., Mahian O., 2015. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1038-1054.
- Saydam, D.B., Çeçi, K.N., ve Hürdoğan, E., (2021). V tipi havalı bir güneş kolektörünün ısıl performansının deneysel olarak incelenmesi ve yapay sinir ağları ile modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1212- 1223.
- Siuta-Olcha, A., Cholewa, T. and Dopieralska-Howoruszko, K., 2021. Experimental studies of thermal performance of an evacuated tube heat pipe solar collector in Polish climatic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28:14319-14328.
- Sunmax, <http://www.sunmax.com.tr/index.php?t=urd&u=1&uk=9&i=11> (Erişim tarihi: 8.11.2021)
- TS EN ISO 9806, 2014. Güneş enerjisi- Güneş kolektörleri- Deney metotları.
- TS EN 12975-2, 2008. Isıl güneş enerji sistemleri ve bileşenleri-Güneş enerjisi kolektörleri-Bölüm 2: Deney metotları.
- Zambolin, E. and Col, D. D., 2010. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84, 1382-1396.



TOPRAK DAĞITIMINDA OLUŞABİLECEK GİRİŞİM DURUMUNUN ÖNLENMESİ İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Ziya ÇAKICI^{1*}, Mehmet Sinan YILDIRIM²

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

Keywords

*Küteller Diyagramı,
Genel Yöntem,
Girişim,
Optimum Taşıma Mesafesi,
Optimizasyon.*

Öz

Karayolu ve demiryolu projeleri gibi ulaştırma projelerinde toprak işleri, proje maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu tür projelerde, genel olarak, yarma, dolgu ve taşıma işlemlerinin (toprak dağıtımının) en ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ulaştırma mühendisliğinde, bu amacı gerçekleştirmek için kullanılan farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de Genel toprak dağıtım yöntemidir. Bu çalışmada, Genel toprak dağıtım yönteminde özel bir durum teşkil eden "girişim" oluşumu ele alınmıştır. Bu bağlamda, ardışık bir tepe ve bir vadiden veya bir vadi ve bir tepeden oluşan küteller diyagramında, girişim oluşması durumunda, en uygun taşıma mesafelerinin yeniden belirlenmesi ve girişimin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, girişim durumunun gözlemlendiği üç farklı örnek için en uygun taşıma mesafeleri küteller diyagramına ait matematiksel, geometrik ve trigonometrik veriler göz önünde bulundurularak Diferansiyel Gelişim Algoritması ile yeniden belirlenmiştir. Sonuç olarak, optimizasyon tabanlı çözüm yaklaşımı ile oldukça başarılı sonuçlar elde edilebileceği ve girişim durumunun önlenebileceği görülmüştür.

AN OPTIMIZATION-BASED SOLUTION APPROACH FOR THE PREVENTION OF OVERLAPPING THAT MAY OCCUR IN EARTH DISTRIBUTION

Keywords

*Mass Diagram,
General Method,
Overlapping,
Optimum Hauling Distance,
Optimization.*

Abstract

Earthworks for transportation projects such as highway and railway projects constitute a significant part of the project cost. For this reason, in these types of projects, it is aimed to carry out cutting-filling and hauling (earth distribution) in the most economical way. In transportation engineering, different methods are applied to achieve this goal. One of the these methods is, also, general earth distribution method. In this study, "overlapping" formation, which expresses a special situation for the general earth distribution method, is discussed. In this context, firstly, mass diagram consisting of the successive hills and valleys, or the successive valleys and hills is considered. Then, in the case of overlapping, it is aimed to re-determine optimum hauling distance and eliminate the overlapping. Within the scope of the study, optimum hauling distances for three different samples in which overlapping is observed is re-determined by using Differentiatial Evolution Algorithm, taking into account mathematical, geometric and trigonometric data related to mass diagram. As a result, it is seen that quite successful results are obtained and overlapping can be prevented with optimization-based solution approach.

Alıntı / Cite

Çakıcı, Z., Yıldırım, M. S., (2022). Toprak Dağıtımında Oluşabilecek Girişim Durumunun Önlenmesi için Optimizasyon Tabanlı Çözüm Yaklaşımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1455-1473.

* İlgili yazar / Corresponding author: ziya.cakici@idu.edu.tr, +90-232-260-1001

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Z. Çakıcı, 0000-0001-7003-815X	Başvuru Tarihi / Submission Date	19.05.2022
M. S. Yıldırım, 0000-0001-5347-2456	Revizyon Tarihi / Revision Date	15.08.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	02.09.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Yer yüzeyinin doğal yapısının düzgün olmaması nedeniyle özellikle karayolları ve demiryolları gibi mühendislik yapıları tasarlanırken yapının temas edeceği yüzeyin düzgün bir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu işlem, doğal yüzeyin fazlalık oluşturan bölümleri yok edilerek (kazı-yarma) ve/veya yapının temas yüzeyinin altında kalacak olan bölümler doldurularak (dolgu) iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Yarma işlemi sonucunda elde edilen malzemenin uygun bir yere götürülmesi ve dolgu malzemesinin, dolgu yapılacak bölgeye getirilmesi "taşımaya" işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, "yarma", "dolgu" ve "taşımaya" işlemlerinin arazideki toprak işinin önemli bileşenleri olduğunu söylemek mümkündür. Genellikle özellikli iş makineleri kullanılarak yapılan toprak işleri zaman kaybının yanı sıra yüksek maliyetleri (yakıt, taşıt işletme, operatör, yıpranma payı giderleri vb.) de beraberinde getirmektedir (Evren, 2001). Bu nedenle, maliyet faktörü göz önünde bulundurulduğunda, karayolu ve demiryolu projelerinde, kırmızı çizgi çizilirken boykesit üzerindeki yarma ve dolgu alanlarının mümkün olduğu kadar birbirini dengeler durumda olması büyük bir önem arz etmektedir (Şahinkaya, 2013).

Karayolu ve demiryolu projelerinde, kırmızı çizginin belirlenmesinin ardından, öncelikli olarak, belirli aralıklarla alınan en kesitlere ait alanlar tespit edilmektedir. Daha sonra, zemine (malzemeye) ait sıkışma-kabarma faktörleri dikkate alınarak enkesitler arasındaki yarma ve dolgu hacimleri hesaplanmaktadır (Seçkin, 2003; Göktepe vd., 2008; Banks, 2010; Bakır, 2017). Üçüncü aşamada, enkesitler arasındaki hacimler eklenik olarak toplanarak, zemin kütlelerinin dağıtımında kullanılacak olan "Kütleler Diyagramı"nın çizimi gerçekleştirilmektedir (Seçkin, 2003). Kütleler diyagramı, temel olarak, en uygun taşıma mesafesi stratejilerinin belirlenmesinde ve toprak işi maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Diyagram çizilirken, yarma pozitif (karşılaştırma çizgisi üstü), dolgu ise negatif (karşılaştırma çizgisi altı) olarak dikkate alınmaktadır. Diyagramda, yatay eksen, enkesitlerin başlangıç noktasına olan mesafelerini, düşey eksen ise eklenik hacimleri ifade etmektedir. Diyagramın yükselen parçasının, özel bir bölümde dolgu üzerindeki yarma fazlasını; diyagramın alçalan parçasının ise özel bir bölümde yarma üzerindeki dolgu fazlasını belirttiği söylenebilir (Ögüt, 2005). Kütleler diyagramı ile hacimlerin kümülatif toplamı verildiği için, dolgunun yarmaya eşit olduğu hacim bölümleri de kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Kütleler diyagramının çizilmesinin ardından, yarma, dolgu ve taşıma işlemlerinin en ekonomik şekilde nasıl gerçekleştirilebileceği, "toprak dağıtımı" başlığı altında incelenebilir (Evren, 2001). Literatürde, toprak dağıtımı işlemlerinin, genel olarak, "Genel Yöntem" ve/veya "Brückner Yöntemi" ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Genel Yöntem ve Brückner Yöntemi'nin en temel farkı, Genel Yöntem'de eldeki mevcut taşıma araçları göz önünde bulundurularak bir optimum taşıma mesafesinin belirlenmesidir (Erselcan, 1994). Bu çalışmada, toprak dağıtımı için kullanılan Genel Yöntem'de özel bir durum teşkil eden "girişim" oluşumu ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, ardışık bir tepe ve bir vadiden veya bir vadi ve bir tepeden oluşan kütleler diyagramında, girişim oluşması durumunda, en uygun taşıma mesafelerinin yeniden belirlenmesi ve girişimin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

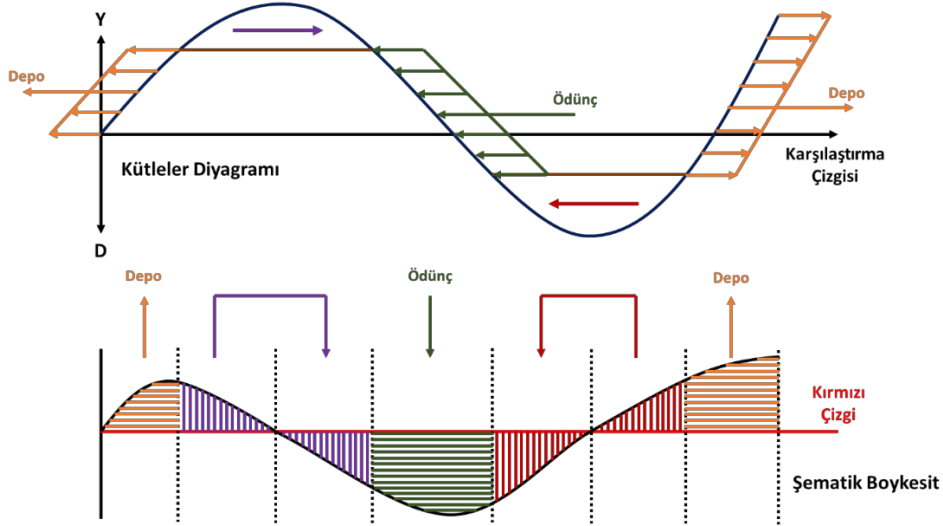
Çalışmanın ikinci bölümünde Genel Toprak Dağıtım Yöntemi ve girişim durumu ile ilgili çeşitli bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, en uygun taşıma mesafelerinin belirlenmesinde çözüm aracı olarak kullanılan Diferansiyel Gelişim Algoritması detaylı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, analiz çalışmaları için seçilen üç farklı örnek ve bu örneklerle ilişkin açıklamalar sunulmuştur. Beşinci bölümde, çalışma kapsamında yapılan analizlere yer verilmiş ve sonuçlar tablo ve şekiller kullanılarak özetlenmiştir. Son bölümde ise, analiz sonuçlarından elde edilen bulguların genel bir değerlendirmesi ve yorumlanması yapılmıştır.

2. Genel Yöntem ve Girişim Durumu (General Earth Distribution Method and Overlapping)

Bu bölümde, genel yöntem ile ilgili detaylara girilmeden önce toprak dağıtımında sıklıkla karşılaşılan "Depo" ve "Ödünç" kavramları açıklanmalıdır. Depo, kazılan zeminin dolgu için kullanılmaması veya kullanılsa bile fazla olması nedeniyle elde kalması durumunda belirlenen bir yere gönderilmesidir. Ödünç ise, dolgunun kazılan zeminle karşılanamaması veya karşılanırsa bile eksik kalmasından dolayı zeminin, dışarıda belirlenen bir yerden kazılarak getirilmesidir (Banks, 2010). Tanımlamalardan da anlaşılacağı üzere, toprak işlerinde; yarmalardan çıkan malzeme gerekli nitelikleri taşıyor ise dolgu kesimlerine, taşıyor ise depoya gönderilmektedir. Dolgu kesimleri için gerekli olan malzeme ise yarma kesimlerinden (zeminin nitelikleri göz önünde bulundurularak) ya da ödünçten temin edilmektedir (Seçkin, 2003). 1 m^3 zeminin depo edilmesi maliyeti depo maliyeti (M_d); 1 m^3 zeminin ödünç yerinden getirilmesi maliyeti de ödünç maliyeti ($M_ö$) olarak adlandırılmaktadır. Depo maliyeti, depo yapılacak yer için kiralama veya mülkiyet bedeli ile zeminin depo yerine taşınma maliyetini içermektedir.

Ödünç maliyeti ise ödünç yeri için kiralama veya mülkiyet bedeli, zeminin belirlenen yerden kazılma maliyeti ve zeminin taşınma maliyeti olmak üzere 3 farklı kalemden oluşmaktadır (Şahinkaya, 2013).

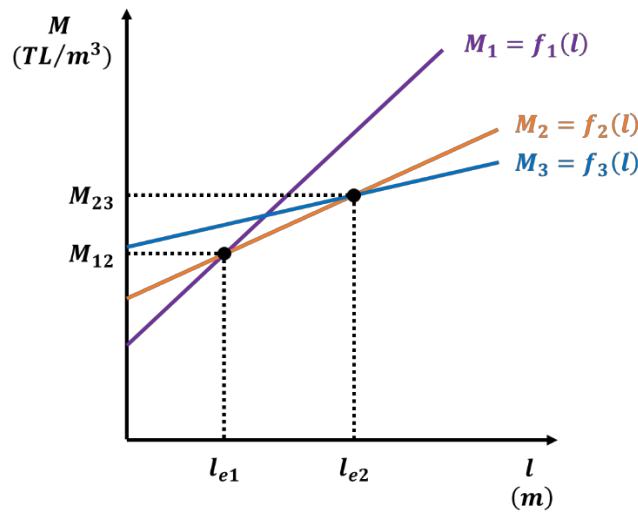
Ardışık bir tepe ve bir vadiden oluşan kütleler diyagramındaki taşıma, depo ve ödünç işlemleri ile bu işlemlerin şematik boykesit üzerindeki gösterimleri Şekil 1’ de sunulmaktadır.



Şekil 1. Örnek Bir Kütleler Diyagramı ve Şematik Boykesit (A Sample Mass Diagram and Schematic Cross-Section)

Şekil 1’ den de görüldüğü üzere, kütleler diyagramındaki tepe ve vadinin en uç noktalarında sırasıyla yarmadan dolguya ve dolgudan yarmaya geçiş durumu söz konusudur. Ayrıca, karşılaştırma çizgisine paralel olarak çizilebilecek her bir çizgi, oluşan kapalı alanlarda dolgu ve yarma hacminin dengelendiğini belirtmektedir. Şekil 1’ den, karşılaştırma çizgisine paralel onlarca çizgi çizilebileceği anlaşılabilir. Bu durumda hedef, en uygun (en ekonomik) dağıtım sağlayan çizgi lokasyonlarının belirlenmesi olmalıdır. En ekonomik toprak dağıtımının (dengelemesinin) gerçekleştirilmesi hedeflenen Genel Yöntemde, taşıma birim maliyetinin uzaklıkla doğru orantılı olarak değiştiği ve depo ve ödünç maliyetlerinin sabit olduğu kabul edilmektedir (Erselcan, 1994; Seçkin, 2003).

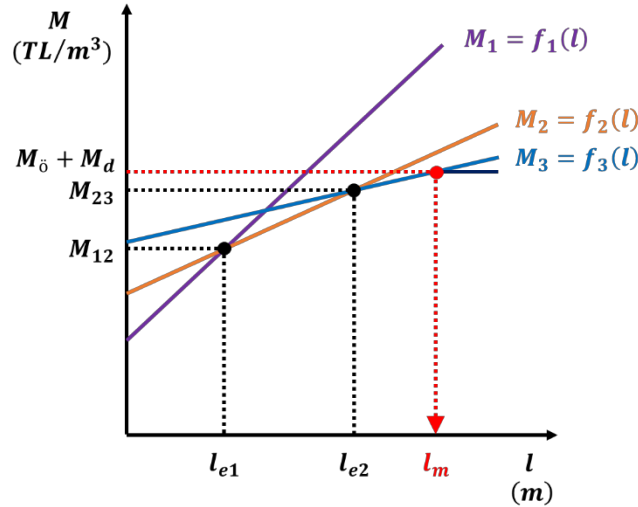
Kütleler diyagramında, kapalı alanlar oluşturularak iç dengeleme yapılmasında boyuna taşıma işlemi büyük bir önem arz etmektedir. Bu işlem, şantiye alanındaki mevcut iş makineleri (Dozer, skrayper, ekskavatör-kamyon vb.) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şantiyede boyuna taşıma yapabilecek 3 farklı iş makinesi olduğu ve bu makinelerin 1m^3 zemin taşıma maliyet fonksiyonlarının sırasıyla $M_1=f_1(l)$, $M_2=f_2(l)$, $M_3=f_3(l)$ olarak belirlendiği varsayıldığında, taşıma uzunluğuna bağlı maliyet grafiği Şekil 2’ deki gibi gösterilebilmektedir.



Şekil 2. Taşıma Uzunluğuna bağlı Maliyet Grafiği (Hauling Distance-based Cost Graph)

Şekil 2’ de l_{e1} ; 1 ve 2 numaralı taşıtlar için taşıma sınır değerini, l_{e2} ise 2 ve 3 numaralı taşıtlar için taşıma sınır değerini göstermektedir. M_{12} ve M_{23} ise l_{e1} ve l_{e2} ’ ye ait taşıma maliyeti değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda; taşıma işlemi yapılırken, $0-l_{e1}$ arasında 1 numaralı taşıtın, $l_{e1}-l_{e2}$ arasında 2 numaralı taşıtın, l_{e2} ’ den daha uzun mesafelerde ise 3 numaralı taşıtın etkin ve ekonomik bir şekilde kullanılabilirliği söylenebilir.

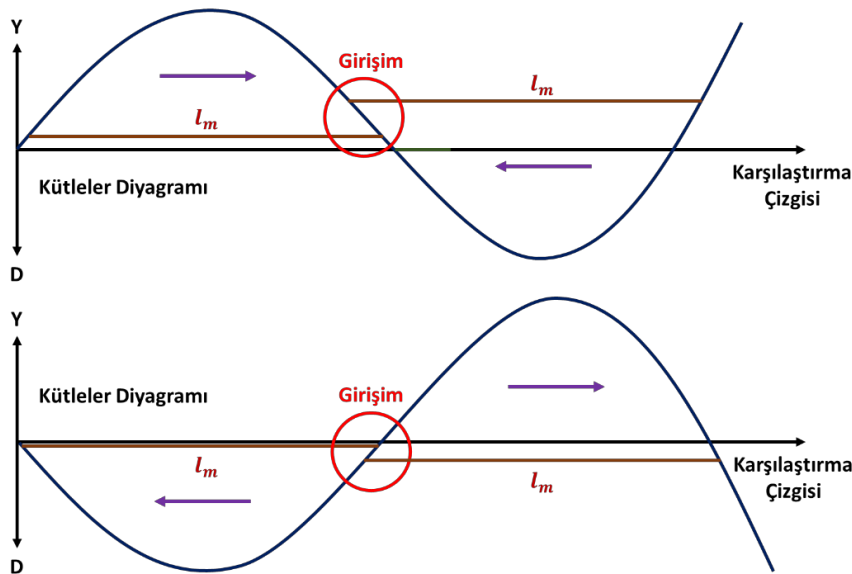
Daha önce de belirtildiği üzere Genel yöntem ile toprak dağıtımında hedef; kütleler diyagramının tepe ve vadi kesimlerinde kapalı alan oluşturmak için çizilen sonsuz sayıda dağıtım çizgisinden en ekonomik zemin dağıtımını yani dengelemeyi sağlayacak çizgiyi belirlemektir (Seçkin, 2003). Bu çizgi, optimum taşıma mesafesi olarak isimlendirilmekte ve (l_m) ile gösterilmektedir. l_m , 1 m^3 zemin için depo ve ödünç maliyetleri toplamına ($M_{\bar{o}}+M_d$) karşılık gelen uzunluktur. l_m ' nin Taşıma Uzunluğuna bağlı Maliyet Grafiği üzerindeki sembolik gösterimi Şekil 3' de sunulmaktadır.



Şekil 3. Taşıma Uzunluğuna bağlı Maliyet Grafiği Üzerinde l_m ' nin Sembolik Gösterimi (Symbolic Projection of l_m on Hauling Distance-based Cost Graph)

Şekil 3 dikkatle incelendiğinde, l_m ' den daha uzun mesafelerde, taşıma işlemi yerine depo ve/veya ödünç'e başvurulmasının daha ekonomik olacağı anlaşılabilmektedir. l_m ' nin belirlenmesinin ardından, bu uzunluğa karşılık gelen çizgiler kütleler diyagramı üzerindeki tepe ve vadilere yerleştirilmekte ve böylece en ekonomik toprak dağıtımı gerçekleştirilmiş olmaktadır.

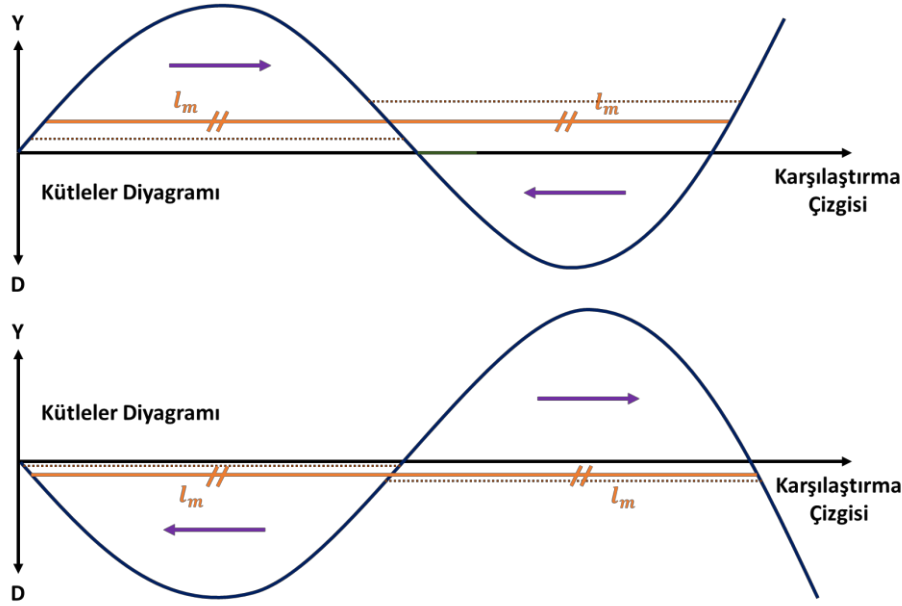
Genel Yöntem ile toprak dağıtımında bazı durumlarda, l_m uzunluğundaki çizgiler, kütleler diyagramı üzerinde tepe ve vadi kesimlerine yerleştirilirken, bir çizginin başlangıcı ile diğer çizginin bitişi veya bir çizginin bitişi ile diğer çizginin başlangıcı Şekil 4' de de görüldüğü gibi birbirini üzerine denk gelebilmektedir. Bu olumsuzluğa "Girişim" adı verilmektedir (Evren, 2001; Seçkin, 2003).



Şekil 4. Kütleler Diyagramında Girişim Meydana Gelmesi Durumu (Overlapping Occurrences on Mass Diagrams)

Girişim durumunda, bu durumun meydana geldiği bölgede iki farklı şekilde ve yönde (hem soldan sağa hem sağdan sola) taşıma yapıldığı anlaşılmasına rağmen, bunun teorik olarak mümkün olmadığı açıktır. Şekil 4' den, üstteki örnekte, girişimin meydana geldiği bölgeye aynı hacimde iki defa dolgu yapılacağı, alttaki örnekte ise girişimin meydana geldiği bölgeden aynı hacimde iki defa yarma yapılacağı anlaşılmaktadır. Fakat böyle bir durum gerçekte

mümkün değildir. Gerçek hayatta karşılığı olmayan bu durumu ortadan kaldırmak için, iki l_m çizgisi arasında tepe ve vadide uzunlukları eşit olacak şekilde yeni bir l_m çizgisi çizilmelidir. Birbirine eşit uzunlukta çizilen bu yeni çizgiler en ekonomik (optimum) dağıtım çizgileri olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4' deki örnekler için, girişim durumunun ortadan kaldırılması sonucunda elde edilen kütleler diyagramları Şekil 5' de gösterilmektedir.



Şekil 5. Girişimin Ortadan Kaldırılması Sonucunda Elde Edilen Kütleler Diyagramları (Mass Diagrams Obtained As a Result of the Elimination of Overlapping)

3. Diferansiyel Gelişim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)

Özellikle sürekli verilerin söz konusu olduğu optimizasyon problemlerinde etkin sonuçlar sağlayabilen ve işleyiş-operatörleri itibarıyla Genetik Algoritma'yı andıran Diferansiyel Gelişim Algoritması, 1995 yılında R. M. Storn ve K. Price tarafından geliştirilen evrim tabanlı bir algoritmadır (Storn ve Price, 1997; Khan vd., 2014). Basit, hızlı, kolay uygulanabilir ve güçlü olmasından dolayı, birçok mühendislik probleminin çözümünde tercih edilmektedir (Elci ve Ayvaz, 2014; Kamal ve Inel, 2019). Diferansiyel Gelişim Algoritması'nda da, öncelikli olarak, Genetik Algoritma'da olduğu gibi bir başlangıç popülasyonu oluşturulmaktadır. Daha sonra, mutasyon, çaprazlama ve seçim işlemleri uygulanarak, iterasyonlar boyunca probleme ait en iyi değer elde edilmesi amaçlanmaktadır (Baskan, 2019). Diferansiyel Gelişim Algoritması'nda, belirtilen operatörler, Genetik Algoritma'dan farklı olarak, popülasyondaki tüm bireylere sırasıyla uygulanmamaktadır (Tan vd., 2020). Popülasyondaki her bir birey, popülasyon içerisinde rastgele seçilen 3 farklı bireyden mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılarak elde edilen yeni bir birey ile karşılaştırılmakta ve amaç fonksiyonu değeri bazında uygunluğu daha iyi olan birey seçim operatörü gerçekleştirilerek bir sonraki jenerasyona (iterasyona) aktarılmaktadır (Liu vd., 2010; Çakıcı, 2020).

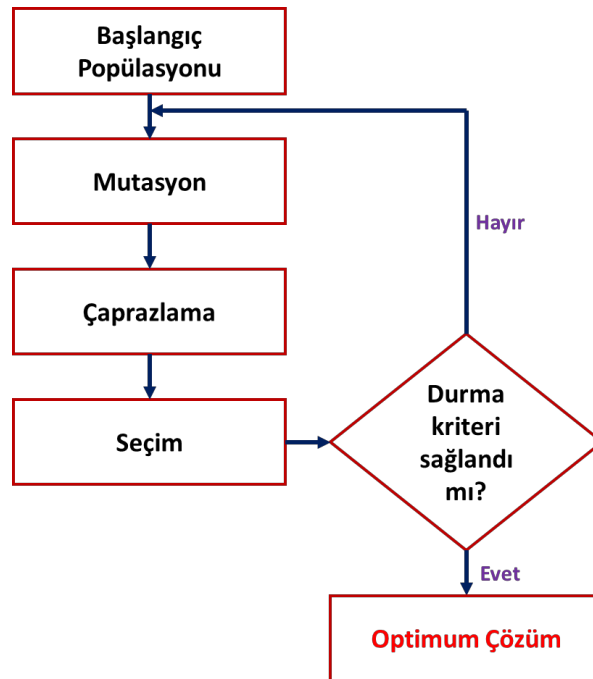
Diferansiyel Gelişim Algoritması'nda işlem adımları şu şekildedir:

- 1) Kontrol parametrelerinin belirlenmesi: Algoritmada 4 farklı parametrenin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler; popülasyon boyutu (NP), mutasyon faktörü (F), çaprazlama oranı (CR) ve maksimum iterasyon sayısı (G_{maks})'dır. Literatürde, genel olarak; popülasyon boyutu için 20 ile 50, mutasyon faktörü için 0 ile 2, çaprazlama oranı için 0 ile 1 aralığında değerler önerilmektedir (Karaboğa, 2014). Maksimum iterasyon sayısı ise problemin zorluk derecesine göre şekillenmekte olup kullanıcıya bırakılmaktadır.
- 2) Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Başlangıç popülasyonu NP sayıda çözüm vektöründen oluşmakta ve her bir çözüm vektörü kromozom olarak adlandırılmaktadır. Kromozomlar da genlerden (karar değişkenlerinden) oluşmaktadır. Başlangıç popülasyonunda, karar değişkenlerinin her biri, değişkenlere ait alt ve üst limit değerleri göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Başlangıç popülasyonunun oluşturulmasının ardından, mutasyon-çaprazlama ve seçim işlemleri G_{maks} defa uygulanmaktadır. Son iterasyonda elde edilen en iyi çözüm, problemin çözümü'dür.
- 3) Mutasyon işlemi: Mutasyon operatörü, algoritmayı geliştiren ve daha güçlü hale getiren operatördür. Söz konusu operatör ile mevcut kromozom üzerinde rastgele değişiklikler yapılarak, mevcut vektörde doğru zamanlı, doğru miktarlı ve doğru yönlü artışlar gerçekleştirilmektedir (Karaboğa, 2014). Mutasyon işlemi

gerçekleştirilirken, öncelikli olarak, mevcut kromozom haricinde birbirinden farklı 3 kromozom seçilmektedir. Daha sonra, seçilen ilk kromozomdan ikinci kromozom çıkarılarak elde edilen fark kromozomu ölçekleme faktörü ile çarpılmaktadır. Üçüncü aşamada, ölçekleme faktörü ile çarpılan fark kromozomu üçüncü kromozom ile toplanmakta ve çaprazlama işleminde kullanılacak olan yeni vektör elde edilmektedir (Keskintürk, 2006).

- 4) Çaprazlama işlemi: Çaprazlama işlemi gerçekleştirilirken, öncelikli olarak, mevcut çözüm vektörü ve mutasyon sonucunda elde edilen vektör kullanılarak bir sonraki jenerasyona aday deneme vektörü oluşturulmaktadır. Deneme kromozomuna ait her bir gen, CR olasılıkla mutasyon ile elde edilen vektörden, $(1 - CR)$ olasılıkla ise mevcut çözüm vektöründen seçilmektedir. Çaprazlama işleminde, en az bir değişkenin (genin) de mutasyon sonucunda oluşturulan vektörden seçilmesi garanti edilmektedir. Böylece, yeni çözüm vektörünün, mevcut vektörden farklılaştırılması sağlanmaktadır (Çakıcı, 2020).
- 5) Değerlendirme: Bu aşamada, yeni çözüm vektöründeki tüm değişkenler, amaç fonksiyonundaki ilgili yerlere yerleştirilmekte ve fonksiyonun değeri (uygunluk değeri) hesaplanmaktadır.
- 6) Seçim işlemi: Seçim aşamasında, yeni çözüm vektörünün uygunluk değeri mevcut vektörün uygunluk değeri ile karşılaştırılmaktadır. Mevcut vektörün uygunluk değerinin daha iyi olması durumunda mevcut vektör bir jenerasyon daha popülasyonda kalmaktadır. Yeni çözüm vektörünün uygunluk değerinin daha iyi olması durumunda ise yeni çözüm vektörü bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır.
- 7) Algoritmanın durdurulması: Diferansiyel Gelişim Algoritması'nda iteratif mutasyon, çaprazlama ve seçim işlemlerinin toplam tekrar sayısı G_{maks} 'a ulaştığında algoritma durdurulmaktadır. Ayrıca, algoritma, en kötü ve en iyi uygunluk değerleri arasındaki farkın çok küçük (10^{-5} ve 10^{-6} gibi) bir değere ulaşması durumunda da durdurulabilir (Ali ve Törn, 2004). Bu durumda, durdurma işlemi için seçilen değer, kullanıcıya bağlı olarak değişmekte olup problemde problemde farklılık gösterebilmektedir.
- 8) Problemin sonlandırılması: Durdurma işleminin gerçekleştirilmesinin ardından popülasyon içerisinde uygunluğu en iyi olan birey belirlenmektedir. Sonuç çözüm vektörü olarak adlandırılan bu bireydeki genlere ait sayısal değerler de, mevcut optimizasyon problemi için değişkenlerin optimum (yaklaşık optimum) değerlerini belirtmektedir.

Diferansiyel Gelişim Algoritması akış diyagramı Şekil 6' da gösterilmektedir (Li vd., 2016; Sriboonchandr vd., 2019).



Şekil 6. Diferansiyel Gelişim Algoritması Akış Diyagramı (The Flow Chart of Differential Evolution Algorithm)

4. Örnek Durumlar (Sample Cases)

Çalışmanın bu bölümünde, analizler için kullanılan üç farklı örnek detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Tüm örnekler için kütleler diyagramları, taşıma işlemlerinde kullanılan araçların mesafeye bağlı taşıma maliyetleri, depo ve ödünç için birim maliyetler ayrı ayrı ele alınmaktadır.

- **Örnek 1:** Analizlerde kullanılacak olan Örnek 1 için kütleler diyagramı Şekil 7' de gösterilmektedir.



Şekil 7. Örnek 1 için Kütleler Diyagramı (Mass Diagram for Sample 1)

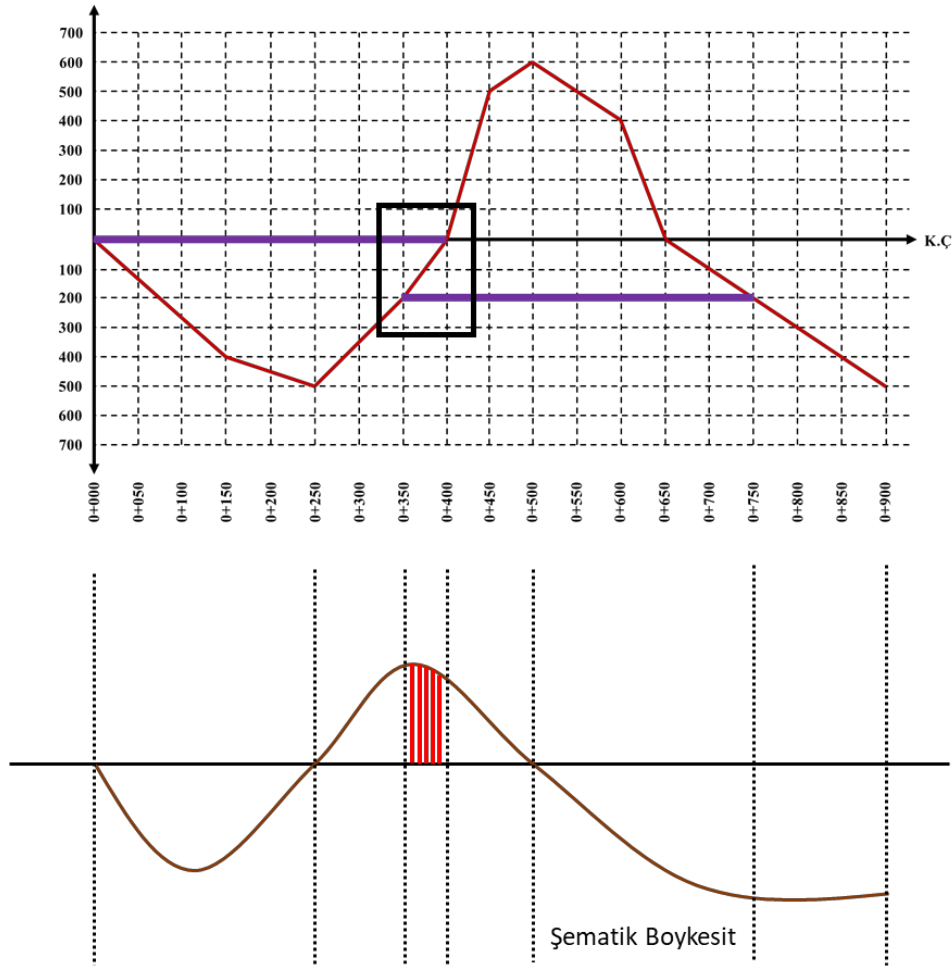
Şekil 7' den görüldüğü üzere, Örnek 1 için göz önünde bulundurulmuş kütleler diyagramı ardışık bir vadi ve bir tepeden oluşmaktadır. Bu durumda, girişimin söz konusu vadi ve tepe bölümleri arasında gerçekleştirilebileceği söylenebilir. Örnek 1 için, araçların taşıma mesafesine bağlı olarak taşıma maliyetleri ile depo ve ödünç maliyetleri Tablo 1' de sunulmaktadır.

Tablo 1. Örnek 1 için Maliyetler (Costs for Sample 1)

T ₁ aracı için	$M_1 = 5 \times 10^{-3} \times (150 + 1,5 \times L)$
T ₂ aracı için	$M_2 = 5 \times 10^{-3} \times (200 + L)$
Depo maliyeti	$M_o = 1,80 \text{ TL/m}^3$
Ödünç maliyeti	$M_d = 1,20 \text{ TL/m}^3$

Tablo 1' de verilen veriler ışığında, öncelikli olarak T₁ ve T₂ araçlarının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için mesafeler hesaplanmalıdır. T₁ ve T₂ araçları için uygun taşıma mesafesinin sınır değeri (l_{e1}), her iki araç için taşıma maliyetleri birbirlerine eşitlenerek elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, optimum taşıma mesafesinin belirlenmesi için de T₁ ve T₂ araçlarının mesafeye bağlı taşıma maliyetleri ayrı ayrı ödünç ve depo birim maliyetlerinin toplamına eşitlenmektedir. Yapılan eşitlemelerin ardından elde edilen L₁ ve L₂ değerlerinden büyük olanı optimum taşıma mesafesi (l_m) olarak belirtilmektedir (Evren, 2001). Bu bilgilerden yola çıkarak, Örnek 1 için, T₁ aracının 100 metre ($l_{e1}=100 \text{ m.}$), T₂ aracının ise 400 metre ($l_m=400 \text{ m.}$) mesafeye kadar etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar önünde bulundurularak, Örnek 1 için optimum taşıma mesafesinin 400 metre olduğu ($l_m=400 \text{ m.}$) söylenebilir.

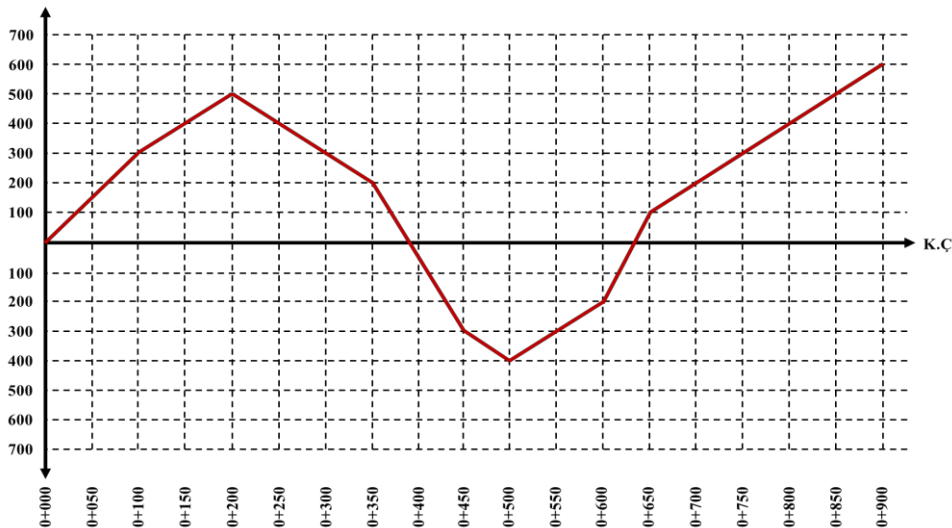
Optimum taşıma mesafesinin belirlenmesinin ardından optimum taşıma mesafesini temsil eden çizgi, tepe ve vadilerde kapalı alan oluşturulacak şekilde (birinci dereceden toprak dağıtımı) kütleler diyagramı üzerine yerleştirilmektedir. Böylece birbirleri ile dengelenecek olan hacimler, diyagram üzerinde net bir şekilde görülebilmektedir. Örnek 1 için, optimum taşıma mesafesinin kütleler diyagramı üzerindeki gösterimi ve şematik boykesit Şekil 8' de sunulmaktadır.



Şekil 8. Örnek 1 için Optimum Taşıma Mesafesinin Gösterimi ve Şematik Boykesit (Projection of Optimum Hauling Distance and Schematic Cross-Section for Sample 1)

Şekil 8’ den görüldüğü üzere, siyah kutu içerisinde gösterilen bölümde optimum taşıma mesafesi çizgileri birbirleri üzerine denk gelmekte ve “girişim” oluşmaktadır. Bu durumda, şematik boykesitte kırmızı ile taranan bölgeden soldan sağa doğru ve sağdan sola doğru iki defa taşıma yapıldığı anlaşılabilir. Bu durum fiziksel olarak mümkün değildir. Bu yüzden, Örnek 1 için, tepe ve vadi kısmındaki taşıma mesafelerinin birbirine eşit olduğu yeni bir optimum taşıma mesafesi belirlenmesi gerekmektedir.

- **Örnek 2:** Analizlerde kullanılacak olan Örnek 2’ ye ait kütleler diyagramı, birbiri ardına gelen bir tepe ve bir vadiden oluşmaktadır. Örnek 2 için kütleler diyagramı Şekil 9’ da gösterilmektedir.



Şekil 9. Örnek 2 için Kütleler Diyagramı (Mass Diagram for Sample 2)

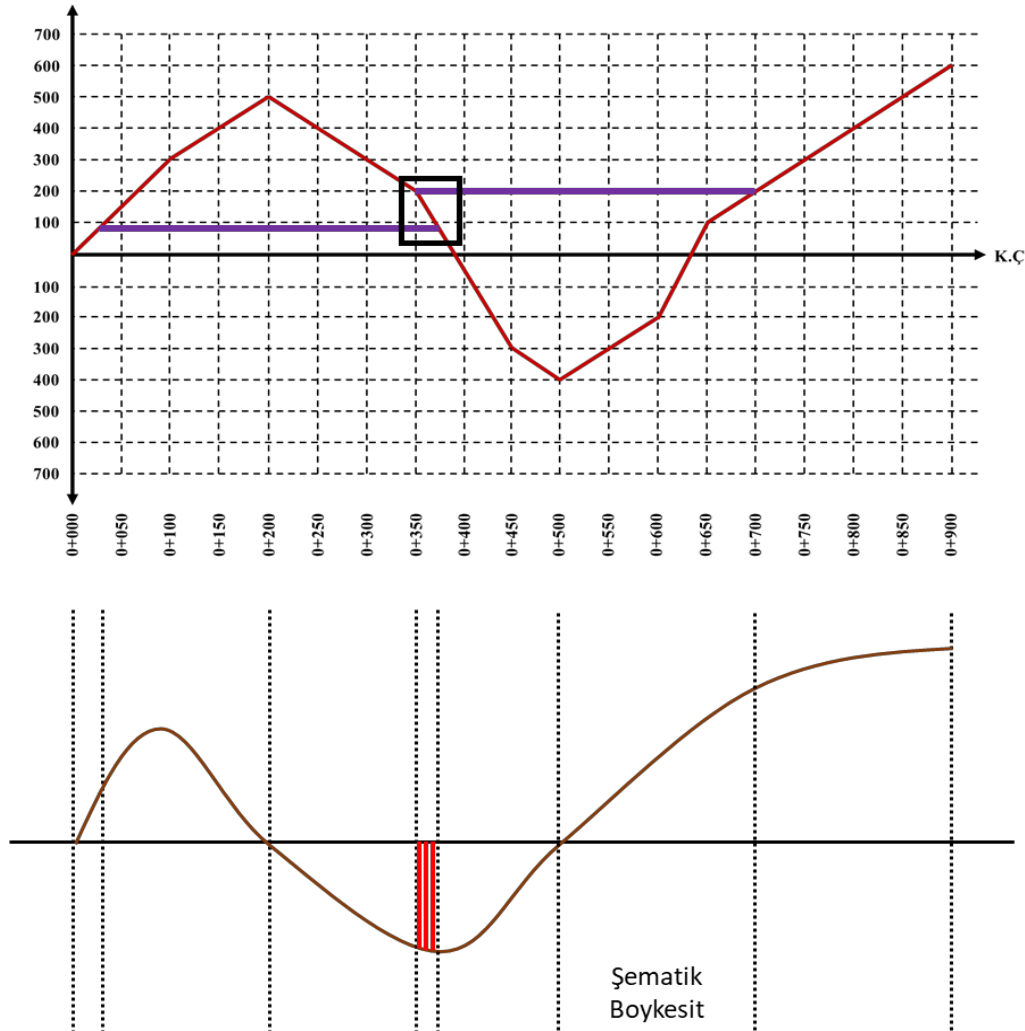
Şekil 9' dan görüldüğü üzere, tepe ve vadi kısımları arasında girişim gerçekleşebileceği söylenebilir. Örnek 2 için, araçların taşıma mesafesine bağlı olarak taşıma maliyetleri ile depo ve ödünç maliyetleri Tablo 2' de sunulmaktadır.

Tablo 2. Örnek 2 için Maliyetler (Costs for Sample 2)

T ₁ aracı için	$M_1 = 5 \times 10^{-3} \times (100 + 1,5 \times L)$
T ₂ aracı için	$M_2 = 5 \times 10^{-3} \times (150 + L)$
Depo maliyeti	$M_0 = 1,50 \text{ TL/m}^3$
Ödünç maliyeti	$M_d = 1,00 \text{ TL/m}^3$

Örnek 2 için de, Örnek 1' de yapılan işlemler takip edilerek T₁ ve T₂ araçları için uygun taşıma mesafesinin sınır değeri (l_{e1}) 100 metre olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, yeniden Örnek 1' deki işlem adımları takip edilerek, optimum taşıma mesafesi (l_m) 350 metre olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, taşıma işlemi için, T₂ aracının da 350 metre mesafeye kadar etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilceği söylenebilir. Elde edilen sonuçlar ışığında, Örnek 2 için optimum taşıma mesafesinin 350 metre ($l_m=350 \text{ m.}$) olduğu anlaşılabilir.

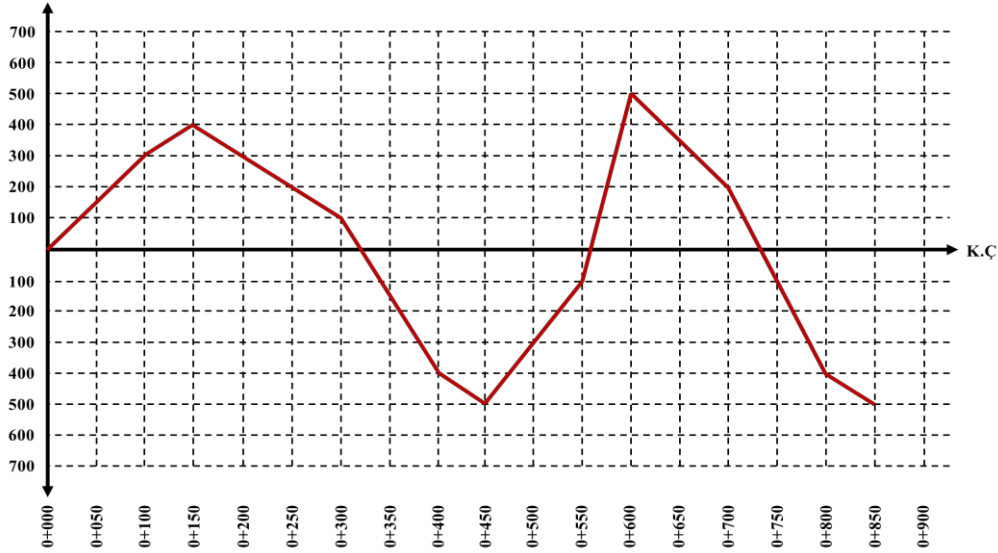
Optimum taşıma mesafesinin belirlenmesinin ardından, Örnek 1' de olduğu gibi, Örnek 2' de de tepe ve vadide kapalı alan oluşturacak şekilde (birinci dereceden toprak dağıtımı) kütleler diyagramı üzerine yerleştirilmektedir. Örnek 2' deki tepe kısmında, $l_m=350 \text{ m.}$ ' lik çizginin geometrik ve trigonometrik bilgilerden yararlanılarak karşılaştırma çizgisinin 75 birim (75 m^3 ' e karşılık gelen) üstüne karşılık geldiği belirlenmiştir. Vadi bölümünde ise, söz konusu çizgi, kütleler diyagramı için oluşturulan karelejlardan yararlanılarak yerleştirilmiştir. Örnek 2 için, optimum taşıma mesafesinin kütleler diyagramı üzerindeki gösterimi ve şematik boykesit ise Şekil 10' da gösterilmektedir.



Şekil 10. Örnek 2 için Optimum Taşıma Mesafesinin Gösterimi ve Şematik Boykesit (Projection of Optimum Hauling Distance and Schematic Cross-Section for Sample 2)

Şekil 10' dan görüldüğü üzere, Örnek 1' de olduğu gibi, siyah kutu içerisinde gösterilen bölümde optimum taşıma mesafesi çizgileri birbirleri üzerine denk gelmekte ve "girişim" oluşmaktadır. Bu durumda, şematik boykesitte kırmızı ile taranan bölgeye hem soldan sağa doğru hem de sağdan sola doğru iki defa taşıma yapıldığı anlaşılabilir. Bu, fiziksel olarak mümkün değildir. Bu yüzden, Örnek 2 için de, tepe ve vadi kısmındaki taşıma mesafelerinin birbirine eşit olduğu yeni bir optimum taşıma mesafesi belirlenmesi gerekmektedir.

- **Örnek 3:** Analizlerde kullanılacak olan Örnek 3' e ait kütleler diyagramı birbiri ardına gelen bir tepe, bir vadi ve bir tepeden oluşmaktadır. Örnek 3 için kütleler diyagramı Şekil 11' de gösterilmektedir.



Şekil 11. Örnek 3 için Kütleler Diyagramı (Mass Diagram for Sample 3)

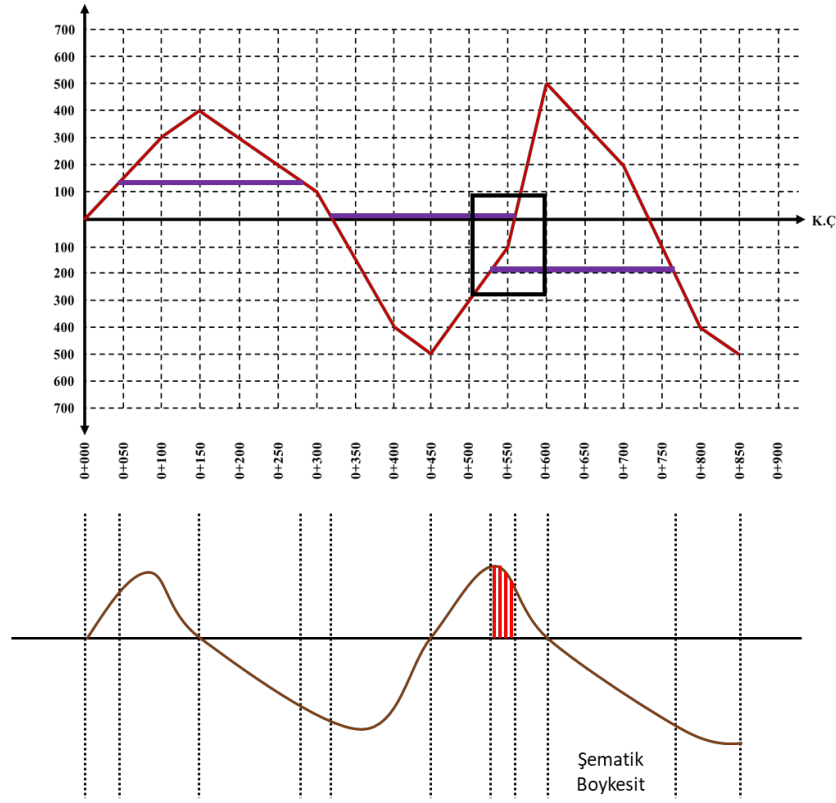
Şekil 11' den görüldüğü üzere; 1. tepe ve 1. vadi arasında, 1. vadi ve 2. tepe arasında veya her iki durumda da girişim gerçekleşme olasılığı bulunmaktadır. Örnek 3 için, araçların taşıma mesafesine bağlı olarak taşıma maliyetleri ile depo ve ödünç maliyetleri Tablo 3' de verilmektedir.

Tablo 3. Örnek 3 için Maliyetler (Costs for Sample 3)

T ₁ aracı için	$M_1 = 5 \times 10^{-3} \times (250 + 1,75 \times L)$
T ₂ aracı için	$M_2 = 5 \times 10^{-3} \times (300 + 1,25 \times L)$
Depo maliyeti	$M_o = 1,80 \text{ TL/m}^3$
Ödünç maliyeti	$M_d = 1,20 \text{ TL/m}^3$

Örnek 3 için de Örnek 1 ve Örnek 2' de yapılan işlem adımları takip edilerek T₁ ve T₂ araçları için uygun taşıma mesafesinin sınır değeri (l_{e1}) 100 metre olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yeniden, Örnek 1 ve Örnek 2' deki işlem adımları takip edilerek, optimum taşıma mesafesi (l_m) 240 metre olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, Örnek 3' de taşıma işlemi için, T₂ aracının 240 metre mesafeye kadar etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilceği söylenebilir. Buna göre, Örnek 3 için optimum taşıma mesafesinin 240 metre ($l_m=240$ m.) olduğu anlaşılmaktadır.

Optimum taşıma mesafesinin belirlenmesinin ardından, optimum taşıma mesafesi çizgileri, diğer örneklerde olduğu gibi, tepe ve vadilerde kapalı alan oluşturacak şekilde (birinci dereceden toprak dağıtımı) kütleler diyagramı üzerine yerleştirilmiştir. Örnek 3' de de, vadi ve tepelerdeki optimum taşıma mesafesi çizgisi lokasyonları geometrik ve trigonometrik bilgiler kullanılarak belirlenmiştir. Optimum taşıma mesafesi çizgilerinin; 1. tepe' de karşılaştırma çizgisinin 132 br (132 m^3) yukarısına, vadiye karşılaştırma çizgisinin 5.88 br (5.88 m^3) yukarısına ve 2. tepede de karşılaştırma çizgisinin 196 br (196 m^3) aşağısına denk geldiği tespit edilmiştir. Şekil 12' de, Örnek 3 için, optimum taşıma mesafesinin kütleler diyagramı üzerindeki gösterimi ve şematik boykesit gösterilmektedir.



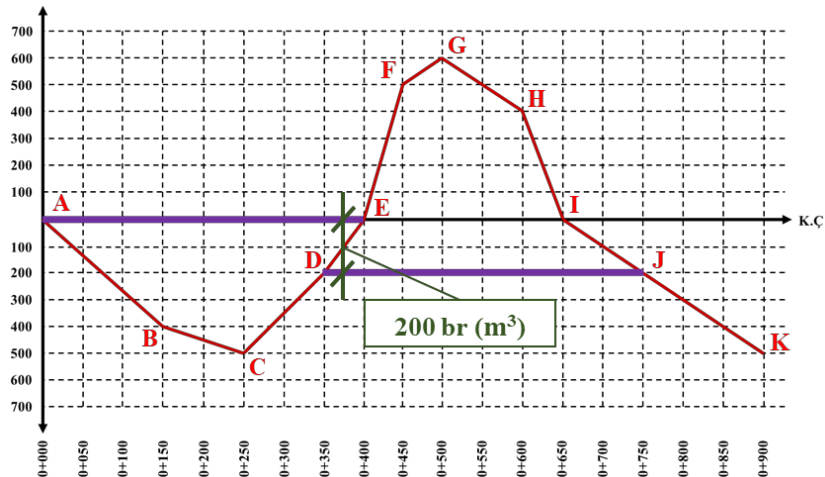
Şekil 12. Örnek 3 için Optimum Taşıma Mesafesinin Gösterimi ve Şematik Boykesit (Projection of Optimum Hauling Distance and Schematic Cross-Section for Sample 3)

Şekil 12' dikkatle incelendiğinde, 1. tepe ve vadi arasında herhangi bir girişim durumunun söz konusu olmadığı fakat vadi ve 2. tepe arasında girişim meydana geldiği görülebilmektedir. Bu durumda, şematik boykesitte kırmızı ile taralı olan bölgeden hem sağdan sola doğru hem de soldan sağa doğru taşıma yapıldığı anlaşılmaktadır. Daha önceki örneklerde de belirtildiği üzere, böyle bir durum fiziksel olarak mümkün olamayacağı için vadi ve 2. tepe kısmında taşıma mesafelerinin birbirlerine eşit olduğu yeni bir optimum taşıma mesafesi belirlenmelidir.

5. Analizler (Analyses)

Bu bölümde, öncelikli olarak, bir önceki bölümde detaylı olarak anlatılan 3 farklı örnek için girişim durumlarının ortadan kaldırılması amacıyla kurulan matematiksel modeller ayrı ayrı anlatılmıştır. Daha sonra ise, yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular sunulmuştur.

- **Örnek 1:** Örnek 1 için, kütleler diyagramı üzerinde optimum taşıma mesafelerinin belirtildiği ve girişim durumunun gözlemlendiği noktalar Şekil 13' deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 13. Örnek 1 için Optimum Taşıma Mesafesi Çizgilerinin Lokasyonları (Locations of Optimum Hauling Distance Lines for Sample 1)

Şekil 13' den, Örnek 1 için optimum taşıma mesafesi çizgilerinin, A-E ve D-J noktaları arasında bulunduğu görülebilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, A-E ve D-J arasındaki düşey mesafe 200 br (m^3) olarak hesaplanmıştır. Yeni belirlenen optimum taşıma mesafesi (l_m) değerinin 400 metrenin altında olacağı ve bu çizgilerin de 200 br (m^3)' lik düşey mesafenin üzerinde bir noktada yerleştirileceği söylenebilir. Bu durumda, A-E noktaları arasındaki çizgi aşağı doğru, D-J noktaları arasındaki çizgi ise yukarı doğru hareket edecektir. A-E noktaları arasındaki çizginin yeni uzunluğu belirlenirken A-B ve D-E çizgilerinin eğiminden yararlanılmalıdır. Benzer şekilde, D-J noktaları arasındaki çizginin yeni uzunluğu belirlenirken de D-E ve I-J çizgi eğimleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu bilgilerden yola çıkarak, A-E arasındaki çizginin, A-E ve D-J çizgileri arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren matematiksel ifade için şunlar söylenebilir:

- A-B çizgisinin eğimini gösteren açı α ile ifade edildiğinde ($\tan\alpha = 400/150 = 2,6667$); toplam 200 br (m^3)' lik düşey mesafede A-E çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot\alpha$ kadardır.
- D-E çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan\beta = 200/50 = 4,0000$); toplam 200 br (m^3)' lik düşey mesafede A-E çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot\beta$ kadardır.
- Bu durumda, A-E arasındaki çizgi matematiksel olarak: $U_{A-E} = 400 - (x \times \cot\alpha) - (x \times \cot\beta)$ şeklinde ifade edilmektedir.

Benzer şekilde; D-J arasındaki çizginin, A-E ve D-J çizgileri arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren matematiksel ifade için ise şunlar söylenebilir:

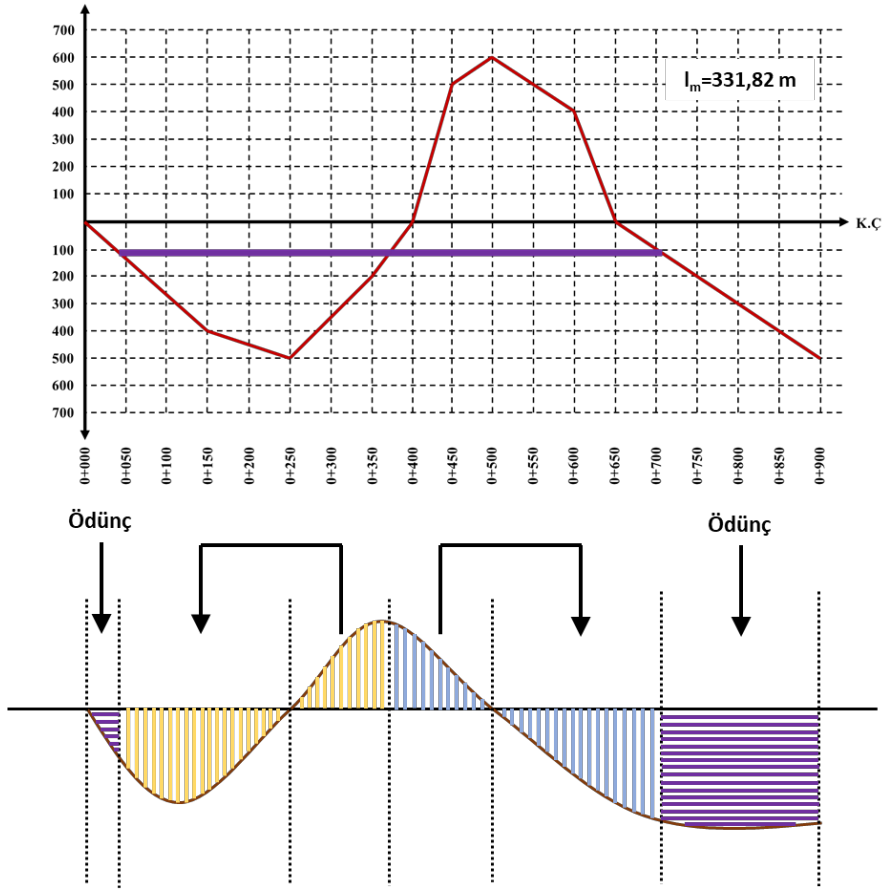
- D-E çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan\beta = 200/50 = 4,0000$); toplam 200 br (m^3)' lik düşey mesafede D-J çizgisinden eksilen bölüm $(200 - x) \times \cot\beta$ kadardır.
- I-J çizgisinin eğimini gösteren açı ϕ ile ifade edildiğinde ($\tan\phi = 200/100 = 2,0000$); toplam 200 br (m^3)' lik düşey mesafede D-J çizgisinden eksilen bölüm $(200 - x) \times \cot\phi$ kadardır.
- Bu durumda D-J arasındaki çizgi uzunluğu: $U_{D-J} = 400 - (200 - x) \times \cot\beta - (200 - x) \times \cot\phi$ dir.

A-E ve D-J çizgi uzunlukları çizgiler arasındaki düşey uzunluğa bağlı olarak değiştiğinden, optimizasyon problemi için, düşey mesafe, karar değişkeni olarak dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, girişim durumunun ortadan kaldırılması, her iki çizgi uzunluğunun birbirine eşitlenmesiyle mümkün olacaktır. Bu yüzden, çizgilerin uzunluklarının farklarının mutlak değeri amaç fonksiyonu olarak göz önünde bulundurulmalı ve 0' a eşitlenmelidir. Örnek 1 için, oluşturulan optimizasyon problemi ve analiz sonuçları Tablo 4' de detaylı olarak gösterilmektedir.

Tablo 4. Örnek 1 için Oluşturulan Optimizasyon Problemi ve Analiz Sonuçları (Created Optimization Problem and Analyses Results for Sample 1)

Oluşturulan Optimizasyon Problemi		Analiz Sonuçları	
Amaç fonksiyonu	$f = \min(U_{A-E} - U_{D-J})$	Optimum taşıma mesafesi (l_m)	331,82
Karar değişkeni (x)	$0 \leq x \leq 200$	Çizgilerin, üstteki (A-E) çizgiye düşey uzaklığı	109,09
*Diferansiyel Gelişim Algoritması parametreleri: NP = 50 ; CR = 0,8 ; F = 0,8 ve $G_{maks} = 1000$ olarak seçilmiştir.			

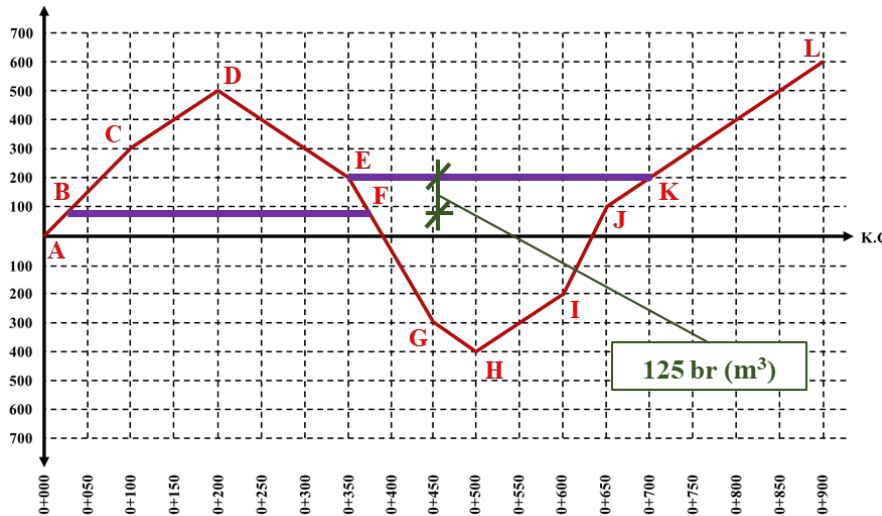
Tablo 4' den, yeni optimum taşıma mesafesinin 331,82 metre olarak elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, yeni dağıtma çizgilerinin de, karşılaştırma çizgisinin 109,09 br (m^3) aşağısında bulunması gerektiği söylenebilir. Örnek 1 için, dağıtma çizgilerinin yeniden çizilmesi durumunda elde edilen kütleler diyagramı ve dağıtma işlemlerini gösteren şematik boykesit Şekil 14' de sunulmaktadır.



Şekil 14. Örnek 1 için Girişimin Önlenmesi ile Elde Edilen Kütleler Diyagramı ve Şematik Boykesit (Mass Diagram Obtained by Prevention of Overlapping and Schematic Cross-Section for Sample 1)

Şekil 14’ den de görüldüğü üzere, Örnek 1 için $l_m=331,82$ metre olması durumunda girişim ortadan kaldırılabilmektedir.

- **Örnek 2:** Örnek 2 için, kütleler diyagramı üzerinde optimum taşıma mesafelerinin belirtildiği ve girişim durumunun gözlemlendiği noktalar Şekil 15’ de gösterilmektedir.



Şekil 15. Örnek 2 için Optimum Taşıma Mesafesi Çizgilerinin Lokasyonları (Locations of Optimum Hauling Distance Lines for Sample 2)

Şekil 15’ den de görüldüğü üzere, Örnek 2 için optimum taşıma mesafesi çizgileri B-F ve E-K noktaları arasında bulunmaktadır. Bölüm 4’ de de belirtildiği üzere, B-F ve E-K arasındaki düşey mesafe de $125 \text{ br (m}^3\text{)}$ olarak hesaplanmıştır. Burada, yeniden belirlenecek olan optimum taşıma mesafesi (l_m) değerinin 350 metrenin altında olacağı açıktır. Bununla birlikte, optimum taşıma mesafesini temsil eden sembolik çizgiler de $125 \text{ br (m}^3\text{)}$ ’ lik düşey

mesafe üzerinde bir noktada yerleştirilmelidir. Bu durumda, B-F noktaları arasındaki çizgi yukarı doğru, E-K noktaları arasındaki çizgi ise aşağı doğru hareket edecektir. B-F noktaları arasındaki çizginin yeni uzunluğu belirlenirken A-C ve E-G çizgilerinin, E-K noktaları arasındaki çizginin yeni uzunluğu belirlenirken ise E-G, I-J ve J-K çizgilerinin eğimlerinden yararlanılmalıdır.

Bu bilgiler ışığında, B-F arasındaki çizginin, B-F ve E-K çizgileri arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren matematiksel ifade için şunlar söylenebilir:

- A-C çizgisinin eğimini gösteren açı α ile ifade edildiğinde ($\tan\alpha = 300/100 = 3,0000$); toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede B-F çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot\alpha$ kadardır.
- E-G çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan\beta = 500/100 = 5,0000$); toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede B-F çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot\beta$ kadardır.
- Bu durumda, B-F arasındaki çizgi matematiksel olarak: $U_{B-F} = 350 - (x \times \cot\alpha) - (x \times \cot\beta)$ şeklinde ifade edilmektedir.

E-K arasındaki çizginin, B-F ve E-K çizgileri arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren matematiksel ifade için ise iki farklı durum söz konusudur ve şunlar söylenebilir:

➤ Eğer $(125 - x) \leq 100$;

- E-G çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan\beta = 500/100 = 5,0000$); toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede E-K çizgisinden eksilen bölüm $(125 - x) \times \cot\beta$ kadardır.
- J-L çizgisinin eğimini gösteren açı ϕ ile ifade edildiğinde ($\tan\phi = 500/250 = 2,0000$); toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede E-K çizgisinden eksilen bölüm $(125 - x) \times \cot\phi$ kadardır.
- Bu durumda, E-K arasındaki çizgi uzunluğu $U_{E-K} = 350 - ((125 - x) \times \cot\beta) - ((125 - x) \times \cot\phi)$ şeklinde ifade edilmektedir.

➤ Eğer $(125 - x) > 100$;

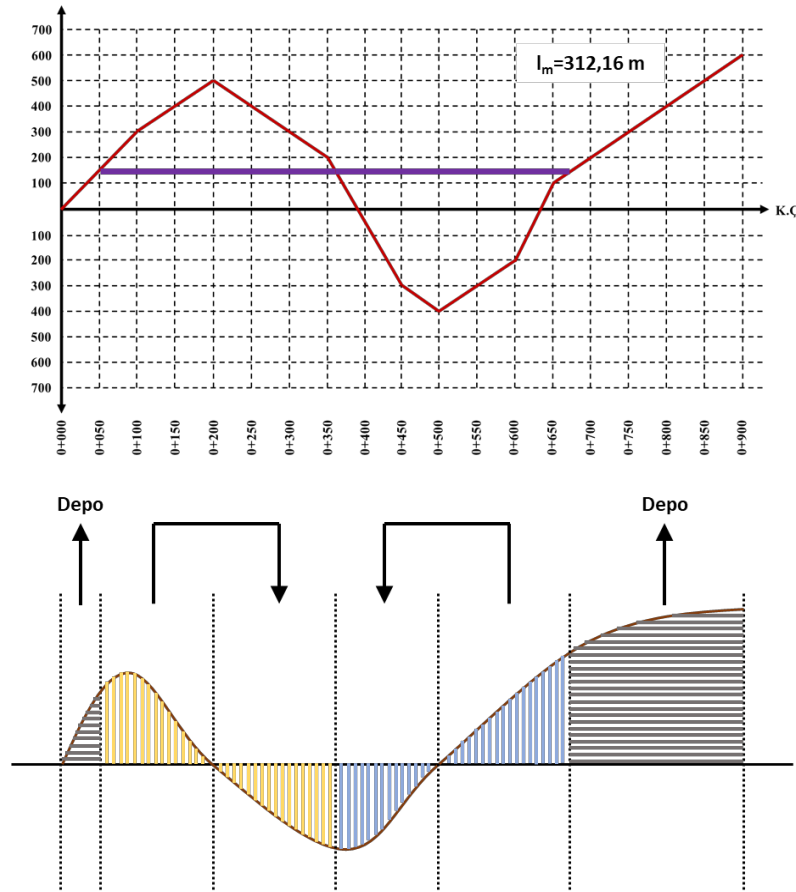
- E-G çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan\beta = 500/100 = 5,0000$); toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede E-K çizgisinden eksilen bölüm $(125 - x) \times \cot\beta$ kadardır.
- J-K arasındaki yatay mesafeden dolayı, toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede 50 metre' lik bir eksilme olacaktır.
- I-J çizgisinin eğimini gösteren açı φ ile ifade edildiğinde ($\tan\varphi = 300/50 = 6,0000$); toplam 125 br (m^3)' lik düşey mesafede E-K çizgisinden eksilen bölüm $(x - 100) \times \cot\varphi$ kadardır.
- Bu durumda, E-K çizgi uzunluğu, $U_{E-K} = 350 - ((125 - x) \times \cot\beta) - (50) - ((x - 100) \times \cot\varphi)$ şeklinde ifade edilmektedir.

B-F ve E-K çizgi uzunlukları için matematiksel ifadelerin elde edilmesinin ardından, öncelikli olarak, Örnek 1' de belirtilen adımlar takip edilerek, optimizasyon probleminin karar değişkeni, kısıtı ve amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Daha sonra ise probleme ait karar değişkeni, kısıt ve amaç fonksiyonu göz önünde bulundurularak, problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Örnek 2 için, oluşturulan optimizasyon problemi ve analiz sonuçları Tablo 5' de detaylı olarak gösterilmektedir.

Tablo 5. Örnek 2 için Oluşturulan Optimizasyon Problemi ve Analiz Sonuçları (Created Optimization Problem and Analyses Results for Sample 2)

Oluşturulan Optimizasyon Problemi		Analiz Sonuçları	
Amaç fonksiyonu	$f = \min(U_{B-F} - U_{E-K})$	Optimum taşıma mesafesi (I_m)	312,16
Karar değişkeni (x)	$0 \leq x \leq 125$	Çizgilerin alttaki (B-F) çizgiye düşey uzaklığı	70,95
*Diferansiyel Gelişim Algoritması parametreleri: NP=50 ; CR=0,8 ; F=0,8 ve $G_{maks} = 1000$ olarak seçilmiştir.			

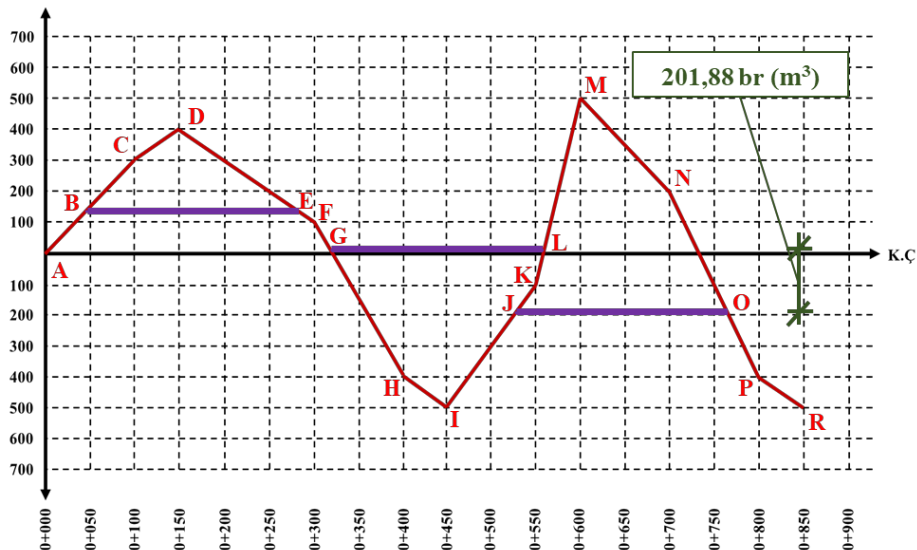
Tablo 5’ den görüldüğü üzere, yeni optimum taşıma mesafesi 312,16 metre olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yeni dağıtma çizgilerinin de, B-F noktalarından 70,95 br (m³) ve karşılaştırma çizgisinden ise 145,95 br (m³) yukarıya yerleştirilmesi gerektiği söylenebilir. Örnek 2 için, dağıtma çizgilerinin yeniden çizilmesi durumunda elde edilen kütleler diyagramı ve dağıtma işlemlerini gösteren şematik boykesit Şekil 16’ da sunulmaktadır.



Şekil 16. Örnek 2 için Girişimin Önlenmesi ile Elde Edilen Kütleler Diyagramı ve Şematik Boykesit (Mass Diagram Obtained by Prevention of Overlapping and Schematic Cross-Section for Sample 2)

Şekil 16’ dan, $l_m=312,16$ metre olması durumunda girişimin ortadan kaldırılabilirdiği açık bir şekilde görülmektedir.

- **Örnek 3:** Örnek 3 için, kütleler diyagramı üzerinde optimum taşıma mesafelerinin gösterildiği ve girişim durumunun gözlemlendiği noktalar Şekil 17’ de sunulmaktadır.



Şekil 17. Örnek 3 için Optimum Taşıma Mesafesi Çizgilerinin Lokasyonları (Locations of Optimum Hauling Distance Lines for Sample 3)

Örnek 3 için optimum taşıma mesafesi çizgileri; 1. tepede B-E, vadide G-L ve 2. tepede de J-O noktaları arasında bulunmaktadır. Daha önce (Bölüm 4) de belirtildiği üzere, burada yalnızca vadi ve 2. tepedeki çizgilerde girişim söz konusudur. Bu yüzden, Örnek 3 kapsamında yalnızca bu durumun düzeltilmesi gerekmektedir. Vadideki (G-L arasındaki) çizginin karşılaştırma çizgisinden 5,88 br (m^3) yukarıda, 2. tepedeki çizginin de karşılaştırma çizgisinden 196 br (m^3) aşağıda olduğu bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında aradaki düşey mesafenin 201,88 br (m^3) olduğu söylenebilir. Başlangıçtaki optimum taşıma mesafesi (l_m) 240 metre elde edildiği için, girişimin meydana geldiği vadi ve 2. tepedeki mesafelerin 240 metreden daha düşük olması gerekmektedir. Ayrıca, vadi ve 2. tepede, optimum taşıma mesafesini temsil eden sembolik çizgiler de 201,88 br (m^3)' lik düşey mesafe üzerinde bir noktada yerleştirilmelidir. Bu durumda, G-L noktaları arasındaki çizgi aşağı doğru, J-O noktaları arasındaki çizgi ise yukarı doğru hareket edecektir. G-L noktaları arasındaki çizginin yeni uzunluğu belirlenirken F-H, I-K ve K-M çizgilerinin, J-O noktaları arasındaki çizginin yeni uzunluğu belirlenirken ise I-K, K-M ve N-P çizgilerinin eğimlerinden yararlanılmalıdır.

G-L arasındaki çizginin, G-L ve J-O çizgileri arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren matematiksel ifade için şunlar söylenebilir:

- Eğer $x \leq 105,88$;
- F-H çizgisinin eğimini gösteren açı α ile ifade edildiğinde ($\tan \alpha = 500/100 = 5,0000$); toplam 201,88 br (m^3)' lik düşey mesafede G-L çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot \alpha$ kadardır.
- K-M çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan \beta = 600/50 = 12,0000$); toplam 201,88 br (m^3)' lik düşey mesafede G-L çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot \beta$ kadardır.
- Bu durumda, G-L arasındaki çizgi matematiksel olarak: $U_{G-L} = 240 - (x \times \cot \alpha) - (x \times \cot \beta)$ şeklinde ifade edilmektedir.
- Eğer $x > 105,88$;
- F-H çizgisinin eğimini gösteren açı α ile ifade edildiğinde ($\tan \alpha = 500/100 = 5,0000$); toplam 201,88 br (m^3)' lik düşey mesafede G-L çizgisinden eksilen bölüm $x \times \cot \alpha$ kadardır.
- K-M çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan \beta = 600/50 = 12,0000$); 105,88 br (m^3)' lik düşey mesafede G-L çizgisinden eksilen bölüm $105,88 \times \cot \beta$ kadardır.
- I-K çizgisinin eğimini gösteren açı ϕ ile ifade edildiğinde ($\tan \phi = 400/100 = 4,0000$); 105,88 br (m^3)' lik düşey kısımdan sonraki mesafede G-L çizgisinden eksilen bölüm $(x - 105,88) \times \cot \phi$ kadardır.
- Böylece, G-L çizgi uzunluğu: $U_{G-L} = 240 - ((x \times \cot \alpha) - (105,88 \times \cot \beta) - ((x - 105,88) \times \cot \phi))$ şeklinde ifade edilmektedir.

Benzer şekilde, J-O arasındaki çizginin, G-L ve J-O çizgileri arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren matematiksel ifade için de şunlar söylenebilir:

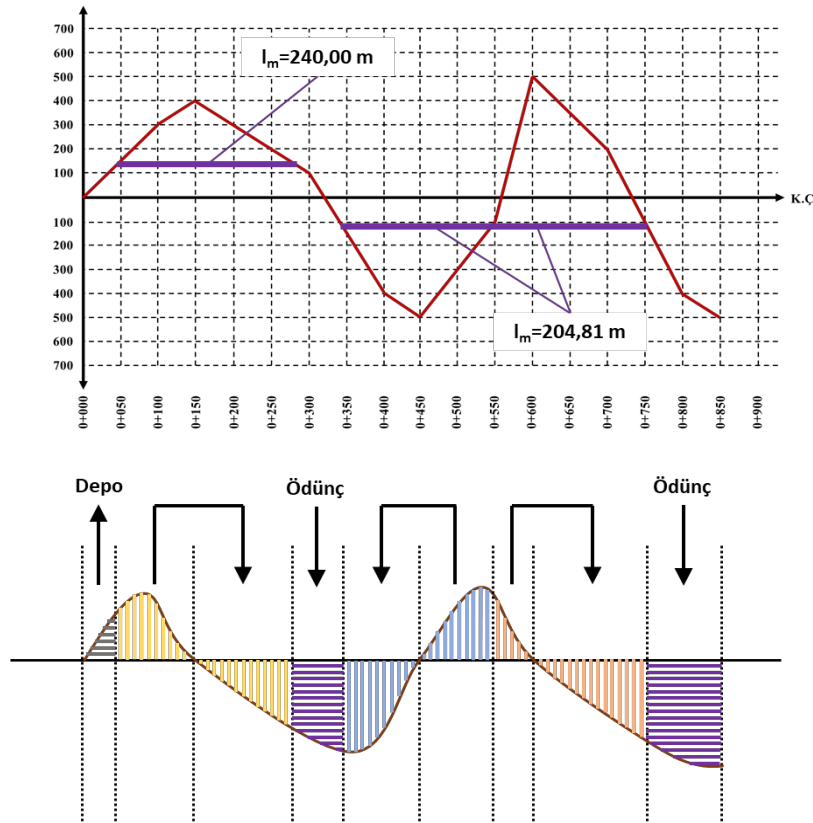
- Eğer $(201,88 - x) \leq 96,00$;
- I-K çizgisinin eğimini gösteren açı ϕ ile ifade edildiğinde ($\tan \phi = 400/100 = 4,0000$); $(201,88 - x)$ br (m^3)' lik düşey mesafede J-O çizgisinden eksilen bölüm $(201,88 - x) \times \cot \phi$ kadardır.
- N-P çizgisinin eğimini gösteren açı φ ile ifade edildiğinde ($\tan \varphi = 600/100 = 6,0000$); $(201,88 - x)$ br (m^3)' lik düşey mesafede J-O çizgisinden eksilen bölüm $(201,88 - x) \times \cot \varphi$ kadardır.
- Bu durumda J-O çizgi uzunluğu: $U_{J-O} = 240 - ((201,88 - x) \times \cot \phi - (201,88 - x) \times \cot \varphi)$ şeklinde ifade edilebilir.
- Eğer $(201,88 - x) > 96,00$;
- K-M çizgisinin eğimini gösteren açı β ile ifade edildiğinde ($\tan \beta = 600/50 = 12,0000$); $(105,88 - x)$ br (m^3)' lik düşey mesafede 200 metrelik yatay mesafeden (0+550 ve 0+750 arası) eksilen bölüm $(105,88 - x) \times \cot \beta$ kadardır.
- N-P çizgisinin eğimini gösteren açı φ ile ifade edildiğinde ($\tan \varphi = 600/100 = 6,0000$); $(105,88 - x)$ br (m^3)' lik düşey mesafede 200 metrelik yatay mesafeden (0+550 ve 0+750 arası) eksilen bölüm $(105,88 - x) \times \cot \varphi$ kadardır.
- Bu durumda J-O çizgi uzunluğu: $U_{J-O} = 200 - ((105,88 - x) \times \cot \beta - (105,88 - x) \times \cot \varphi)$ şeklinde ifade edilebilir.

G-L ve J-O çizgi uzunlukları için matematiksel ifadelerin elde edilmesinin ardından, öncelikli olarak, önceki örneklerde de olduğu gibi, optimizasyon probleminin karar değişkeni, kısıtı ve amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Daha sonra ise probleme ait karar değişkeni, kısıt ve amaç fonksiyonu göz önünde bulundurularak, problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Örnek 3 için, oluşturulan optimizasyon problemi ve analiz sonuçları Tablo 6' da detaylı olarak gösterilmektedir.

Tablo 6. Örnek 3 için Oluşturulan Optimizasyon Problemi ve Analiz Sonuçları (Created Optimization Problem and Analyses Results for Sample 3)

Oluşturulan Optimizasyon Problemi		Analiz Sonuçları	
Amaç fonksiyonu	$f = \min(U_{G-L} - U_{J-O})$	Optimum taşıma mesafesi (I_m)	204,81
Karar değişkeni (x)	$0 \leq x \leq 201,88$	Çizgilerin üstteki (G-L) çizgiye düşey uzaklığı	117,42
*Diferansiyel Gelişim Algoritması parametreleri: NP = 50; CR = 0,8; F = 0,8 ve $G_{maks} = 1000$ olarak seçilmiştir.			

Tablo 6' dan görüldüğü üzere, Örnek 3' de vadi ve 2. tepe kısmı için optimum taşıma mesafesinin yeni değeri 204,81 metre olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, vadi ve 2. tepe kısmındaki yeni dağıtma çizgilerinin, G-L noktalarından 117,42 br (m^3), karşılaştırma çizgisinden de 111,54 br (m^3) aşağıya yerleştirilmesi gerektiği söylenebilir. Örnek 3 için, dağıtma çizgilerinin yeniden çizilmesi durumunda oluşan kütleler diyagramı ve dağıtma işlemlerini gösteren şematik boykesit Şekil 18' de sunulmaktadır.



Şekil 18. Örnek 3 için Girişimin Önlenmesi ile Elde Edilen Kütleler Diyagramı ve Şematik Boykesit (Mass Diagram Obtained by Prevention of Overlapping and Schematic Cross-Section for Sample 3)

Şekil 18' den de görüldüğü üzere, vadi ve 2. tepe için yeni optimum taşıma mesafesi (I_m) 204,81 metre elde edilerek girişim durumu ortadan kaldırılmıştır. 1. tepe ve vadi arasında herhangi bir girişim durumu söz konusu olmadığı için 1. tepedeki optimum taşıma mesafesinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, toprak dağıtımı için kullanılan Genel Yöntem' de özel bir durum teşkil eden "girişim" oluşumu ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, ardışık bir tepe ve bir vadiden veya bir vadi ve bir tepeden oluşan kütleler diyagramında, girişim oluşması durumunda, en uygun taşıma mesafelerinin yeniden belirlenmesi ve girişimin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, birbirinden farklı üç örnek ele alınmış ve literatürdeki Genel Yöntem hesap yaklaşımları kullanılarak Örnek 1, Örnek 2 ve Örnek 3 için optimum taşıma mesafeleri sırasıyla 400 m., 350 m. ve 240 m. olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, en ekonomik (optimum) toprak dağıtımının gerçekleştirilebilmesi için hesaplanan bu uzunluklar kütleler diyagramları üzerine yerleştirilmiş ve her üç örnekte de girişimin meydana geldiği görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, her bir örnek için optimum taşıma mesafeleri, kütleler diyagramlarına ait matematiksel, geometrik ve trigonometrik veriler göz önünde bulundurularak Diferansiyel Gelişim Algoritması ile yeniden belirlenmiştir. Analiz sonuçları ve şematik boykesitler dikkatle incelendiğinde, Örnek 1, Örnek 2 ve Örnek 3 için optimum taşıma mesafelerinin sırasıyla 331,82 m., 312,16 m. ve 204,81 m. (Örnek 3 için 1. vadi ve 2. tepe kesiminde) elde edilmesi durumunda, üç örnekte de girişimin önlenilebileceği ve en ekonomik toprak dağıtımının gerçekleştirilebileceği açık bir şekilde görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar ışığında, optimizasyon tabanlı çözüm yaklaşımının, birçok mühendislik probleminin çözümünde olduğu gibi, toprak işlerinde meydana gelebilen girişimin önlenmesinde de etkin bir çözüm yaklaşımı olarak kullanılabileceği söylenebilir. Daha sonraki çalışmalarda, bir kütleler diyagramında birden fazla kesimde meydana gelen girişim durumunun optimizasyon tabanlı çözümünün ele alınmasının çalıştırmayı geliştirmeye yönelik önemli bir adım olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, veri girişi kullanıcı tarafından yapılabilen kütleler diyagramında en uygun taşıma mesafelerinin kolay bir şekilde belirlenebilmesine yönelik grafiksel bir arayüz (Graphical User Interface-GUI) oluşturulması planlanmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ali, M. M., Törn, A., 2004. Population Set-Based Global Optimization Algorithms: Some Modifications and Numerical Studies, *Computers & Operations Research*, 31, 1703-1725.
- Bakır, D., 2017. Toprak İşleri Şantiyesinde Kazı, Yükleme ve Taşıma Maliyetlerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. 72 s.
- Baskan, O., 2019. A Multiobjective Bilevel Programming Model for Environmentally Friendly Traffic Signal Timings, *Advances in Civil Engineering*, Article ID: 1638618, 1-13.
- Banks, J. H., 2010. *Introduction to Transportation Engineering*, New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Çakıcı, Z., 2020. Sinyalize Kavşaklar için Optimizasyon Tabanlı Trafik Yönetim Modeli. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. 173 s.
- Elci, A., Ayvaz, M. T., 2014. Differential-Evolution Algorithm Based Optimization for the Site Selection of Groundwater Production Wells with the Consideration of the Vulnerability Concept, *Journal of Hydrology*, 511, 736-749.
- Erselcan, N., 1994. Toprak Dağıtımı için Bir Lineer Programlama Yöntemi, *Teknik Dergi*, 5 (22), 763-769.
- Evren, G., 2001. *Toprak İşleri*, İstanbul: Birsan Yayınevi Ltd. Şti.
- Göktepe, A. B., Lav, A. H., Altun, S., Altıntaş, G., 2008. Fuzzy Decision Support System to Determine Swell/Shrink Factor Affecting Earthwork Optimization of Highways, *Mathematical and Computational Applications*, 13 (1), 61-70.
- Kamal, M., İnel, M., Optimum Design of Reinforced Concrete Continuous Foundation Using Differential Evolution Algorithm, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44 (10), 8401-8415.
- Karaboğa, D., 2014. *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti.
- Keskintürk, T., 2006. Diferansiyel Gelişim Algoritması, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9, 85-99.
- Khan, S. U., Qureshi, I. M., Zaman, F., Shoaib, B., Naveed, A., Basit, A., 2014. Correction of Faulty Sensors in Phased Array Radars Using Symmetrical Sensor Failure Technique and Cultural Algorithm with Differential Evolution, *The Scientific World Journal*, Article ID: 852539, 1-10.
- Li, X-Q., Wang, Z., Fu, L-H., 2016. A Laser-based Measuring System for Online Quality Control of Car Engine Block. *Sensors*, 16 (11), 1877.
- Liu, H., Cai, Z., Wang, Y., 2010. Hybridizing Particle Swarm Optimization with Differential Evolution for Constrained Numerical and Engineering Optimization, *Applied Soft Computing*, 10 (2), 629-640.
- Ögüt, K. S., 2005. New Approaches for the Earth Distribution Method. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (4), 294-301.
- Seçkin, İ., 2003. *Toprak İşleri ve Demiryolu*, İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- Sriboonchandr, P., Kriengkarakot, N., Kriengkarakot, P., 2019. Improved Differential Evolution Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Mathematical and Computational Applications*, 24 (3), 80.

- Storn, R., Price, K., 1997. Differential Evolution a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 11 (4), 341-359.
- Şahinkaya, O., Türk-Hırvat Karayolları Teknik Şartnamelerinin Toprak İşleri Açısından Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. 99 s.
- Tan, E., Sadak, D., Ayvaz, M. T., 2020. Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Optimum Tasarımı, *Teknik Dergi*, 31 (5), 10229-10250.



DOĞAL ALKALİ MALZEMELERİN ÇİMENTOLU MACUN DOLGUNUN DAYANIM-DURAYLILIK VE MİKROYAPI PERFORMANSINA ETKİSİ

Tekin YILMAZ^{1*}, Bayram ERÇIKDI²

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane MYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Çimentolu Macun Dolgu,
Sülfürlü Maden Atığı,
Doğal Alkali Malzemeler,
Dayanım-Duraylılık,
Mikroyapı.*

Öz

Bu çalışmada, çimentolu macun dolgu (ÇMD) içerisinde doğal alkali malzemelerin (D_{AL-M}) sülfürlü maden atığına (S-MA) ikame (%5-15) olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kontrol numuneleri %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanırken, D_{AL-M} ikameli numuneler %7,5-8,5 bağlayıcı oranında S-MA yerine kalsitik ve dolomitik kireçtaşı kullanılarak üretilmiştir. Numuneler üzerinde 7-360 gün aralığında basınç dayanımı ve 28-180 günde mikroyapı testleri uygulanmıştır. Dayanım-duraylılık bulguları, D_{AL-M} ikamesinin ÇMD'nin dayanımını arttırdığını ve uzun dönemde meydana gelen dayanım kayıplarını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, 28-360 gün boyunca istenen asgari basınç dayanımı ($\geq 1,0$ MPa) %5 D_{AL-M} ikameli ÇMD numuneleri (%7,5) haricinde sağlanmıştır. Mikroyapı sonuçları değerlendirildiğinde, kür süresinin artmasıyla tüm numunelerin toplam poroziteleri (n_{top}) azalmış ve Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, S-MA yerine yapılan %15 D_{AL-M} ikamesi numunelerin n_{top} değerlerini düşürmüştür. ÇMD'nin dayanım-duraylılık ve mikroyapı performansı ve D_{AL-M} 'lerin oluşturduğu olası çevresel problemler göz önüne alındığında, sonuçlar, bu malzemelerin ÇMD karışımlarında kullanımının faydalı olabileceğini ortaya koymuştur.

EFFECT OF NATURAL ALKALINE MATERIALS ON THE STRENGTH-STABILITY AND MICROSTRUCTURE PERFORMANCE OF CEMENTED PASTE BACKFILL

Keywords

*Cemented Paste Backfill,
Sulphide Mine Tailings,
Natural Alkaline Materials,
Strength-Stability,
Microstructure.*

Abstract

In this study, the usability of natural alkaline materials (N_{AL-M}) as partial replacement (5-15wt.%) to sulphide-mine tailings (S-MT) in cemented paste backfill (CPB) was investigated. Control samples were prepared at 8.5wt.% binder dosage, whilst, CPB samples containing N_{AL-M} were produced by utilising the calcitic and dolomitic limestone at 7.5-8.5 wt.% cement dosages. Compressive strength between 7-360 days and microstructure tests at 28-180 days were performed on the samples. The strength-stability findings demonstrated that the replacement of N_{AL-M} increased the strength of CPB, and decreased the strength loses occurred at long-term. The minimum compressive strength (≥ 1.0 MPa) desired during 28-360 days was provided except CPB samples (7.5 wt.%) containing 5wt.% N_{AL-M} . When the microstructure results were evaluated, the total porosity (n_{tot}) values of all samples were decreased with the increase of curing time, and the replacement of 15wt.% N_{AL-M} to S-MT decreased the n_{tot} of samples compared to Control samples. Considering the strength-stability and microstructural performance of CPB, and the possible environmental problems caused by N_{AL-M} , the results revealed that the utilisation of these materials in CPB mixtures can be beneficial.

Alıntı / Cite

Yılmaz, T., Erçikdi, B., (2022). Doğal Alkali Malzemelerin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım-Duraylılık ve Mikroyapı Performansına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1474-1483.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

T. Yılmaz, 0000-0003-3288-5192
B. Erçikdi, 0000-0003-4900-5382

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.03.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	31.05.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.06.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: yilmaz@gumushane.edu.tr

1. Giriş (Introduction)

Kireçtaşı, farklı jeolojik süreçlerde oluşan ve yer kabuğunun üst katmanında yaygın bir biçimde bulunan minerallerden birisidir. Kireçtaşı, kimyasal ve organik etkiler vasıtasıyla sularda çökelen maddelerin meydana getirdiği bir kayadır. Karbonatlı tortul kayalar ve fosiller için kullanılan genel bir tabir olan kireçtaşları, esas olarak kalsit, dolomit, aragonit ve manyezit gibi kalsiyum (Ca) bakımından zengin CaCO_3 veya $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ bileşiklerine sahip minerallerden oluşmaktadır (Parlakıldız, 2008; Semerci, 2008; Yılmaz, 2019).

Kireçtaşları, en yaygın kullanılan hammaddelerden birisidir. Çimento ve betonda kullanılan kireçtaşı; yüksek erken dayanım, yüksek işlenebilirlik, düşük su ihtiyacı, betonun üretim maliyetini azaltması ve çimento üretiminde düşük CO_2 emisyonu sağlaması gibi birçok avantaj sunar (Vuk vd., 2001; Ramezianpour vd., 2009; Wang vd., 2015). Dahası, kireçtaşı, puzolanik özellik göstermemesine rağmen boşlukları doldurma özelliği sayesinde çimento hamurunun matrisine ve betonun performansını arttırabilen daha yoğun agrega ile çimento matrisi arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin doldurulmasına katkı sağlayabilir (Wang vd., 2015). Yukarıda bahsedilen avantajlardan dolayı, son yıllarda farklı çalışma alanlarında kullanımı giderek artan kireçtaşı ülkelerin ekonomik koşulları göz önüne alındığında, çimento sanayinde hammadde olarak (Salas vd., 2016), metalürji endüstrisinde yüksek fırın ve elektrik fırınlarında demir cevheri içerisinde bulunan safsızlıkların uzaklaştırılmasında, seramik, cam ve tuğla üretiminde (Algin ve Turgut, 2008; Shaaban vd., 2019) ve inşaat endüstrisinde (beton üretiminde, karayolu ve demiryolu yapımında, vb.) iri ve/veya ince agrega (Elbahi ve Boukli Hacene, 2016; Moon vd., 2017; Turk ve Demirhan, 2017; Liu vd., 2018) olarak değerlendirilmektedir. Elbahi ve Boukli Hacene (2016) çimento yerine farklı oranlarda kireçtaşı tozu (%10-30) ve doğal puzolan (%10-30) kullanarak hazırladıkları betonun mühendislik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında 28 günden itibaren farklı oranlardaki kireçtaşı ikamesinin betonun basınç dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada, öğütülmüş kireçtaşının (KT) Portland çimentosu (PÇ) yerine farklı ikame oranlarında (%15-35) kullanımının beton numunelerinin basınç dayanımı (3-7-28 gün) ve porozite (28 gün) gelişimine etkisinin araştırılan Moon vd. (2017), KT ikame oranının artmasıyla beton numunelerinin basınç dayanımının azaldığını, karışım tipi ve kür süresinden bağımsız olarak en yüksek dayanımın %15 KT ikameli numunelerde elde edildiğini belirlemiştir. Ayrıca, yazarlar, basınç dayanımı gelişimine benzer olarak sadece %15 KT içeren beton numunelerinin kontrol numunelerine kıyasla daha düşük (%3,8-8,7) porozite ürettiğini rapor etmiştir. Turk ve Demirhan (2017) silika kumu yerine farklı ikame oranlarında (%25, %50, %75 ve %100) KT kullanımının beton dayanım, duraylılık ve akışkanlık özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, beton karışımı içerisindeki KT ikame oranının artması ile karışımların akışkanlığında azalma meydana gelirken, numunelerin erken kür sürelerindeki (3 ve 28 gün) mekanik özelliklerinin (basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu) olumlu yönde etkilendiğini belirtmişlerdir. Buna karşın duraylılık özelliklerinde (90 gün) dikkate değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Çimentolu macun dolgu (ÇMD) teknolojisi alanında gerçekleştirilen bir çalışmada, araştırmacılar (Hu vd., 2019) çimento yerine %20'ye kadar KT ikame ederek hazırladıkları ÇMD numunelerinde KT ikamesinin 3 ve 7 gün sonunda dayanım düşüşüne sebep olduğunu, 28 gün sonundaki dayanım gelişimi üzerinde ise önemli bir etki gözlenmediğini rapor etmişlerdir. Ayrıca yazarlar KT ikamesinin artmasıyla ÇMD'nin mikroyapı özelliklerinin (porozite, makro gözenek oranı ve ortalama gözenek yarıçapı) gelişim kaydettiğini bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada, Zheng vd. (2016) %5,14 sülfür içerikli ve iri taneli atık malzemeye ikame olarak %10-22,5 oranlarında öğütülmüş KT kullanarak ÇMD numuneleri üretmişler ve KT ikamesinin ÇMD'nin dayanım (7-112 gün) ve mikroyapı (7-28 gün) özelliklerine etkisini araştırmışlardır. KT ikameli ÇMD numunelerinin tüm kür sürelerinde kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ürettiğini belirten yazarlar, %10 KT ikamesinin daha yüksek ikame oranına (%22,5) kıyasla ÇMD'nin dayanımını daha fazla arttırdığını gözlemlemişlerdir. ÇMD'nin mikroyapısı değerlendirildiğinde, %10-22,5 KT ikameli numunelerinin 7 günlük porozite değerlerinin kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek (%38,6-41,5>%35,5) olduğu, buna karşın, 28 gün sonunda %22,5 kireçtaşı ikameli numunenin porozitesinin kontrol numunesinden daha düşük (%33,4<%34,8) olduğu tespit edilmiştir (Zheng vd., 2016). Doğal atık malzemelerin (D_{AL-M} : kalsitik kireçtaşı (KK) ve dolomitik kireçtaşı (DK)) sülfürlü maden atığı (S-MA) içeren ÇMD'nin asit-sülfat oluşumuna karşı nötralizasyon performansının incelendiği çalışmada, Yılmaz vd. (2020) ÇMD karışımı içerisinde S-MA yerine %5-15 oranında ikame olarak kullanılan KK ve DK'nin yüksek oranda CaO içeriğine sahip olması ve S-MA'ya kıyasla daha fazla ince tane içermesinden dolayı hem ÇMD bünyesindeki potansiyel asit oluşumunun nötralize edildiğini hem de dolgu mikroyapısının iyileştirdiğini (daha düşük toplam porozite vb.) ve bu sayede kontrol ÇMD'ye kıyasla oldukça düşük oranda asit ve sülfat oluşumu meydana geldiğini belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada Yılmaz ve Erçikdi (2022) hazırladıkları ÇMD numunelerini uzun dönem (30-360 gün) dinamik tank liçi testlerine tabi tutarak S-MA yerine yapılan KK ve DK ikamesinin ÇMD'nin jeokimyasal özellikleri (pH, sülfat ve ağır metal salınımı) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. ÇMD karışımında ikame olarak KK ve DK kullanımıyla sızıntı suyunun alkali pH'larda kaldığını ve sülfat salınımının epey düştüğünü tespit eden araştırmacılar KK ve DK ikameli ÇMD numunelerinde meydana gelen daha düşük poroziteli mikroyapı sonucunda sızıntı suyuna salınan ağır metal konsantrasyonlarının engellendiğini veya önemli ölçüde kısıtlandığını ifade etmişlerdir. Yapılan literatür araştırmaları sonucu doğal alkali malzeme (D_{AL-M}) sınıfında yer alan kireçtaşlarının

başta inşaat sektörü olmak üzere birçok farklı alanda kullanımıyla ilgili çok sayıda çalışma yapılmasına karşın ÇMD uygulamalarında kullanımına yönelik oldukça sınırlı sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, doğal alkali malzemelerin (D_{AL-M} 'lerin) (kalsitik kireçtaşı: KK ve dolomitik kireçtaşı: DK) ÇMD'nin ana bileşeni olan sülfürlü maden atığı (S-MA) yerine %5-15 oranında ikamesinin ÇMD'nin dayanım-duraylılık (7-360 gün) ve mikroyapı (28 ve 180 gün) performansının incelenmesini ve D_{AL-M} 'lerin ÇMD karışımı içerisinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesini içermektedir.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

2.1. Malzemeler ve Karakterizasyon (Materials and Characterization)

ÇMD karışımını oluşturan ana bileşenlerden sülfürlü maden atığı (S-MA) ve bağlayıcı (PÇ: CEM I 42,5R) malzeme sırasıyla Etibakır (Kastamonu-Küre) İşletmesi ve Aşkale Çimento (Trabzon) Fabrikası'ndan temin edilirken, S-MA yerine %5-15 oranında ikame olarak kullanılan D_{AL-M} 'ler (kalsitik kireçtaşı: KK ve dolomitik kireçtaşı: DK) sırasıyla Araklı-Taşönü'nde bulunan Aşkale Çimento A.Ş.'ye ait hammadde ocağından ve Antalya-Karaöz bölgesinden temin edilmiştir. S-MA, ÇMD karışımlarının hazırlanmasından önce homojenleştirme işlemine tabi tutulurken, iri boyutlu olarak temin edilen kireçtaşları (KK ve DK) öncelikle çeneli kırıcı kullanılarak -2 mm boyutuna kırılmış, ardından malzemelerin doğal kuruluşunun sağlanması için (50°C/36 saat) etüvde kurutulmuş ve sonrasında bilyalı değirmen vasıtasıyla -100 µm boyutuna öğütülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. KK (a) ve DK'nın (b) boyut küçültme süreci (Size reduction process of CL (a) and DL (b))

ÇMD karışımında kullanılan malzemelerin (S-MA, PÇ, KK ve DK) fiziksel karakterizasyonları (özellikler (ÖA), tane boyut dağılımı (TBD) ve özgül yüzey alanı (ÖYA)), sırasıyla piknometre, tane boyutu ölçer (Malvern Mastersizer) ve yüzey alanı ölçer (Atom-CM-BL 101) cihazı ile gerçekleştirilmiş ve ilgili değerler Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, S-MA, KK ve DK'nın şlam (<20 µm) malzeme miktarı, sırasıyla %48,41, %67,95 ve %58,69 olarak ölçülmüştür. Malzemelerin kimyasal karakterizasyonu XRF ve gravimetrik yöntem kullanılarak belirlenmiş ve S-MA'nın büyük oranda Fe_2O_3 ve SiO_2 minerallerinden oluştuğu, buna karşın, PÇ, KK ve DK'nın baskın olarak CaO minerali içerdiği tespit edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri (Physical, chemical and mineralogical properties of materials)

Malzemeler	Fiziksel Özellikler						Mineralojik Özellikler
	Tane boyutu (µm)				ÖA (g/cm ³)	ÖYA (cm ² /g)	
	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₈₀			
S-MA	2,0	8,0	22,0	68,5	3,37	4440	Pirit, Albit, Kuvars, Kalsit, Klorit
PÇ	2,2	8,9	21,7	49,9	3,12	4335	-
KK	1,35	4,2	9,4	36,0	2,63	5665	Kalsit
DK	1,5	5,0	14,3	49,0	2,79	5020	Kalsit, Dolomit
Malzemeler	Kimyasal Özellikler						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	S ⁻²	FeS ₂
S-MA	31,89	8,97	33,09	4,08	3,48	15,82	29,66
PÇ	21,02	5,27	3,06	2,19	62,91	-	-
KK	0,86	0,23	0,06	0,22	55,26	-	-
DK	0,12	0,09	0,06	20,18	32,28	-	-

ÇMD karışımında kullanılan malzemelerin mineralojik karakterizasyon analizleri ise XRD (X- ışınları difraktometre) cihazı ile yapılmış ve S-MA'nın yüksek miktarda pirit minerali ($FeS_2 = \%29,66$) içerdiği, buna bağlı olarak sülfür (S^{2-}) içeriğinin $\%15,82$ olduğu belirlenmiştir. S-MA yerine ikame olarak kullanılan KK baskın olarak kalsit içerirken, DK'nın ise ve kalsit ve dolomit minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir (Tablo 1).

2.2. ÇMD Numunelerinin Hazırlanması

ÇMD numunelerinin üretiminde kullanılan karışımlar 19,05 cm akışkanlık değerinde S-MA yerine $\%5$, $\%10$ ve $\%15$ oranında ayrı ayrı KK ve DK ikame edilerek hazırlanmıştır. Karışım içerisinde kullanılan bağlayıcı malzeme (CEMI 42,5R) 19,05 cm akışkanlık değerine karşılık gelen katı oranına göre eklenmek üzere; kontrol numuneleri ($\%100$ S-MA) sadece $\%8,5$ çimento oranında hazırlanırken, D_{AL-M} (KK ve DK) ikameli numuneler $\%7,5-8,5$ bağlayıcı oranında (BO) hazırlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. ÇMD numunelerinin deneysel çalışma koşulları (Experimental study conditions of CPB samples)

Karışım tipi	İkame oranı (%)	Bağlayıcı oranı (%)	Katı oranı (%)		Su/çimento oranı		Slamp (cm)	Numune sayısı	
			$\%8,5$	$\%7,5$	$\%8,5$	$\%7,5$		TEBD	MIP
Kontrol	0	8,5	73,70	-	4,20	-	19,05	15	2
5KK	5-10-15	7,5-8,5	73,38	72,97	4,27	4,94		45	4
10KK			73,69	73,10	4,20	4,91			
15KK			74,02	73,58	4,13	4,79			
5DK			73,65	73,41	4,21	4,83			
10DK			74,03	73,68	4,13	4,76			
15DK			74,31	73,91	4,07	4,71			

S-MA, PÇ, D_{AL-M} (KK, DK, vb.,) ve musluk suyundan oluşan ÇMD karışımının uygun bir şekilde karıştırılmasının sağlanması için Univex SRMF 20 model bir laboratuvar tipi mikser kullanılmış ve mikserin karıştırma hızı ve süresi sırasıyla 105 devir/dk ve 7 dakika olarak uygulanmıştır (Şekil 2a). Karıştırma işlemi tamamlanan ÇMD karışımları alttan drenajlı olan 5x10 cm (çap x boy) boyutlu silindirik numune kalıplarına doldurulmuş ve numuneler 1 gün boyunca drenaj masalarında muhafaza edilerek bünyesindeki fazla suyun drene olması sağlanmıştır (Şekil 2b). Drenaj masasından alınan ÇMD numuneleri, kür odasında bulunan kür dolabında ($\sim\%85$ nem ve $20^\circ C$ sıcaklık) 7-360 gün boyunca kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2c).



Şekil 2. Kullanılan mikser (a), ÇMD numunelerinin drenaj (b) ve kür işlemi (c) (Mixer (a), drainage (b) and curing process (c) of CPB samples)

2.3. Basınç Dayanımı ve Porozite (MIP) Testi

Önceden belirlenen her bir kür süresi (7-28-90-180-360) sonunda 3'er adet olmak üzere toplam 105 adet ÇMD numunesinin tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) testi UTEST marka bilgisayar kontrollü basınç ve deformasyon ünitesinde (yük kapasitesi= 50 kN ve yükleme hızı= 1,0 mm/dk) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a) (ASTM C 39, 2016). Basınç dayanımı testi öncesinde silindirik kalıplardan çıkarılan numunelerin yüzeylerinin paralel olması amacıyla alt ve üst yüzeyleri düzeltilmiştir. Porozite (MIP) testleri $\%8,5$ bağlayıcı oranında hazırlanan Kontrol ve D_{AL-M} ikameli (5KK, 15KK, 5DK ve 15DK) ÇMD numuneleri üzerinde 28 ve 180 gün sonunda uygulanmıştır. Bu test için her kür süresi için 1 adet olmak üzere toplam 10 adet ÇMD numunesi hazırlanmış ve test öncesinde hiçbir deneye tabi tutulmamıştır. Kür süreleri (28 ve 180 gün) tamamlanan numuneler, kimyasal reaksiyonlarının (hidratasyon vb.) sona erdirilmesi ve ağırlıklarının sabitlenmesi amacıyla etüvde (60 saat/ $50^\circ C$ sıcaklık) kurutulmuş ve sonrasında desikatörde soğutulmuştur.



Şekil 3. TEBD ünitesi (a) ve MIP cihazı (b) (Compressive strength (a) and MIP (b) devices)

ÇMD numunelerinin porozite testleri için maksimum 414 MPa (60.000 psi) hidrostatik basınç sağlayabilen sıvı Porozimetre cihazı (Micromeritics Autopore IV 9410) kullanılmıştır (Şekil 3b) (ASTM D 4404-10, 2010). MIP analizlerinin ardından Uluslararası Kuramsal ve Uygulamalı Kimya Sınıflaması Birliği'nin (IUPAC) önerdiği gözenek boyutu sınıflaması doğrultusunda ÇMD numunelerinin porozite karakterizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Everett, 1972). Bu sınıflama ile ÇMD numunelerinin orta gözenek boyutuna (0,002-0,05 μm) ve büyük gözenek boyutuna (>0,05 μm) sahip gözeneklerinin analizi yapılmıştır.

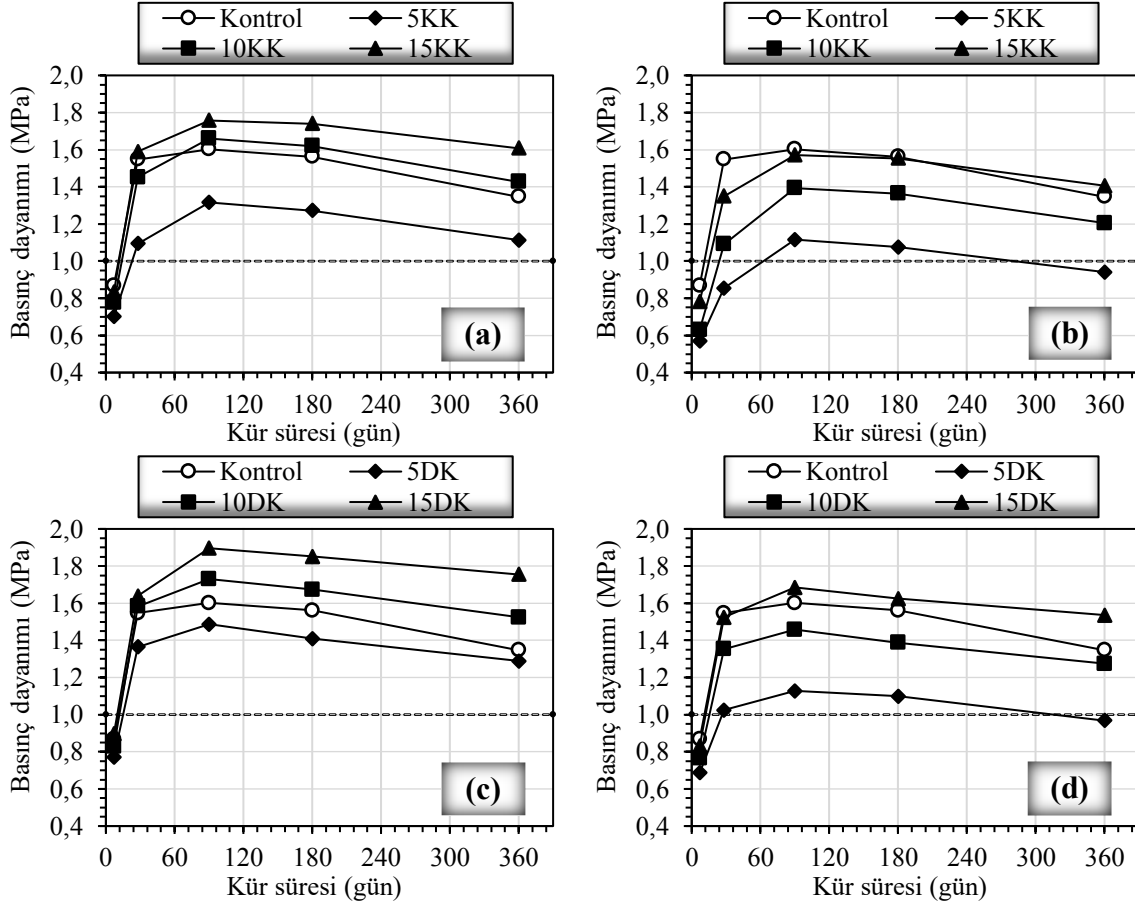
3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Dayanım-Duraylılık Performansı (Strength-Stability Performance)

Tamamen (%100) S-MA kullanılarak %8,5 bağlayıcı oranında üretilen Kontrol numuneleri ve %7,5-8,5 çimento oranında S-MA yerine %5-15 oranında ayrı ayrı KK ve DK ikame edilerek hazırlanan ÇMD numunelerinin 7-360 gün aralığındaki dayanım ve duraylılık performansına ait sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir. Karışım özelliklerinden bağımsız olarak tüm ÇMD numunelerinin (Kontrol, KK ve DK ikameli) basınç dayanımları 90 günlük kür süresine kadar artmış, sonrasında (90-360 gün aralığında) ise düşüş eğilimi göstermiştir (Şekil 4). S-MA yerine D_{AL-M} (KK ve DK) ikamesinin dayanım ve duraylılık performansına etkisi incelendiğinde, KK ve DK ikame oranının artması bağlayıcı oranı ve kür süresinden bağımsız olarak ÇMD numunelerinin basınç dayanımını arttırmıştır. Ayrıca, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan %10 ve %15 D_{AL-M} (10KK, 15KK, 10DK ve 15DK) ikameli ÇMD numunelerinin 28 günden sonra Kontrol numunelerine kıyasla %30,3'e kadar daha yüksek basınç dayanımı ürettikleri tespit edilmiştir (Şekil 4a,c). Daha yüksek oranlardaki (%10 ve %15) KK ve DK ikamesinin dayanım kazanımına yaptığı olumlu katkı, ÇMD karışımında kullanılan KK ve DK'nın S-MA'ya kıyasla daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 1) sahip olması sebebiyle daha fazla miktarda küçük boyutlu tane içeren KK ve DK'nın daha büyük boyutlu S-MA taneleri arasındaki boşlukları doldurmasıyla karışımın su ihtiyacının azalması (su/çimento oranının azalması) ve böylece katı oranının artması (Tablo 2) ile açıklanabilir (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd., 2018). Buna ek olarak, Moon vd. (2017) öğütülmüş alkali malzemelerin (KK, DK vb.) karışım içerisinde çekirdeklenme (nükleasyon) bölgesi oluşturarak çimentonun hidratasyonunu hızlandırmasının ve ilave hidratasyon ürünleri oluşturmasının basınç dayanımı kazanımını geliştirdiğini rapor etmiştir.

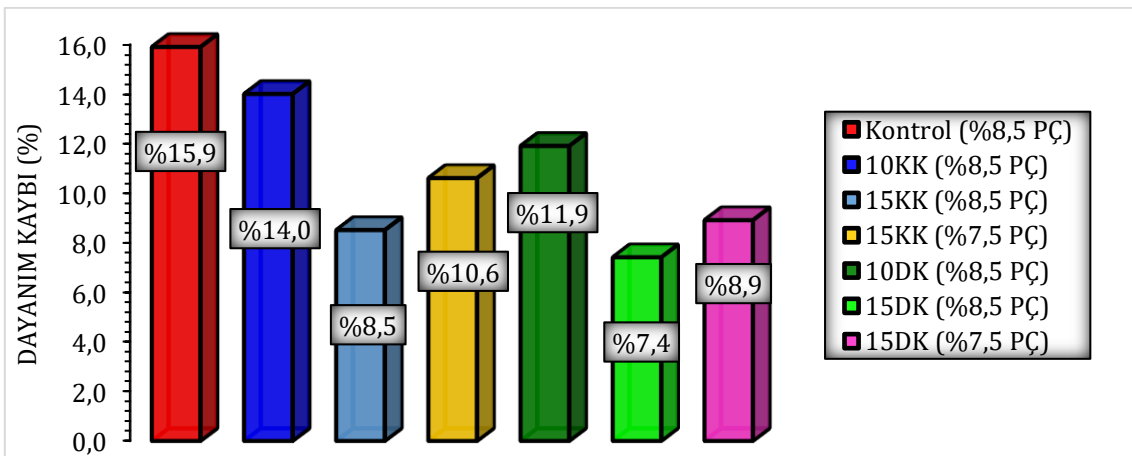
Benzer dayanım sonuçlarının elde edildiği bir çalışmada, araştırmacılar ince kum agrega yerine %5-15 oranında kireçtaşı tozu (KT) ikame ederek beton numuneleri hazırlamışlar ve KT içeren beton numunelerinin kontrol numunelerinden daha yüksek dayanım ürettiklerini bildirmişlerdir (Binici vd., 2007). Başka bir çalışmada çimentoya %30'a kadar öğütülmüş dolomitik kireçtaşı (DK) ikamesinin betonun 7-28 gün aralığındaki mekanik performansına etkisi incelenmiş ve kontrol numunelerine kıyasla 14 ve 28 gündeki en yüksek basınç dayanımı kazanımları (sırasıyla %16,7 ve %23,5) DK ikamesinin %25 oranında olduğu karışımlardan elde edildiği belirlenmiştir (Mikhailova vd., 2013). Araştırmacılar bu olumlu katkıyı, bu çalışmadaki bulgularla uyumlu olarak betonun yoğunluğunun artması ile sonuçlanan DK'daki yüksek yüzey alanına (5500 cm^2/g) bağlamışlardır. KK ve DK ikameli ÇMD karışımlarında bağlayıcı oranı %7,5'e düşürüldüğünde ise 15KK numunesinin uzun dönemde (90 ve 180 gün) Kontrol numunesinin dayanım değerlerini yakaladığı ve 360 günde geçtiği görülürken, 15DK numunesi aynı kür sürelerinde Kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanım sağlamıştır (Şekil 4b,d).

ÇMD uygulaması yapılan yeraltı madenlerinde emniyetli çalışma şartları tesis edilerek çalışanların ve ekipmanların güvenliğinin sağlanması, ocak üretim faaliyetlerinin sorunsuz sürmesi ve ÇMD uygulaması yapılmış bölge yanında üretim yapılırken cevher seyrelmesinin engellenmesi gibi amaçlardan dolayı yeraltı üretim boşluklarına doldurulan ÇMD'nin kısa ve uzun dönemde istenen dayanım değerini (28-360 gün arasında $\geq 1,0$ MPa) sadece %7,5 PÇ oranında hazırlanan 5KK ve 5DK numunelerinin sağlayamadığı belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. %8,5 (a,c) ve %7,5 (b,d) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılık sonuçları (Strength-stability results of CPB prepared at 8,5wt.% (a,c) and %7,5wt.% (b,d))

Çalışma kapsamında üretilen ÇMD numunelerinin (Kontrol, KK ve DK ikameli) ana bileşenlerinden biri olan atık malzemedeki sülfürlü minerallerin oksidasyonu sonucunda oluşan asit ve sülfat atak kaynaklı hidrasyon ürünlerinin (C-S-H jelleri ve portlandit) yapısal deformasyonlara uğraması (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018; Yılmaz vd., 2020) ile bağlantılı olarak uzun dönemde (90-360 gün) meydana gelen dayanım kaybı miktarları Şekil 5'te sunulmuştur. %8,5 PÇ oranına sahip 10KK ve 15KK numunelerinde sırasıyla %14,0 ve %8,5 oranlarında dayanım kaybı tespit edilirken, Kontrol ÇMD numunelerinde %15,9 seviyesinde dayanım düşüşü meydana gelmiştir. Bağlayıcı oranı %7,5'e düşürülerek hazırlanan KK ikameli ÇMD numuneleri değerlendirildiğinde ise, Kontrol ÇMD numuneleri ile yaklaşık aynı seviyelerde dayanım üreten 15KK numunelerinin daha düşük oranda (%10,6<%15,9) dayanım kaybı ürettiği belirlenmiştir (Şekil 5). DK ikameli ÇMD numunelerinin dayanım kaybı değerleri incelendiğinde ise %8,5 çimento oranında hazırlanan 10DK ve 15DK numuneleri sırasıyla %11,9 ve %7,4 dayanım kaybı üretirken, %7,5 PÇ oranına sahip 15DK numunesinde %8,9 oranında dayanım düşüşü tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. ÇMD numunelerinin uzun dönem (90-360 gün) dayanım kaybı değerleri (Long-term (90-360 days) strength loss values of CPB samples)

ÇMD karışımlarında karışımda kullanılan çimento miktarları ve karışım içerisinde kullanılan S-MA yerine belirli oranlarda (%5, 10 ve 15) D_{AL-M} 'ler (KK ve DK) ikame edilerek ÇMD uygulamasında en büyük maliyet kalemini oluşturan çimento sarfiyatı konusunda tasarruf edilebilme olanağına ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Bu kapsamda bağlayıcı sarfiyatında tasarruf değerlendirmesi; %8,5 PÇ oranında hazırlanan Kontrol ÇMD karışımı ile %7,5 PÇ oranındaki D_{AL-M} ikameli ÇMD karışımları arasında yapılmıştır. 1,0 m³ ÇMD üretiminde, %8,5 oranında PÇ kullanılan Kontrol numunelerinde 130 kg bağlayıcı kullanılırken, %7,5 PÇ oranında hazırlanan ve Kontrol numunelerinin dayanımına oldukça yakın dayanım üreten veya onu geçen 15KK ve 15DK numunelerinin üretiminde sırasıyla 110,4 ve 112,4 kg çimento kullanılarak sırasıyla %15,1 ve %13,5 oranında bağlayıcı tasarrufu elde edilmiştir (Şekil 4 ve Tablo 3).

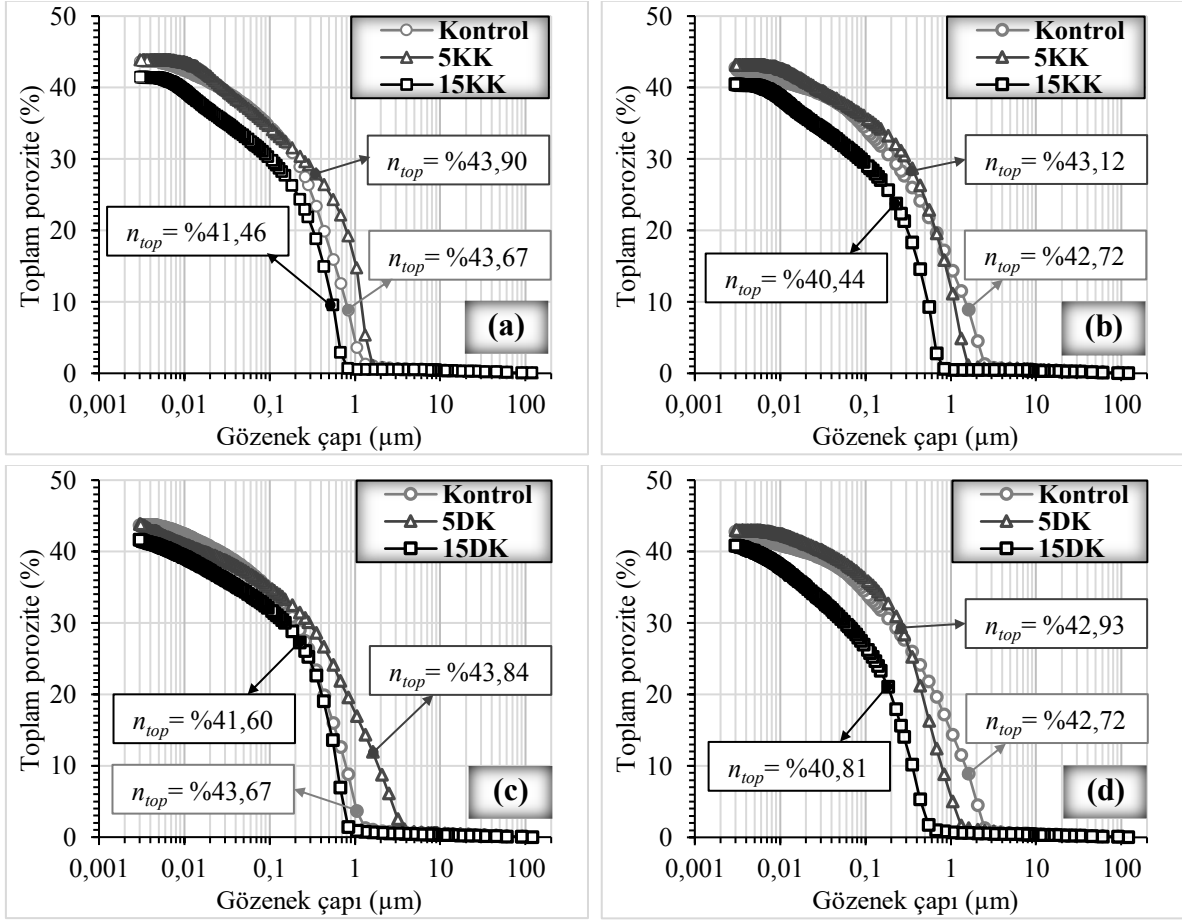
Tablo 3. 1,0 m³ ÇMD karışımında kullanılan bağlayıcı miktarı ve tasarruf oranı (binder content used in 1.0 m³ CPB mixture and saving ratio)

Özellikler	Karışım tipi		
	Kontrol	15KK	15DK
Katı oranı (%)	73,70	73,58	73,91
Akışkanlık (cm)	19,05		
Bağlayıcı oranı (%)	8,5	7,5	
Bağlayıcı miktarı (kg/m ³)	130,0	110,4	112,4
Bağlayıcı tasarrufu (%)	-	15,1	13,5

3.2. Mikroyapı Performansı (Microstructure Performance)

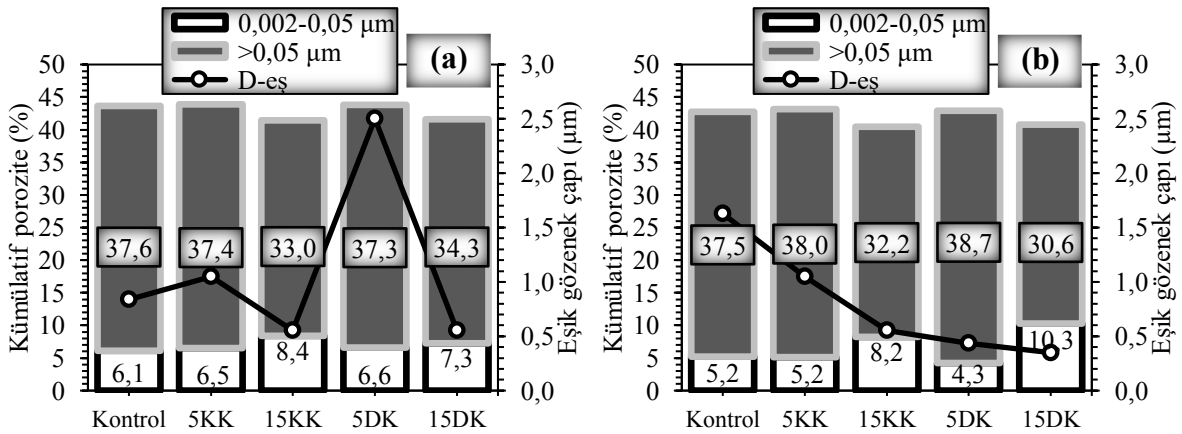
%8,5 çimento (PÇ) oranında hazırlanan Kontrol (%100 S-MA) ve %5-15 oranında D_{AL-M} ikameli (5KK, 15KK, 5DK ve 15DK) ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonunda gerçekleştirilen MIP testlerinden elde edilen toplam porozite (n_{top}) sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. Kür süresinin 28 günden 180 güne artması tüm ÇMD numunelerinin (Kontrol, 5KK, 15KK, 5DK ve 15DK) n_{top} değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. 28 gün sonundaki toplam porozite değerleri %43,90-41,46 arasında değişen ÇMD numunelerinin 180 gün sonundaki n_{top} değerleri %43,12-40,44 arasında ölçülmüştür (Şekil 6). Bu çalışmadaki bulguları destekleyen önceki çalışmalarda (Ghirian ve Fall, 2014; Yılmaz vd., 2014; Mangane vd., 2018) farklı kür sürelerinde (7-150 gün, 7-90 gün ve 7-28 gün) yapılan porozite testleri kür süresinin artmasıyla birlikte porozitenin azaldığını göstermiştir. Ayrıca, kür süresinin artışıyla ÇMD numunelerinin n_{top} değerlerinde meydana gelen düşüşün basınç dayanımında meydana gelen artışlar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4 ve 6). KK ve DK ikamesinin ÇMD numunelerinin n_{top} sonuçlarına etkisi değerlendirildiğinde, 5KK ve 5DK numunelerinin 28 ve 180 günlük n_{top} değerleri Kontrol numunesinden daha büyük iken, %15 D_{AL-M} ikameli numunelerinin (15KK ve 15DK) aynı kür sürelerindeki n_{top} değerleri Kontrol numunelerine kıyasla %5,3'e kadar daha düşüktür (Şekil 6). %15 ikameli numunelerin mikroyapısında (porozite) gözlemlenen iyileşme; KK ve DK'nın S-MA'dan daha yüksek ÖYA'ya sahip olması ve bu sayede daha fazla miktarda ince boyutlu tane içermesinden (Tablo 1) dolayı S-MA ile bağlayıcı (çimento) taneleri arasında filler etkisi sağlaması sonucunda ÇMD'nin iç yapısının yoğunlaşmasına (sıklaşmasına) bağlanabilir. Böylece aynı slamp değerinde ÇMD karışımında istenen su miktarının azalması sağlanarak daha yüksek katı oranı (%74,02-74,31>%73,70) ve daha düşük su/çimento oranına (4,07-4,13<4,20) sahip daha yoğun ve kompakt bir dolgu yapısı elde edilmiştir (Tablo 2) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Moon vd., 2017; Yılmaz vd., 2018). Bu çalışmadaki porozite bulgularıyla uyumluluk gösteren önceki çalışmalarda, beton ve ÇMD içerisinde farklı oranlarda (%15 ve %22,5) kireçtaşı tozu (KT) kullanımının numunelerin 28 günlük porozite gelişimine etkisini inceleyen yazarlar, kontrol numunelerine kıyasla beton numunelerinde (Moon vd., 2017) %3,8-8,7 ve ÇMD numunelerinde (Zheng vd., 2016) %4,0 oranlarında daha düşük porozite değerlerinin ölçüldüğünü rapor etmişlerdir.

Şekil 7, MIP testlerine tabi tutulan ÇMD numunelerine (Kontrol ve D_{AL-M} ikameli) ait teknik parametreleri (büyük boyutlu porozite: $n_{Büyük}$, orta boyutlu porozite: n_{Orta} ve eşik gözenek çapı: $d_{eş}$) göstermektedir. Tüm ÇMD numunelerinin orta boyutlu (n_{Orta} = 0,002-0,05 μ m) porozite miktarlarının kür süresi artışıyla paralel olarak arttığını, buna rağmen, aynı numunelerin (5KK ve 5DK hariç) büyük boyutlu ($n_{Büyük}$ = >0,05 μ m) porozitelerinin azaldığını göstermiştir. D_{AL-M} ikamesinin (KK ve DK) etkisi incelendiğinde, %5 D_{AL-M} ikamesinin ÇMD numunelerinin büyük ve orta boyutlu porozite miktarlarını kür süresinden bağımsız olarak Kontrol numunelerine kıyasla kısmen iyileştirdiği belirlenirken, ikame oranı %15'e artırıldığında $n_{Büyük}$ değerlerinin 28 ve 180 günde sırasıyla %8,7-12,2 ve %14,1-18,5 oranlarında düştüğü tespit edilmiştir. Buna ek olarak %15 D_{AL-M} ikamesi ÇMD numunelerinin n_{Orta} değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Şekil 7). ÇMD karışımı içerisinde S-MA yerine yapılan %15 D_{AL-M} ikamesinin $n_{Büyük}$ değerlerini azaltması ve n_{Orta} değerlerini artırmasının sebebi olarak, KK ve DK'nın S-MA'ya kıyasla daha ince tane boyutuna (yani daha yüksek ÖYA) sahip olmasından dolayı büyük boyutlu gözeneklerin kapanması ve/veya küçülerek orta boyutlu gözeneğe dönüşmesi ve bu sayede toplam porozitenin azalması ile sonuçlanan daha büyük boyutlu S-MA taneleri arasındaki boşlukların KK ve DK taneleri ile dolması gösterilebilir (Tablo 1) (Şekil 6 ve 7) (Zheng vd., 2016; Yılmaz vd., 2018).



Şekil 6. ÇMD numunelerinin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam porozite sonuçları (Total porosity results of CPB samples at 28 (a,c) and 180 days (b,d))

ÇMD'nin hidrolik iletkenlik özellikleri (permabilite vb.) üzerinde önemli bir etkiye sahip olan ve akışkan taşınım kabiliyetini kontrol eden (Yılmaz vd., 2011; Cihangir ve Akyol, 2018) eşik gözenek çapının (d_{es}) kür süresinin artmasıyla birlikte küçüldüğü (Kontrol numunesi hariç) gözlenmiştir. S-MA yerine yapılan D_{AL-M} ikamesinin etkisi değerlendirildiğinde, %5 oranındaki ikamenin Kontrol numunesinin eşik gözenek çapına kıyasla 28 günlük numunelerin d_{es} değerlerini büyüttüğü açıkça görülürken, 180 gün sonunda gözle görülür derecede küçülttüğü tespit edilmiştir (Şekil 7). İkame oranının %15 olması ise ÇMD numunelerinin d_{es} değerlerinde kür süresinden bağımsız olarak %78,5'e kadar küçülme sağlamıştır. Dolgu karışımı içerisinde yapılan özellikle %15 D_{AL-M} ikamesi ile KK ve DK'nın boşlukları doldurucu etkisinden kaynaklı aynı slump değerinde ÇMD karışımının katı oranı yükseltilmiş, su/çimento oranı azaltılmış (Tablo 2) ve böylece gözenek yapısı önemli derecede iyileştirilmiş ve daha yoğun bir ÇMD mikroyapısı oluşturulmuştur (Şekil 6 ve 7).



Şekil 7. ÇMD numunelerinin 28 (a) ve 180 (b) günlük MIP testlerine ait teknik parametreleri (Technical parameters of 28 (a) and 180 (b) days-MIP tests of CPB samples)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma, ÇMD'nin ana bileşeni olan S-MA yerine doğal alkali malzemelerin (D_{AL-M}) ikame olarak kullanımının ÇMD'nin dayanım-duraylılık (7-360 gün) ve mikroyapı (28 ve 180 gün) performansına etkilerinin incelenmesini içermektedir. Bu amaçla, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan Kontrol ÇMD numunelerinde tamamen S-MA kullanılırken, D_{AL-M} ikameli ÇMD numuneleri iki farklı bağlayıcı oranında (%7,5-8,5) ve S-MA yerine %5-15 oranında KK ve DK ikame edilerek hazırlanmıştır. Üretilen ÇMD numunelerinin basınç dayanımı (7-28-90-180-360 gün) ve MIP (porozite) (28 ve 180 gün) testleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım-duraylılık sonuçları incelendiğinde, D_{AL-M} ikame oranının artması ÇMD numunelerinin basınç dayanımlarını aynı bağlayıcı oranına (%8,5) sahip Kontrol numunelerine kıyasla 28 günden sonra %30,3'e kadar arttırırken, %7,5 bağlayıcı oranında sadece 15DK numunesi Kontrol numunesinden daha yüksek dayanım üretmiştir. ÇMD'nin dayanım ve duraylılığı açısından istenen basınç dayanımı değerini (28-360 gün arasında $\geq 1,0$ MPa) sadece %7,5 PÇ oranında hazırlanan %5 D_{AL-M} ikameli ÇMD numuneleri üretememiştir. Uzun dönemde (90-360 gün) yaşanan dayanım kayıpları değerlendirildiğinde, Kontrol numunelerinin dayanım kaybının %15,9 seviyesinde gerçekleştiği, buna karşın, D_{AL-M} ikamesi ile ÇMD numunelerinin dayanım kaybının %7,5'e kadar düştüğü tespit edilmiştir. Porozite bulgularına bakıldığında, kür süresi artışı tüm numunelerin toplam porozite (n_{top}) değerlerinin düşmesine katkıda bulunmuştur. Kontrol numunelerinin n_{top} değerleri ile karşılaştırıldığında, düşük D_{AL-M} ikameli numuneler kür süresinden bağımsız olarak daha yüksek n_{top} değerleri üretirlerken, ikame oranının %15'e arttırılması; numunelerin (15KK ve 15DK) toplam porozitelerinde %5,3'e kadar düşüş sağlamıştır. %15 D_{AL-M} ikameli ÇMD numunelerinin n_{top} sonuçlarında meydana gelen iyileşme numunelerin büyük boyutlu porozitelerinin ($n_{Büyük}$) azalması (%18,5'e kadar) ve orta boyutlu porozitelerinin (n_{Orta}) artması (%98,1'e kadar) ile desteklenmiştir.

Bu sonuçlardan, ÇMD karışımlarında S-MA yerine KK ve DK gibi doğal alkali malzemelerin kullanımının ÇMD'nin dayanım-duraylılık performansını arttırdığı, mikroyapı özelliklerini geliştirdiği ve böylelikle bu malzemelerin yeraltı üretim açıklıklarında depolanarak çevresel problemler (toz, görüntü kirliliği ve depolama alanı ihtiyacı vb.) oluşturma potansiyellerinin bertaraf edilebileceği anlaşılmıştır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (FDK 2016-5500) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Algin, H.M., Turgut, P., 2008. Cotton and Limestone Powder Wastes as Brick Material. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1074-1080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.006>
- ASTM C39/C39M-16b, 2016. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards. American Society of Testing Material.
- ASTM D 4404-18, 2018. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- Binici, H., Kaplan, H., Yılmaz, S., 2007. Influence of Marble and Limestone Dusts as Additives on Some Mechanical Properties of Concrete. *Scientific Research and Essays*, 2(9), 372-379. <https://doi.org/10.5897/SRE.9000594>
- Cihangir, F., Akyol, Y., 2018. Mechanical, Hydrological and Microstructural Assessment of the durability of Cemented Paste Backfill Containing Alkali-Activated Slag. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 32(2), 123-143. <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1242183>
- Elbahi, B., Boukli Hacene, S.M.A., 2016. Influence of Limestone Fillers and Natural Pozzolan on Engineering Properties of Concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(16), 1795-1807. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1161970>
- Ercikdi, B., Baki, H., İzki, M., 2013. Effect of Desliming of Sulphide-rich Mill Tailings on the long-term Strength of Cemented Paste Backfill. *Journal of Environmental Management*, 115, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.014>
- Ercikdi, B., Külekci, G., Yılmaz, T., 2015. Utilization of Granulated Marble Wastes and Waste Bricks as Mineral Admixture in Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings. *Construction and Building Materials*. 93, 573-583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.042>
- Ghirian, A., Fall, M., 2014. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Behaviour of Cemented Paste Backfill in Column Experiments: Part II: Mechanical, Chemical and Microstructural Processes and Characteristics. *Engineering Geology*, 170, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.004>
- Hu, J., Ding, X., Ren, Q., Luo, Z., Jiang, Q., 2019. Effect of incorporating waste limestone powder into solid waste cemented paste backfill material. *Applied Sciences*, 9(10), 2076. <https://doi.org/10.3390/app9102076>

- Liu, Y., Qian, Z.D., Zheng, D., Huang, Q.B., 2018. Evaluation of Epoxy Asphalt-based concrete substructure for high-speed Railway Ballastless Track. *Construction and Building Materials*, 162, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.028>
- Mangane, M.B.C., Argane, R., Trauchessec, R., Lecomte, A., Benzaazoua, M., 2018. Influence of Superplasticizers on Mechanical Properties and Workability of Cemented Paste Backfill, *Minerals Engineering*, 116, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.006>
- Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I., Senkov, S., 2013. Effect of Dolomite Limestone Powder on the Compressive Strength of Concrete. *Procedia Engineering*, 57, 775-780. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.098>
- Moon, G.D., Oh, S., Jung, S.H., Choi, Y.C., 2017. Effects of the Fineness of Limestone Powder and Cement on the Hydration and Strength Development of PLC Concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>
- Parlakıyıldız, M., 2008. Hammadde olarak Kireçtaşı ve Üretilen Kirecin Standartlara Uygunluğunun Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 91s.
- Ramezaniapour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M., Moodi, F., 2009. Influence of various amounts of Limestone Powder on Performance of Portland Limestone Cement Concretes. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 715-720. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.003>
- Salas, D.A., Ramirez, A.D., Rodríguez, C.R., Petroche, D.M., Boero, A.J., Duque-Rivera, J., 2016. Environmental Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review, *Journal of Cleaner Production*, 113, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>
- Semerci, F., 2008. Mardin Kireçtaşının Yapı Taşı olarak Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 124s.
- Shaaban, K.H.S., Saddeek, Y.B., Aly, K.A., Dahshan, A., Ali, A.M., 2019. Fabrication and Characterization of Glass and Glass-Ceramic from Cement Dust and Limestone Dust. *Silicon*, 11(2), 807-815. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9964-3>
- Tariq, A., Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, *Waste Management Research*, 160(4), 155-166. <https://doi.org/10.1680/warm.2007.160.4.155>
- Turk, K., Demirhan, S., 2017. Effect of Limestone Powder on the Rheological, Mechanical and Durability Properties of ECC. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 1151-1170. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1150902>
- Vuk, T., Tinta, V., Gabrovšek, R., Kaučič, V., 2001. The Effects of Limestone Addition, Clinker Type and Fineness On Properties of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 135-139. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00427-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00427-0)
- Wang, Y.H., Xu, Y.D., He, Z.H., 2015. Effect of Limestone Powder on Creep of High-Strength Concrete. *Materials Research Innovations*, 19(sup9), S9-220. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001969>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., 2016. Predicting the Uniaxial Compressive Strength of Cemented Paste Backfill from Ultrasonic Pulse Velocity Test. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 31(3), 247-266. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1111891>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., Devci, H., 2018. Utilisation of Construction and Demolition Waste as Cemented Paste Backfill Material for Underground Mine Openings. *Journal of Environmental Management*, 222, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.075>
- Yılmaz, T., 2019. Asit Nötralizasyon Edici Malzemeler Kullanılarak Sülfürlü Atıklardan Duraylı Macun Dolgu Üretiminin Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 153s.
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., Cihangir, F., 2020. Evaluation of the Neutralization Performances of the Industrial Waste Products (IWP) in Sulphide-rich Environment of Cemented Paste Backfill. *Journal of Environmental Management*, 258, 110037. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110037>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., 2022. Kalsitik ve dolomitik kireçtaşlarının çimentolu macun dolgunun çevresel davranışına etkisi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 61(1), 31-40. <https://doi.org/10.30797/madencilik.967090>
- Yılmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M., 2014. Effects of Curing and Stress Conditions on Hydromechanical, Geotechnical and Geochemical Properties of Cemented Paste Backfill. *Engineering Geology*, 168, 23-37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.024>
- Yin, S., Shao, Y., Wu, A., Wang, Y., Chen, X., 2018. Expansion and Strength Properties of Cemented Backfill Using Sulphidic Mill Tailings. *Construction and Building Materials*, 165, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.005>
- Zheng, J., Zhu, Y., Zhao, Z., 2016. Utilization of Limestone Powder and Water-Reducing Admixture in Cemented Paste Backfill of Coarse Copper Mine Tailings. *Construction and Building Materials*, 124, 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.055>



KARBON NANOTÜPLERİN KARBONDİOKSİT TUTUCU OLARAK KULLANIMI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Aysun ÖZKAN*, Gamze YILMAZ, Zerrin GÜNKAYA, Müfide BANAR

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Adsorpsiyon,
Karbondiyoksit,
Karbon Nanotüp.

Öz

Küresel ısınmaya sebep olan birincil antropojenik sera gazı olarak bilinen karbondiyoksit (CO₂) emisyonlarının azaltılması için tüm dünyada pek çok araştırma yapılmaktadır. CO₂'in tutulmasına yönelik olarak, yanma öncesi, yanma sonrası ve Oxy-yakıt yakım olmak üzere üç temel yaklaşım vardır. Adsorpsiyon, yanma öncesi ve sonrası kullanılabilen etkin bir CO₂ yakalama yöntemidir. Ancak, CO₂'nin havadan adsorbe edilmesi, baca gazı ve sentez gazı gibi yüksek CO₂ konsantrasyonlu kaynaklar için hala bir sorundur. İlgili literatürün çoğu, daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve daha düşük rejenerasyon enerjisi tüketimi için adsorbanların geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle CO₂ tutucu olarak farklı katı malzemelerin kullanımı üzerine yoğunlaşmaktadır. Adsorban malzeme olarak karbon bazlı adsorbanlar, zeolitler, moleküler elekler, metal-organik çerçeveler kullanılmaktadır. Bu bağlamda, yapısal özellikleri ve zorlu ortamlara karşı yüksek dayanıklılığı nedeniyle CO₂ adsorpsiyonu için karbonlu malzemeler tercih edilmektedir. Bu çalışmada da CO₂ tutucular ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar irdelenmiş ve bunlar arasında yüksek adsorpsiyon ve dayanım özelliği ile birçok kompozit malzeme ile uygulama alanı olan karbon nanotüpün CO₂ tutucu olarak kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur.

AN EVALUATION ON THE USE OF CARBON NANOTUBES AS A CARBONDIOXIDE ADSORBER

Keywords

Adsorption,
Carbondioxide,
Carbon Nanotube.

Abstract

There are many types of researches all over the world to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions known as primary anthropogenic greenhouse gases causing global warming. There are three basic approaches to CO₂ capture: pre-combustion, post-combustion and Oxy-fuel combustion. Adsorption is an effective CO₂ capture method that can be used pre and post combustion. However, adsorbing CO₂ from air is still a problem for sources with high CO₂ concentrations such as flue gas and syngas. Much of the relevant literature focuses on the development of adsorbents for higher adsorption capacity and lower regeneration energy consumption. These studies focus especially on the use of different solid materials as CO₂ adsorbents. Carbon-based adsorbents, zeolites, molecular sieves, metal-organic frameworks are used as adsorbent materials. In this context, carbon materials are preferred for CO₂ adsorption due to their structural properties and high resistance to harsh environments. In this study, the studies conducted in the literature on CO₂ traps have been examined and among them, the use of carbon nanotubes, which are preferred as adsorbents due to their high adsorption properties, and their application area, are used as CO₂ adsorbers.

Alıntı / Cite

Özkan, A., Yılmaz G., Günkaya, Z., Banar M., (2022). Karbon Nanotüplerin Karbondiyoksit Tutucu Olarak Kullanımı Üzerine Bir Değerlendirme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1484-1494.

* İlgili yazar / Corresponding author: aysunozkan@eskisehir.edu.tr, +90-222-321-3550

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Özkan, 0000-0003-1036-7570	Başvuru Tarihi / Submission Date	02.01.2021
G. Yılmaz, 0000-0003-0953-2399	Revizyon Tarihi / Revision Date	25.07.2022
Z. Günkaya, 0000-0002-7553-9129	Kabul Tarihi / Accepted Date	25.07.2022
M. Banar, 0000-0003-2795-6208	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Küresel ısınma üzerinde etkin gaz olarak bilinen karbondioksitin (CO₂) atmosferdeki konsantrasyonu hızla artmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu yıllık 2,3 ppm (hacimce) olarak hızlı bir artış göstermekte ve bu artışın en büyük sebebini insan faaliyetleri oluşturmaktadır (Açıkgöz vd., 2012). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından 2017 yılında yayımlanan bir rapora göre, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu, sanayi öncesi dönemde 280 ppm iken, 2017 yılında bu değer 406,67 ppm'e yükselmiştir (Tiwari vd., 2017). Fosil yakıtlı enerji santralleri, atmosferdeki toplam karbon emisyonlarının yaklaşık %40'ından sorumludur (Lee vd., 2015). Fosil yakıtların yanmasından ortaya çıkan karbondioksitin küresel ısınmaya yaklaşık %60 oranında etkilediği tahmin edilmektedir (Altınöz ve Terzi, 2020). Bunun sonucunda, kara ve deniz sıcaklıkları artmakta, yağış miktarı ve biçimlerinin değişmesi sonucunda, küresel ortalama deniz seviyesinin yükselmesi ve kıyılardaki erozyon risklerini de artırmakta, hava ile bağlantılı doğal afetlerin şiddetinde artışlara şahit olunmaktadır. Değişen su seviyeleri, sıcaklığı ve debisi; gıda arzı, tarım, sağlık, sanayi, turizm ve ulaşım gibi birçok sektörün yanı sıra, ekosistem bütünlüğünü de etkilemektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Bu nedenle iklim değişikliğini azaltmak için fosil yakıt kullanımının sınırlanması ile CO₂'in yakalanması ve depolanması en uygulanabilir çözümler olarak öne çıkmaktadır (Dam, 2014).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) Üçüncü Değerlendirme Raporu'nda, sanayi devrimi boyunca gözlenen ısınmanın büyük oranda insan aktivitelerinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. IPCC tahminlerine göre, 2100'de atmosfere yayılan ortalama CO₂ konsantrasyonu 570 ppm'e ulaşacak ve bu durum küresel ısınmayı yaklaşık 1,9°C etkileyecektir (Dam, 2014). IPCC, üç aşamalı bir CO₂ emisyon azaltma stratejisi olarak karbon tutma ve depolamayı önermiş olup, aşamaları (i) ayırma, (ii) taşıma ve (iii) depolama şeklindedir. Bu nedenle, mevcut teknolojileri geliştirmek ve CO₂ tutmak üzere yeni teknolojiler geliştirmek için dünya çapında yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Chiang ve Juang 2017).

Dünyadaki CO₂ emisyonunun en fazla olduğu ülkeler; Çin (%28), Amerika Birleşik Devletleri (%16), AB-28 (%10), Hindistan (%6), Rusya (%6) ve Japonya (%4)'dür (Yaumi vd., 2017). Dünyadaki sera gazı emisyonlarındaki artışa bağlı iklim değişikliğini ve olumsuz etkilerini önlemeye yönelik olarak; bu gazları sınırlandırmak ve azaltmak amacıyla Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ve Kyoto Protokolü yürürlüktedir (Dam, 2014). 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris'te düzenlenen BMİDÇS 21. Taraflar Konferansı'nda (COP21) kabul edilmiştir ve anlaşma, 5 Ekim 2016 itibariyle, küresel sera gazı emisyonlarının %55'ini oluşturan en az 55 tarafın anlaşmayı onaylaması koşulunun karşılanması sonucunda, 4 Kasım 2016 itibariyle yürürlüğe girmiştir. Paris Anlaşması'nın uzun dönemli hedefi, endüstrileşme öncesi döneme kıyasla küresel sıcaklık artışının 2°C'nin olabildiğince altında tutulmasıdır. Aralık 2019'da Madrid/İspanya'da COP25 gerçekleştirilmiş ve sonuç bildirisinde öne çıkan tek madde, 2020'de karbon emisyonlarının azaltılması amacıyla ilgili ülkelerden daha geniş kapsamlı taahhütler sunulması istenmiştir. Son olarak Paris Anlaşması ile ilgili gelişmeler değerlendirilerek 2021'de Glasgow/İngiltere'de COP26 gerçekleştirilmiştir.

Sera gazı emisyonlarıyla ilgili ülkemizdeki duruma bakıldığında ise, Nisan 2019'da TÜİK tarafından Türkiye'nin 2017 yılı sera gazı emisyon istatistiklerinin açıklandığı görülmektedir. Buna göre 2017 yılında Türkiye'nin toplam seragazı emisyon miktarı, artışına devam ederek 526,3 milyon tona ulaşmış ve kişi başına düşen seragazı emisyon miktarı ise 6,6 ton CO₂eşd./kişi olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, 1990 yılına göre %140,1 artış olduğunu göstermektedir. On Birinci Kalkınma Planı'na göre, 2023 yılında yeni kurulan yenilenebilir enerji santralleri ile kaçınılan toplam CO₂ emisyonu miktarının 18,0 milyon ton olarak hedeflenmektedir. 2011- 2023 İklim Değişikliği Eylem Planına (2012) göre 2023 yılına kadar sanayi sektöründe üretilen Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) başına eşdeğer CO₂ yoğunluğunun azaltılması amaçlanmakta ve sera gazı emisyonlarının sınırlandırılmasına yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması hedeflenmektedir. 2017 yılında kümülatif CO₂ emisyonlarının yaklaşık %86,3'ü enerjiden, %13,4'ü endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından, %0,3'ü ise tarımsal faaliyetler ve atıktan kaynaklanmıştır. CO₂ emisyonlarının birincil ve ikincil alt sektör kırılımında; yakıtların yanması, çevrim ve enerji alt sektörü, mineral ürünler ve metal üretimi alt sektörlerinin ağırlığı diğerlerine göre fazladır.

Diğer yandan enerji sektörü, Türkiye'de insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağı olduğundan, Türkiye'nin Yedinci Ulusal Bildirimi'ne (2018) göre enerji verimliliği çalışmaları ile Türkiye'nin enerji yoğunluğunun (milli gelir başına tüketilen enerji) 2023 yılına kadar, 2011 yılına kıyasla %20 azaltılması

hedeflenmiştir. Dolayısıyla tüm sektörlerde CO₂ emisyonu tutulmalı, depolanmalı veya yeni ürünlere dönüştürülmelidir. CO₂ yakalama ve depolama, fosil yakıtlardan elektrik üretimi prosesleri için sürdürülebilirliğe yönelik umut verici bir tekniktir.

2. Karbondioksit Tutucu Malzemeler (Carbondioxide Adsorbent Material)

Atmosferdeki CO₂'i tutarak depolamak ve muhafaza etmek mümkündür. CO₂ tutma işlemi, kimyasal veya fiziksel olarak diğer gaz ürünlerden ayrılması işlemidir. CO₂ tutulduktan sonra basınç altında sıkıştırılarak yoğunluğu artırılır. Yoğunluğu artan CO₂ gazı, tuz yataklarına, petrol, doğal gaz, kömür yataklarına, okyanus ve derin deniz diplerine enjeksiyonla gönderilmektedir. CO₂ tutma işlemi; gazın hacmine, kısmi basıncına ve uygun bir depoya olan yakınlığı gibi özelliklere bağlıdır (Özktulu, 2014).

Fosil yakıtlardan (kömür, doğal gaz veya petrol) elektrik üretimi sonucunda oluşan CO₂'in tutulmasına yönelik olarak, yanma öncesi (pre-combustion), yanma sonrası (post-combustion) ve Oxi-yakıt yakım (oxyfuel combustion) olmak üzere üç temel yaklaşım vardır. Bunlar arasında yanma öncesi ve yanma sonrası CO₂ tutma yöntemleri; adsorpsiyon, düşük sıcaklıkta yoğunlaştırma, membran teknikleri, mineralleştirme, biyomineralleştirme ile rejeneratif uzaklaştırma olarak özetlenebilmektedir. Bunun yanı sıra son dönemlerde algilerle ilgili çalışmalar da gündemdedir (Akgül vd., 2022). Günümüzde santraller için yanma sonrası ve yanma öncesi sistemleri, CO₂'in %85-95'ini tutabilmektedir. Oxy-yakıt yakım sistemleri ise pratikte, CO₂'in hemen hemen tümünü tutabilecek düzeydedir (Beton, 2011).

En yaygın kullanılan yanma sonrası tutma yöntemleri, adsorpsiyon, kriyojenik distilasyon ve membran ayırma teknikleridir (Aaron ve Tsouris 2005; Hsu vd., 2010). Bu yöntemler içerisindeki katı madde adsorpsiyonunun diğer yöntemlere göre, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, uzun zamanlı stabilite, düşük rejenerasyon enerjisi ve düşük maliyet gibi avantajları vardır (Yaumi vd., 2017). Literatürde yaygın olarak CO₂ adsorplanmasında kullanılan malzemeler aktif karbonlar (Sevilla ve Fuertes 2011), aktif karbon fiberler (Activated carbon fibers, ACF'ler) (Choma vd., 2016), karbon nanotüpler (Carbon nanotube, CNT'ler) (Ghosh ve Ramaprabhu 2019), grafen tabakaları (Chandra vd., 2012), grafen oksit (Chowdhury vd., 2015), moleküler elek (Carruthers vd., 2012), zeolitler (Lu vd., 2008), silika bazlı malzemeler (Abd vd., 2020) ve metal-organik çerçeveler (metal-organic frameworks, MOF'lar) (Yazaydın ve diğ., 2009). Bu adsorbanlardan bazılarının, CO₂ adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablodaki değerler belirli koşullar altında, malzemelerin saf hallerindeki adsorpsiyon kapasitelerini göstermekte olup, yapılan modifikasyonlarla bu değerleri artırmak mümkündür.

Tablo 1. Literatürdeki Bazı Adsorbanların CO₂ Adsorpsiyon Kapasiteleri (CO₂ Adsorption Capacities of Some Adsorbents in Literature)

Malzemeler	Sıcaklık (K)	Adsorpsiyon Kapasitesi (mmol g ⁻¹)	Referans
Zeolit	301	2,35	(Dantas vd., 2011)
Aktif karbon Fiber	363,15	1,75	(Zhou vd., 2012)
MOF ¹	298	4,1	(Wickramaratne ve Jaroneic, 2013)
Ticari Aktif Karbon	313	2,00-2,20	(Sreńscek-Nazzal vd., 2015)
MWCNT ²	303	1,10	(Rahimi vd., 2019)

¹ MOF: Metal organik çerçeveler, ² MWCNT: Çok duvarlı karbon nanotüp

CO₂ adsorplanmasında kullanılan bu malzemelerin endüstriyel uygulamaları, adsorpsiyon kapasitesi yüksek olmasına rağmen sınırlıdır. Bunlar arasında MOF'lar mükemmel adsorpsiyon kapasitelerine rağmen, çoğu karbonlu adsorbandan, özellikle piyasada bulunan aktif karbonlardan çok daha pahalıdırlar (Yaumi vd., 2017). Baca gazı önemli miktarda su buharı içermektedir; bu nedenle, MOF'ların hidrofobiklik ve neme karşı uzun süreli stabilite açısından önemli bir gelişme göstermedikleri sürece fosil yakıtla çalışan enerji santrallerinde CO₂ adsorbanı olarak kullanılması olası değildir (Wickramaratne ve Jaroneic 2013).

CO₂ adsorbanlarının genellikle şu özelliklere sahip olmaları gerekmektedir: (i) yüksek CO₂ tutma kapasitesi, (ii) yüksek adsorpsiyon oranı, (iii) adsorpsiyon bölgeleri için diğer moleküllere (özellikle N₂) karşı yüksek seçicilik, (iv) kolay rejenerasyon, (v) düşük maliyet ve yüksek kullanılabilirlik, (vi) tekrarlanan adsorpsiyon / desorpsiyon döngülerinden sonra yüksek CO₂ adsorpsiyon kapasitesi ve (vii) yeterli mekanik mukavemet (Chiang ve Juang 2017; vd., 2002).

CO₂ adsorpsiyon malzemeleri, boruların tıkanması ve yeniden kullanılmaması gibi sorunlara da yol açabilmektedir. Bu nedenle, sadece yeterli CO₂ tutma özelliği değil, aynı zamanda oldukça esnek ve mekanik olarak yeterince güçlü olması gereken malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, çeşitli karbon katkılı polimerlerden oluşan kompozit malzemeler, CO₂ tutma için geliştirilebilmektedir. Ek olarak, bu tür kompozit malzemelerin CO₂ seçiciliğini ve adsorpsiyonunu arttırmak için çeşitli fonksiyonel gruplar da kullanılmaktadır (Zainab vd., 2017). Tablo 2'de literatür çalışmalarının adsorbanların fonksiyonel grup öncesinde ve sonrasındaki adsorpsiyon kapasitesilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada, saf haldeki adsorbanlara fonksiyonel grup eklendiğinde, CO₂ adsorpsiyon kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Amin fonksiyonel grubu ve CO₂ arasındaki reaksiyon, susuz koşullar altında amonyum karbonat üretmektedir. Böylece bu durum korozyonun ortadan kaldırılmasını arttıracak ve rejenerasyon maliyeti düşecektir (Yaumi vd., 2017). Aktif karbonlar ve zeolitler, araştırma bağlamında en sık kullanılan adsorbanlardır. CO₂ adsorpsiyon çalışmalarında genellikle yüksek basınçlarda zeolitler, düşük basınçlarda aktif karbon ve karbonlu malzemeler tercih edilmiştir. Bunun en önemli nedeni zeolitler nem ile temas ettiğinde, adsorpsiyon kapasitesinde azalma meydana gelmesidir. Enerji santrallerindeki baca gazları su buharı içerdiğinden, adsorbanların suya hassasiyeti önemli bir sorundur (Sun vd., 2013). Bu yüzden zeolitler CO₂ adsorbanı olarak çok sık kullanılmamıştır. Bununla birlikte, adsorban olarak kullanılan karbonlu malzemelerin, zeolitlere göre avantajları, maliyetin daha düşük olması, düşük adsorpsiyon ısısından dolayı rejenerasyon için gereken düşük enerji ve ticari olarak üretim kolaylığıdır (Qasem vd., 2017). Gözenekli karbonlu malzemeler, düşük maliyet, yüksek termal kararlılık, kullanılabilirlik, geniş yüzey alanı, tasarımı kolay gözenek yapısı, suya karşı yüksek direnç gösterme gibi çok çeşitli çalışma koşullarında verimlilik gibi avantajlara sahiptirler ve bu özelliklerinden dolayı CO₂ adsorpsiyonu için tercih edilmektedirler (Chiang ve Juang 2017; Plaza vd., 2010). CNT'lerin, geniş bir yüzey alanına sahip olan içi boş ve katmanlı yapıları nedeniyle organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip oldukları da kanıtlanmıştır (Shawky vd., 2011). Gözenekli karbonlu malzemeler arasında en fazla çalışma, aktif karbonun CO₂ adsorpsiyonu ile ilgili yapılmıştır (Beton 2011; Thote vd., 2010; Maroto-Valer 2008).

Aktif karbonun modifiye edildiği Lu arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; CNT'ler, granül aktif karbon (GAC) ve zeolitleri, 3-aminopropiltiletoksisilan (APTS) ile modifiye etmişler ve elde edilen modifiye adsorbanları CO₂ tutucu olarak incelemişlerdir. CNT'nin ve zeolitin modifiye öncesi ve sonrasındaki adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 2'de verilmektedir. Aynı koşullar altında, modifiye edilmiş CNT'ler, en yüksek CO₂ adsorpsiyon performansı sergilemişlerdir (Lu vd., 2008).

Tablo 2. Adsorbanların Fonksiyonel Grup Öncesinde ve Sonrasındaki Adsorpsiyon Kapasitesileri (Adsorption Capacities before and after Functional Group of Adsorbents)

Adsorbanlar	Fonksiyonel Grup	Sıcaklık (K)	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)	Referans
CNT	-	298	69,2	(Lu vd., 2008)
CNT	APTS ¹	298	96,3	(Lu vd., 2008)
Aktif Karbon	-	303	35,36	(Thote vd., 2010)
Aktif Karbon	N	303	41,0	Thote vd., 2010
Zeolit	-	298	63,5	(Lu vd., 2008)
Zeolit	APTS ¹	298	82,4	(Lu vd., 2008)

¹ APTS: 3-aminopropiltiletoksisilan

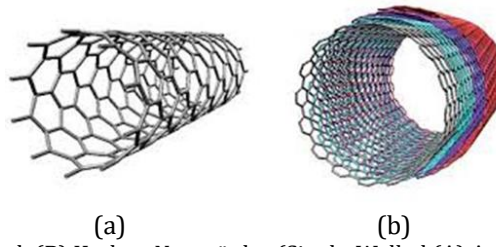
Yapılan çalışmalarda aktif karbonun, metal ve azot gruplarıyla yapılan modifikasyon işleminin CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Beton yaptığı çalışmada, zeytin çekirdeğinden ürettiği aktif karbonlara, demir, bakır ve vanadyum metallerinin ilave edilmesi ile oluşan modifikasyon işlemlerinin CO₂ adsorpsiyon kapasitelerine etkisini incelemiştir (Beton, 2011). Elde edilen adsorpsiyon verileri incelendiğinde, yapılan modifikasyon işlemlerinin aktif karbonun CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Chiang ve Juang'ın yaptıkları çalışmada da aktif karbonların metal oksitlerle modifiye edilmesinin adsorpsiyon kapasitelerini arttırdığı görülmüştür (Chiang ve Juang, 2017). Benzer şekilde Maroto-Valer vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, aktif karbonun yüzeyine modifiye edilen azot gruplarının da CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığını belirlemişlerdir.

Karbon tutma ve depolama alanında her geçen gün, yeni adsorpsiyon malzemeleri veya adsorbanların geliştirilmesi amacıyla hem deneysel hem de simülasyon yöntemleri kullanılarak araştırmalar yapılmaktadır (Ben-Mansour vd., 2016). Mezogözenekli karbon, karbon nanotüpler, grafen gibi karbonlu adsorbanlar, düşük

maliyetleri, kolay bulunabilirlikleri, düşük nem duyarlılığı, kolay yenilenebilirlik ve düşük rejenerasyon maliyetleri nedeniyle CO₂ yakalama için en etkili malzemelerdir (Sharma ve Dhir, 2021).

3. Karbondioksit Tutucu Olarak Karbon Nanotüplerden Kompozit Malzeme Üretimi (Production Of Composite Materials From Carbon Nanotubes As A Carbon Dioxide Adsorbent)

Karbon nano yapılarından birisi olan ve adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan CNT'ler ilk olarak 1991 yılında geliştirilmişlerdir. CNT'ler, grafen düzlemi örülü yapının bir silindir şeklinde sarılması ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılmasıyla oluşurlar. Şekil 1'de gösterildiği gibi tek ve çok duvarlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek duvarlı karbon nanotüpler (Single Walled Carbon Nanotube: SWCNT) grafen katmanı bir levhanın çevresine sarıldığı zaman elde edilmekte olup, çapları yaklaşık 0,7-10 nm'dir. Çok duvarlı karbon nanotüpler (Multi-Walled Carbon Nanotube: MWCNT) ise üst üste birkaç grafenin konulup katlanmasıyla iç içe geçmiş CNT'lerden oluşmaktadır. Karbon nano yapılar; çok küçük boyutlarda olmaları, sadece karbon elementinden oluşmaları, fiziksel özelliklerinin detaylı olarak belirlenebilmesi ve deneylerde elde edilen verilerin karşılaştırılabilir olması nedeniyle nanobilimde önemli bir yere sahiptirler. Karbon, nano yapı halde doğal olarak bulunduğu gibi laboratuvar şartlarında da üretilebilmektedir.



Şekil 1. Tek Duvarlı (A) ve Çok Duvarlı (B) Karbon Nanotüpler (Single-Walled (A) And Multi-Walled (B) Carbon Nanotubes)

CNT üretiminde yaygın olarak ark boşaltımı, lazer aşındırma ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri kullanılır. Ark boşaltım metodu ucuz, basit ve yüksek sıcaklık gerektiren bir yöntem olup, tek ve çok duvarlı CNT üretmek mümkündür. Bu metot yüksek sıcaklık gerektirdiği için dezavantajlıdır. Lazer aşındırma yönteminde lazer ışını ile inert ortamda, grafit ve metal katalizör parçalarından oluşan karışım buharlaştırılarak CNT elde edilmektedir. Maliyeti yüksek olduğundan, endüstriyel üretim için elverişli değildir. CVD yöntemi ise, hidrokarbon içeren gazın metal katalizör yardımıyla nanotüp haline getirilmesidir. Bu yöntem reaksiyon süresi ve sıcaklığı, katalizör çeşidi, karbon kaynağı ve miktarı, ortam basıncı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ticari CNT üretiminde CVD metodu yaygın olarak kullanılmaktadır (Köse, 2016).

CNT'ler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ve boy/çap oranları büyük olan nanomalzemelerdir. CNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yüzeyel özelliklerine bağlıdır. CNT'ler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elemanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı iyileştirmeler yapılmalıdır. CNT'lerin matris tarafından iletilebilmesi, adhezyon gibi etkenler, CNT'lerin performansını etkileyen en önemli konulardır (Eskizeybek, 2012).

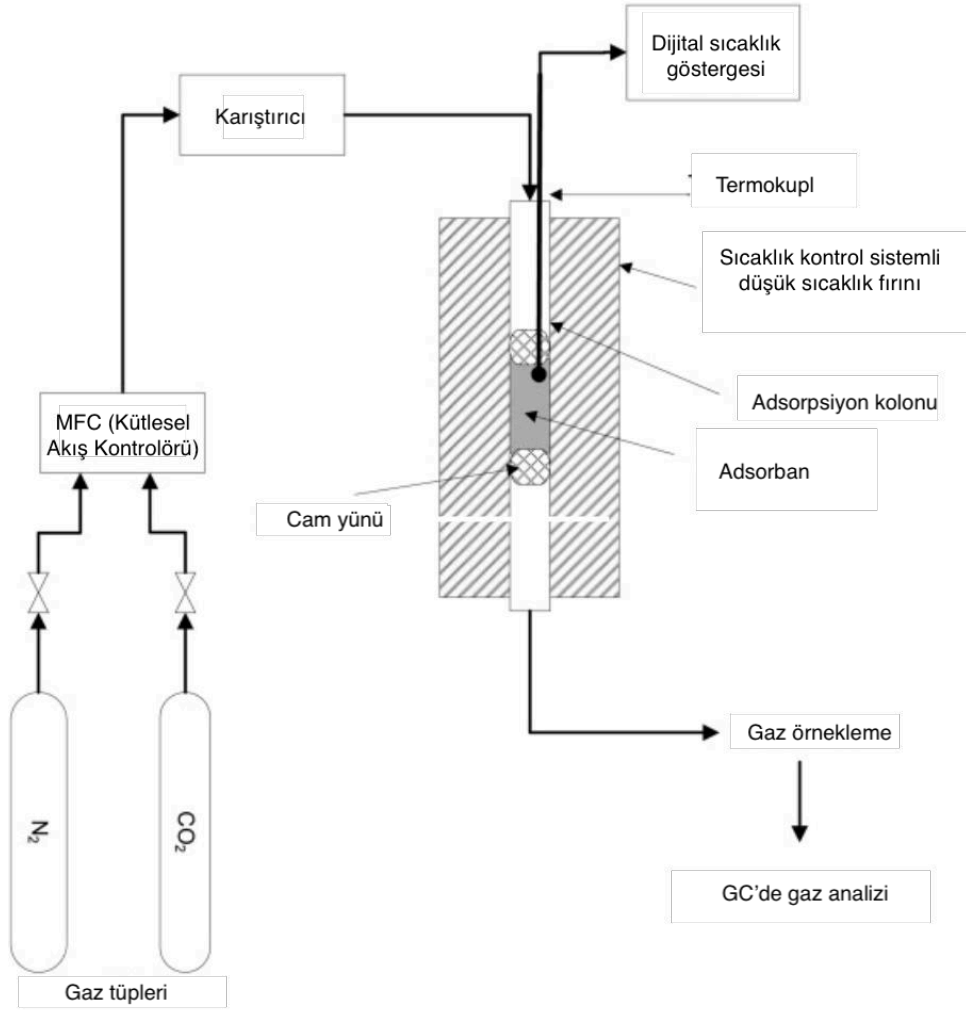
CNT'ler, ortam şartları değiştiğinde bu değişim karşısında hassas olduklarından, biyo-sensör, gaz sensörü, sıcaklık sensörü gibi uygulamalarda; nano boyutlarda olduklarından kapasitör ve gaz depolayıcı gibi nano düzeneklerde; yüksek filtreleme özellikleri nedeniyle filtre ve adsorban olarak; yüksek mukavemetleri sebebiyle de kompozit malzeme üretimi gibi pek çok alanda kullanılmaktadırlar.

Birden fazla malzemenin değişik tekniklerle bir araya getirildiği, amaca uygun özellikler taşıyan kompozit malzemeler birçok endüstri alanında geleneksel malzemelerin yerini almıştır. Özellikle mühendislik alanında yaşanan gelişmeler sayesinde yüksek dayanım/yoğunluk ve elastiklik modülü/yoğunluk oranı elde edilmesiyle daha üstün nitelikli kompozit malzeme üretimi ve performans özellikleri üzerine yapılan araştırma faaliyetleri de artarak devam etmektedir (Korkmaz vd., 2016).

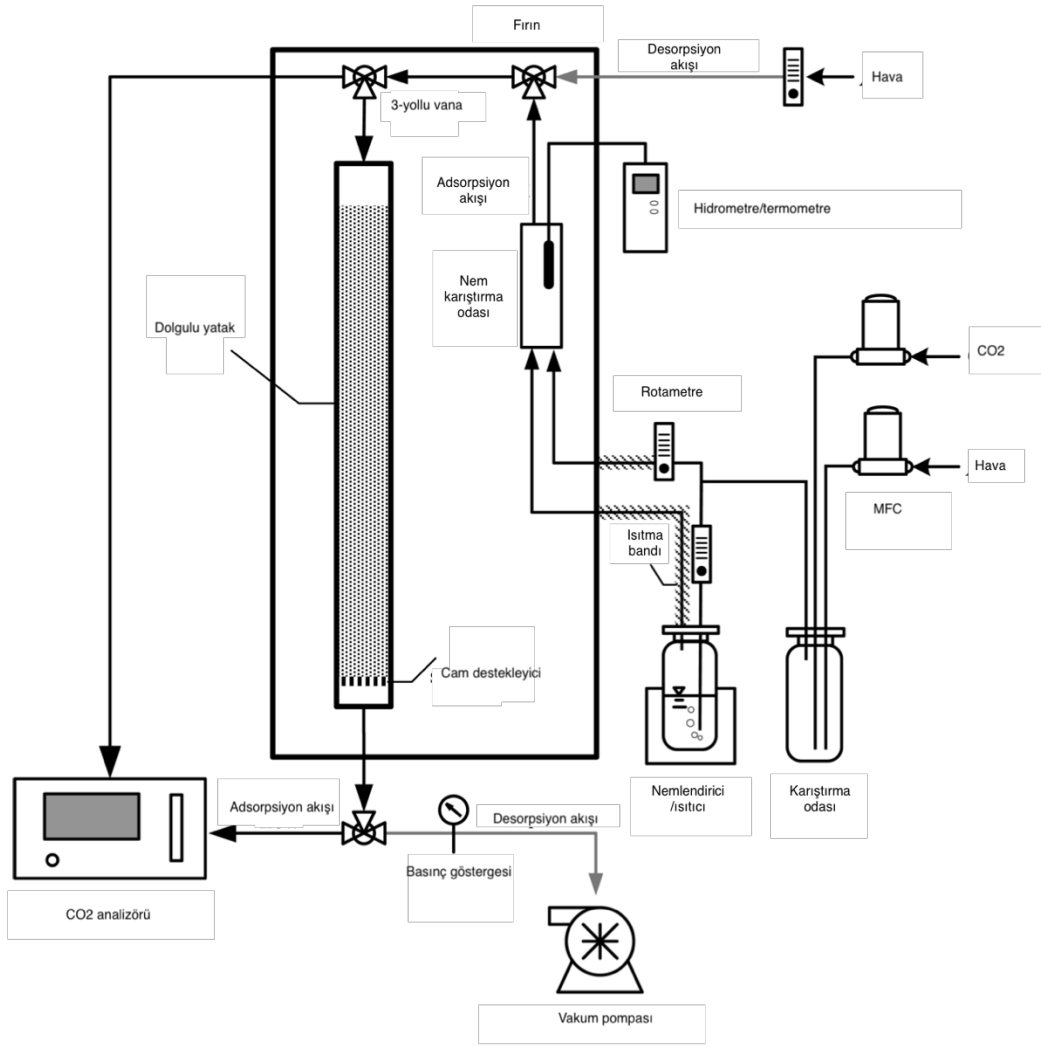
Çeşitli katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, kompozit malzemenin katkısız kompozit malzemelere oranla fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlandığı görülmüştür. Ancak, nanotakviyeli kompozitlerde en önemli nokta nanotakviyenin organik fazda iyi bir şekilde dağılarak topaklanma oluşturmamasıdır. Nanotakviyeli kompozit malzemelerde, kullanım alanına uygun olarak malzemenin hafiflemesi hedeflenirken, mekanik değerlerin düşmemesi de önemli bir husustur (Öner vd., 2017).

CO₂ tutucu olarak kullanılan kompozitler, iki veya daha fazla malzemenin birleşiminden oluşan, bileşenlerin tek başına elde edemediği yüzeyel özelliklere sahip, yapay bir kombinasyonu ile üretilen malzemelerdir (Yaumi vd., 2017).

Yapılan araştırmalarda adsorbanlar arasında, CNT'nin CO₂'in tutulması için umut verici bir adsorban olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, MWCNT'lerin, SWCNT'lere kıyasla daha iyi CO₂ adsorbanı olduğu kabul edilmektedir (Shukrullah vd., 2016). MWCNT'ler, yüzey alanının fazla olması, mekanik mukavemeti ve termal stabilitesinin yüksek olması nedeniyle CO₂ adsorplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rahimi vd., 2019). CNT'lerin CO₂ adsorpsiyonunda kullanımıyla ilgili tipik bir deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir. Bunun yanı sıra su buharına karşı seçiciliğin ve desorpsiyon özelliklerinin araştırıldığı daha kompleks bir deney düzeneği de Şekil 3'de görülmektedir.

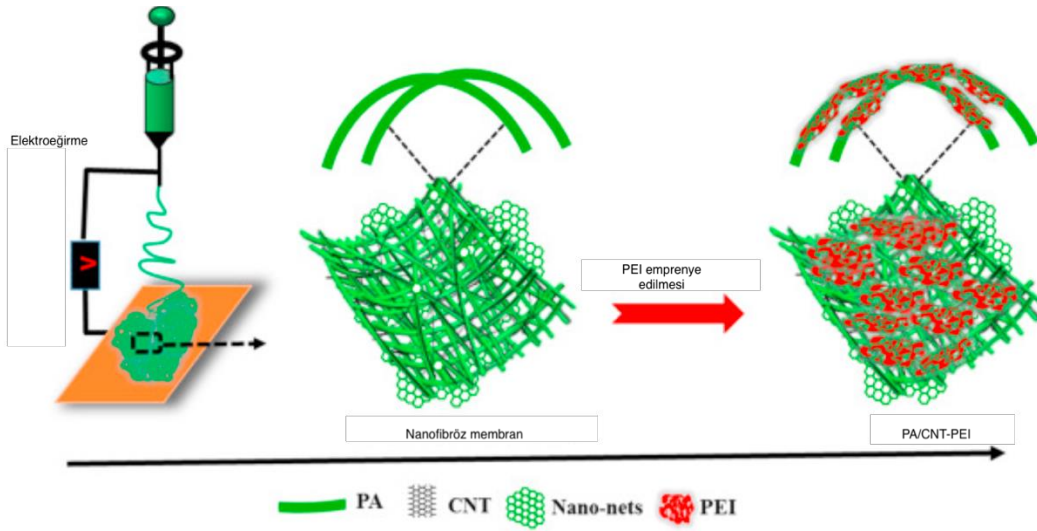


Şekil 2. Tipik Bir CO₂ Adsorpsiyon Deney Düzeneği (A Typical CO₂ Adsorption Experiment Setup) (Gui vd., 2013)



Şekil 3. Nemlendirici ve Desorpsiyon İçeren CO₂ Adsorpsiyon Deney Düzeneği (CO₂ Adsorption Experimental Setup Including Humidifier And Desorption) (Su vd., 2011)

Modifiye edilmiş CNT'lerin CO₂ tutucu olarak kullanımı ile ilgili farklı çalışmalar mevcuttur (Firdaus vd., 2021). Amin grupları birçok bileşikle reaksiyona girme yeteneğine sahiptir (Shen vd., 2007). Nitekim, amin ile modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT-NH₂), MWCNT'ye göre CO₂ adsorpsiyon kapasitesinde artışa sebep olduğu görülmüştür (Sun vd., 2013; Gui vd., 2013; Lourenço vd., 2021). Ye vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, 298K sıcaklıkta tetraetilenpentamin (CNTs-TEPA) ile modifiye edilmiş CNT'lerin karbon tutma kapasitesinin 2,97 mmol/g olduğunu, aynı koşullardaki ham CNT'nin adsorpsiyon kapasitesinin ise 0,5 mmol/g olduğu bulunmuştur. Zohdi vd.'nin (2019) yaptıkları çalışmada, aminle modifiye edilmiş MWCNT'leri CO₂ adsorpsiyon kapasitesini araştırmak için kullanmışlar ve Lewis baz özelliklerinden dolayı amin fonksiyonel gruplarının MWCNT yüzeyinde bulunmasının CO₂ adsorpsiyonunu artırdığını belirlemişlerdir (Şekil 4).



Şekil 4. PEI Emprenye Edilmiş PA/CNT Kompozit Nanofibröz Membranların Şematik Gösterimi (Schematic Illustration of PEI Impregnated PA/CNT Composite Nanofibrous Membranes) (Zohdi vd., 2019)

Su vd.'nin (2011) yaptıkları çalışmada CNT'lerin 3-aminopropiltrietoksisilan (APTES) ile modifikasyonunun CO₂ adsorpsiyon kapasitesini nasıl etkilediğini incelemişler ve CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu adsorbanın CO₂ adsorpsiyon kapasitesini 293 K sıcaklıkta yaklaşık 2,59 mol/kg olarak bulmuşlar ve bu modifikasyon işleminin CO₂ adsorpsiyon potansiyelini geliştirmek için etkili bir yöntem olacağını doğrulamışlardır.

CNT'lerin, geniş bir yüzey alanına sahip olan içi boş ve katmanlı yapılar olmaları nedeniyle organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için de iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip oldukları bilinmektedir (Rahimi vd., 2019). CNT'leri kimyasal olarak aktif hale getirmek için yüzey aktif maddesi eklenmesi, CO₂ adsorplama potansiyellerini artırabilmektedir. Lee ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada MWCNT'ler üzerine polietileniminin emprenye edilmesiyle CO₂ adsorpsiyon kapasitesinin %200 oranında arttığı görülmüştür (Lee vd., 2015).

Tablo 3'de literatür çalışmalarının CNT'nin modifikasyon öncesi ve sonrasındaki sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Saf CNT'lerin modifiye edildikten sonra yüzey alanında azalma, CO₂ adsorpsiyon kapasitelerinde artış görülmüştür. Modifikasyondan sonra adsorbanların gözenek yapıları değişmektedir. Modifikasyon işleminden sonra adsorbanların yüzey alanındaki azalmasının sebebi, gözenek girişlerinin tıkanmasından kaynaklıdır.

Tablo 3. CNT'nin Modifikasyon Öncesi ve Sonrasındaki Adsorpsiyon Kapasiteleri (Adsorption Capacities Before And After CNT Modification)

Adsorban Malzeme	Koşullar	Yüzey Alanı (m ² g ⁻¹)		CO ₂ adsorpsiyon kapasitesi (mmol/g)		Referans
		Saf Adsorban	Modifiye edilmiş adsorban	Saf Adsorban	Modifiye edilmiş adsorban	
CNT/PEI ¹	T=298K P= 1 bar	272	174	0,61	2,13	(Lee vd., 2015)
Fe/Fe ₃ C@CNTs	T=298 K P= 20 bar	392,3	196,8	7,4	15,4	(Ghosh ve Ramaprabhu, 2019)
CNT/DAP ²	T= 303 K P=17,3 bar	167,2	112,8	1,10	2,10	(Rahimi vd., 2019)
CNT/TEPA	T= 298 K P=0,02 bar	87,03	8,94	0,50	2,97	(Ye vd., 2012)
CNT/APTS	T= 293 K P= 1 bar	310,75	15,87	0,63	1,16	(Su vd., 2011)
CNT/PEI ¹	T=343 K P=1 bar	54,10	26,28	0,22	1,12	(Zhou vd., 2018)

¹ PEI: Polietilenimin, ² DAP: 1,3-diaminopropan

Literatürde PVA ve kitosanın CNT ile birlikte üretildiği kompozit malzemelerle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Köysüren ve Köysüren yaptıkları çalışmada hazırladıkları PVA/CNT kompozitlerinin UV radyasyonu altındaki katı faz fotokatalitik bozunma özelliğini incelemişlerdir (Köysüren ve Köysüren, 2018). PVA nanolifler ile kompozit

nanolifler karşılaştırıldığında, kompozit nanoliflerin UV radyasyonu altındaki katı-faz fotokatalitik bozunma veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Shawky ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kitosan ve CNT ile kompozit malzeme elde edilmiş, bu kompozit malzemenin atıksularda Hg (II) giderimi yaptığı görülmüştür (Shawky vd., 2011). PVA ve kitosanın, metal nanopartikülleri gibi farklı malzemelerle hazırlanmış kompozitlerinin mangan (Abdeen vd., 2015), bakır (Li vd., 2015), çinko (Dolgormaa vd., 2018) ve katyonik boya adsorpsiyonu (Mahdavinia vd., 2014) ile ilgili çalışmalar da mevcuttur.

Tablo 4'te gösterildiği gibi Osler ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kitosanın, CNT yüzeyine emprenye edilmesinin CNT'nin adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı görülmektedir. Bu çalışmada, MWCNT'ler tarafından adsorbe edilen CO₂ miktarının, kitosanın MWCNT'lerin yüzeyine modifiye edilmesiyle %650 oranında artırılabilceğini göstermektedir. Bu oran başka malzeme ile modifiye edilen CNT'lere kıyasla daha yüksektir. Böylece kitosan, CO₂ adsorpsiyonu için CNT ile modifiye edilmelidir ve bu CNT'nin CO₂ adsorpsiyon kapasitesini geliştirebilmektedir (Osler vd., 2017).

Tablo 4. Kitosan ve Kitosan/MWCNT'nin Adsorpsiyon Kapasitesi (Adsorption Capacities of Chitosan and Chitosan/MWCNT)

Adsorban Malzeme	Koşullar	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg CO ₂ / g adsorban)	Referans
Kitosan	T= 318 K P= 1 bar	9	(Osler vd., 2017)
MWCNTs	T=318 K P=1 bar	0,4	(Osler vd., 2017)
Kitosan/ MWCNTs	T=318K P= 1 bar	3	(Osler vd., 2017)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu makalede kullanım kolaylığı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve seçiciliği, düşük rejenerasyon enerjisi ve düşük maliyetli olması nedeniyle CO₂ adsorpsiyonu için yaygın olarak kullanılan katı sorbentlere odaklanılmıştır. Bu literatür taramasından çıkarılan sonuçlara göre, kompozit malzemelerin metal ve azot gruplarıyla yapılan modifikasyon işleminin sonucunda CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Bu makalede, son yıllarda nanobilim alanında pek çok sektörde kullanılmaları ve özellikle artan CO₂ emisyonlarının azaltılması konusunda, mekanik mukavemeti, içi boş yapısı, yüksek spesifik yüzey alanı ve kimyasal stabilitesi nedeniyle belirli koşullar altında gaz adsorpsiyonu için dikkat çeken CNT'lerle ilgili çalışmalar irdelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde CNT'lerin genellikle CVD yöntemi ile üretildiği görülmektedir. CNT'lerin CVD yöntemiyle metal katalizörlüğünde üretildiği göz önüne alınırsa, metal ilave edilmiş CNT'nin adsorban olarak kullanılabilceği öngörülmüştür. Literatürdeki çalışmalara göre, CNT'lerin modifiye edildikten sonra yüzey alanında azalma görülürken, CO₂ adsorpsiyon kapasitelerinde artış görülmüştür. Ayrıca, kitosan gibi doğal polimerler veya Poli Vinil Alkol (PVA) gibi yapay polimerlerle üretilecek CNT kompozitlerinin yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olabileceği düşünülmektedir. Söz konusu malzeme ve modifikasyonlarla yeni CO₂ adsorpsiyon çalışmalarının literatüre ışık tutacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 20ADP184 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aaron, D., Tsouris, C., 2005. A review – Separation of CO₂ from flue gas. *Separation Science and Technology*, 40 (1-3), 321-348.
- Abd, A.A., Naji, S.Z., Hashim, A.S., Othman, M.R., 2020. Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104142.
- Abdeen, Z., Mohammad, S. G., Mahmoud, M. S., 2015. Adsorption of Mn (II) ion on polyvinyl alcohol/chitosan dry blending from aqueous solution. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 3, 1-9.
- Açıkgöz, M. A., Sargin, O., Kara, Ş. M., 2012. Karbondioksit Emisyonunun Azaltılmasında Yeni Yaklaşımlar. *Ekoloji 2012 Sempozyumu*, 03-05 Mayıs 2012, 1-7.
- Akgül, G., Varol, M., Erdem Ünşar, A., 2022. CO₂ Derişiminin ve Azot Stresinin *Chlorella Vulgaris* Mikroalg Kültürünün CO₂ Tutma Verimine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 698-721.
- Altınöz, E., Terzi, S., 2020. Karayollarında Üstyapı Tipinin Karbon Ayak İzi Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve*

- Tasarım Dergisi, 8(2), 451-459.
- Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Bamidele, O. E., Basha, M., Qasem, N. A. A., Peedikakkal, A., ... Ali M., 2016. A review–Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations. *Applied Energy*, 161, 225-255.
- Beton, İ., 2011. Zeytin Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbonla CO₂ Adsorpsiyonunun İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Türkiye.
- Chandra, V., Yu, S. U., Kim, S. H., Yoon, Y. S., Kim, D. Y., Kwon, A. H., ... Kim, K. S., 2012. Highly selective CO₂ capture on N-doped carbon produced by chemical activation of polypyrrole functionalized graphene sheets. *Chemical communications*, 48 (5), 735-737.
- Chiang, Y. C., Juang, R. S., 2017. A review – Surface modifications of carbonaceous materials for carbon dioxide adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 214-234.
- Choma, J., Osuchowski, L., Marszewski, M., Dziura, A., Jaroniec, M., 2016. Developing microporosity in Kevlar®-derived carbon fibers by CO₂ activation for CO₂ adsorption. *Journal of CO₂ Utilization*, 16, 17-22.
- Carruthers, J. D., Petruska, M. A., Sturm, E. A., Wilson, S. M., 2012. Molecular sieve carbons for CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 154, 62-67.
- Chowdhury, S., Parshetti, G. K., Balasubramanian, R., 2015. Post-combustion CO₂ capture using mesoporous TiO₂/graphene oxide nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 263, 374-384.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012. Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı 2011–2023.
- Dam M. M., 2014. Sera gazı emisyonlarının makroekonomik değişkenlerle ilişkisi: OECD ülkeleri için panel veri analizi. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye.
- Dantas, T. L., Luna, F. T., Silva Jr, I. J., Torres, A. E., De Azevedo, D. C. S., Rodrigues, A. E., Moreira, R. F. P. M. 2011. Modeling of the fixed-bed adsorption of carbon dioxide and a carbon dioxide-nitrogen mixture on zeolite 13X. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28 (3), 533-544.
- Dolgormaa A., Lv C. J., Li Y., Yang J., Yang J. X., Chen P., Wang H.P., Huang J., 2018. Adsorption of Cu (II) and Zn (II) ions from aqueous solution by gel/PVA-modified super-paramagnetic iron oxide nanoparticles. *Molecules*, 23(11), 2982.
- Eskizybek, V., 2012. Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye.
- Firdaus, R.M., Desforjes, A., Mohamed, A.R., Vigolo, B., 2021. Progress in adsorption capacity of nanomaterials for carbon dioxide capture: A comparative study. Progress in adsorption capacity of nanomaterials for carbon dioxide capture: A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129553.
- Ghosh, S., Ramaprabhu, S., 2019. Green synthesis of transition metal nanocrystals encapsulated into nitrogen-doped carbon nanotubes for efficient carbon dioxide capture. *Carbon*, 141, 692-703.
- Gui, M. M., Yap, Y. X., Chai, S. P., Mohamed, A. R., 2013. Multi-walled carbon nanotubes modified with (3-aminopropyl) triethoxysilane for effective carbon dioxide adsorption. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14, 65-73.
- Hsu, S. C., Lu, C., S F., Zeng, W., Chen, W., 2010. Thermodynamics and regeneration studies of CO₂ adsorption on multiwalled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Science*, 65 (4), 1354-1361.
- Korkmaz, N., Çakak, E., Dayık, M., 2016. Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20 (2), 338-353.
- Köse, Ü., 2016. Karbon Nanotüp Esaslı Yüksek Performanslı Liflerin Üretim Yöntemleri, Mekanik ve Yapısal Özellikleri Ve Uygulama Alanları. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Köysüren, H. N., Köysüren, Ö., 2018. Povinil alkol kompozit nanoliflerin hazırlanması ve katı-faz polivinil alkolün fotokatalitik bozunması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1411-1418.
- Lee, M. S., Lee, S. Y., Park, S., 2015. Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotubes impregnated with polyethyleneimine for carbon dioxide capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 3415-3421.
- Li, L., Wang, Z., Ma, P., Bai, H., Dong, W., Chen, M., 2015. Preparation of polyvinyl alcohol/chitosan hydrogel compounded with graphene oxide to enhance the adsorption properties for Cu (II) in aqueous solution. *Journal of Polymer Research*, 22 (8), 150.
- Lourenço, M.A.O., Fontana, M., Jagdale, P., Pirri, C.F., Bocchini, S., 2021. Improved CO₂ adsorption properties through amine functionalization of multi-walled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128763.
- Lu, C., Bai, H., Wu, B., Su, F., ve Hwang, J. F., 2008. Comparative Study of CO₂ Capture by Carbon Nanotubes, Activated Carbons, and Zeolites. *Energy & Fuels*, 22, 3050-3056.
- Mahdavinia, G. R., Massoudi, A., Baghban, A., Shokri, E., 2014. Study of adsorption of cationic dye on magnetic kappa-carrageenan/PVA nanocomposite hydrogels. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (3), 1578-1587.
- Maroto-Valer, M.M., Lu, Z., Zhang, Y., Tang, Z., 2008. Sorbents for CO₂ capture from high carbon fly ashes. *Waste Management*, 28 (11), 2320-2328.
- Osler, K., Twala, N., Oluwasina, O.O., Daramola, M.O., 2017. Synthesis and Performance Evaluation of Chitosan/Carbon Nanotube (Chitosan/MWCNT) Composite Adsorbent for Post-combustion Carbon Dioxide Capture. *Energy Procedia*, 114, 2330-2335.
- Öner, G., Önal, H. Y., Pekbey, Y., 2017. Karbon nanotüp katkılı camlifi-epoksi kompozitlerin termal ve eğilme özelliklerinin araştırılması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 8 (4), 805-816.
- Özkutlu, M., 2014. İyonik Sıvı - Amin İkili Sisteminin CO₂ Absorpsiyonu Kinetiği. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Plaza, M. G., García, S., Rubiera, F., Pis J. J., Pevida, C., 2010. Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: comparison of different regeneration strategies. *Chemical Engineering Journal*, 163 (1-2), 41-47.
- Qasem, N. A., Ben-Mansour, R., Habib, M. A., 2017. Enhancement of adsorption carbon capture capacity of 13X with optimal incorporation of carbon nanotubes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 8 (3), 219-230.
- Rahimi, K., Riahi, S., Abbasi, M., Fakhroueian, Z., 2019. Modification of multi-walled carbon nanotubes by 1, 3-diaminopropane to increase CO₂ adsorption capacity. *Journal of Environmental Management*, 242, 81-89.

- Sevilla, M., Fuertes, A. B., 2011. Sustainable porous carbons with a superior performance for CO₂ capture. *Energy & Environmental Science*, 4 (5), 1765-1771.
- Sharma, H., Dhir, A., 2020. Capture of carbon dioxide using solid carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 851-873.
- Shawky, H. A., El-Aassar, A.H.M., Abo-Zeid, D.E., 2011. Chitosan/Carbon Nanotube Composite Beads: Preparation, Characterization, and Cost Evaluation for Mercury Removal from Wastewater of Some Industrial Cities in Egypt. *Journal of Applied Polymer Science*, 125, E93-E101.
- Shen, J., Huang, W., Wu, L., Hu, Y., Ye, M., 2007. Study on amino-functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering*, 464 (1-2), 151-156.
- Shukrullah, S., Mohamed, N. M., Shaharun, M. S., Ullah, S., Naz, M. Y., 2016. Effective CO₂ adsorption on pristine and chemically functionalized MWCNTs. In *AIP Conference Proceedings*, 1787 (1), 050025.
- Sreńscek-Nazzal, J., Narkiewicz, U., Morawski, A. W., Wróbel, R. J., & Michalkiewicz, B. 2015. Comparison of optimized isotherm models and error functions for carbon dioxide adsorption on activated carbon. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60 (11) 3148-3158.
- Su, F., Lu, C., Chen, H. S., 2011. Adsorption, desorption, and thermodynamic studies of CO₂ with high-amine-loaded multiwalled carbon nanotubes. *Langmuir*, 27 (13), 8090-8098.
- Sun, N., Sun, C., Liu, H., Liu, J., Stevens, L., Drage, T., ... Sun, Y., 2013. Synthesis, characterization and evaluation of activated spherical carbon materials for CO₂ capture. *Fuel*, 113, 854-862.
- Thote, J.A., Iyer, K.S., Chatti, R., Labhsetwar, N.K., Biniwale, R.B., Rayalu, S.S., 2010. In Situ Nitrogen Enriched Carbon for Carbon Dioxide Capture. *Carbon*, 48, 396-402.
- Tiwari, D., Goel, C., Bhunia, H., Bajpai, P. K., 2017. Melamine-formaldehyde derived porous carbons for adsorption of CO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, 197, 415-427.
- Wickramaratne, N. P., Jaroniec, M., 2013. Activated carbon spheres for CO₂ adsorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5 (5), 1849-1855.
- Wickramatne, N., Jaroniec, M., 2013. Importance of small micropores in CO₂ capture by phenolic resin-based activated carbon spheres. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 112-116.
- Yaumi, A. L., Bakar, M. A., Hameed, B. H., 2017. Recent advances in functionalized composite solid materials for carbon dioxide capture. *Energy*, 124, 461-480.
- Yazaydin, A. O., Snurr, R. Q., Park, T. H., Koh, K., Liu, J., LeVan, M. D., ... Low, J. J., 2009. Screening of metal-organic frameworks for carbon dioxide capture from flue gas using a combined experimental and modeling approach. *Journal of the American Chemical Society*, 131 (51), 18198-18199.
- Ye, Q., Jiang, J., Wang, C., Liu, Y., Pan, H., Shi, Y., 2012. Adsorption of low-concentration carbon dioxide on amine-modified carbon nanotubes at ambient temperature. *Energy & Fuels*, 26 (4), 2497-2504.
- Yong, Z., Mata, V., Rodrigues, A. E., 2002. Adsorption of carbon dioxide at high temperature—a review. *Separation and Purification Technology*, 26 (2-3), 195-205.
- Zainab, G., Iqbal, N., Babar, A. A., Huang, C., Wang, X., Yu, J., Ding, B., 2017. Free-standing, spider-web-like polyamide/carbon nanotube composite nanofibrous membrane impregnated with polyethyleneimine for CO₂ capture. *Composites Communications*, 6, 41-47.
- Zhou Z., Balijepalli S. K., Nguyen-Sorenson A. H., Anderson C. M., Park J. L., ve Stowers K. J., 2018. Steam-stable covalently bonded polyethylenimine modified multiwall carbon nanotubes for carbon dioxide capture. *Energy & Fuels*, 32(11), 11701-11709.
- Zhou, Z., Wang, Z., Zuo, R., Zhou, Y., Cao, X., Cheng, K., 2012. The surface structure and chemical characters of activated carbon fibers modified by plasma. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7(S2), 245-252.
- Zohdi S., Anbia M., Salehi S., 2019. Improved CO₂ adsorption capacity and CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ selectivity in novel hollow silica particles by modification with multi-walled carbon nanotubes containing amine groups. *Polyhedron*, 166, 175-185.



A LITERATURE REVIEW ABOUT EFFECTS of PHASE CHANGING MATERIALS on COMPRESSIVE STRENGTH and THERMAL CONDUCTIVITY of BUILDING COMPONENTS

Ali İhsan ÇELİK^{1*}, Ramazan KAYABAŞI¹, Ahmet ŞENER¹

¹Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat bölümü, Kayseri, Türkiye

Keywords

Phase Change Material,
Compression Strength,
Thermal Conductivity,
Encapsulation Size,
Cement-Based Material.

Abstract

One of the important areas of Phase Changing Materials (PCM) is to increase the heat retention capacity of building components. Researches are carried out on the heat retention capacities of PCMs to store energy in building components and to ensure building temperature control. The use of PCM in building components has become an important tool for energy saving, since ensuring building temperature control in summer and winter conditions is a situation that requires continuity. This feature provided to the building component provides an improvement in the energy identity of the building. In general researches, the use of macro, micro encapsulated PCM decreases the heat conduction coefficient as it increases the heat retention capacity of the building components, but effects compressive strength positive or negative. However, when the capsule size used in micro capsule applications is reduced to 7 microns and below, it is seen that the strength increases, while the thermal conductivity coefficient continues to decrease. When the PCM capsule particle sizes used in the building components are reduced, it provides an improvement in the granulometry of the component, so a positive effect on strength is seen in the building components. As a result of this research, differences in compressive strength were observed depending on the macro, micro and nano dimensions and mixing ratios of the pcm addition. However, due to the continuous increase in the PCM ratio of the building component, the heat holding capacity of the building component increases and its thermal conductivity decreases.

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN YAPI ELEMANLARININ BASINÇ DAYANIMI VE TERMAL İLETKENLİĞE OLAN ETKİLERİ HAKKINDA LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Anahtar Kelimeler

Faz Değişim Malzemesi,
Basınç Dayanımı,
Termal İletkenlik,
Kapsülleme Boyutu,
Çimento Esaslı Malzeme.

Öz

Faz Değişiren Malzemelerin (FDM) önemli alanlarından biri, bina bileşenlerinin ısı tutma kapasitesini artırmaktır. Bina bileşenlerinde enerji depolamak ve bina sıcaklık kontrolünü sağlamak için FDM'lerin ısı tutma kapasiteleri üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Yaz ve kış koşullarında bina sıcaklık kontrolünün sağlanması süreklilik gerektiren bir durum olduğundan, bina bileşenlerinde FDM'nin kullanılması enerji tasarrufu için önemli bir araç haline gelmiştir. Bina bileşenine sağlanan bu özellik, binanın enerji kimliğinde bir iyileşme sağlar. Genel araştırmalarda makro ve mikro kapsüllenmiş FDM kullanımı, bina bileşenlerinin ısı tutma kapasitesini artırdığı için ısı iletim katsayısını düşürür, ancak basınç dayanımını pozitif veya negatif etkiler. Ancak mikro kapsül uygulamalarında kullanılan kapsül boyutu 7 mikron ve altına düştüğünde mukavemetin arttığı, ısı iletkenlik katsayısının düşmeye devam ettiği görülmektedir. Yapı bileşenlerinde kullanılan PCM kapsül partikül boyutları küçültüldüğünde, bileşenin granulometrisinde bir gelişme sağlar, böylece yapı bileşenlerinde mukavemet üzerinde olumlu bir etki görülür. Bu araştırma sonucunda, FDM ilavesinin makro, mikro ve nano boyutlarına ve karışım oranlarına bağlı olarak basınç dayanımında farklılıklar gözlenmiştir. Bununla birlikte, bina bileşeninin FDM oranındaki

* İlgili yazar / Corresponding author: acelik@kayseri.edu.tr , +90352-437-8264

sürekli artış nedeniyle, bina bileşeninin ısı tutma kapasitesi artar ve ısı iletkenliği azalır.

Alıntı / Cite

Çelik A.İ., Kayabaşı R., Şener, A., (2022). A Literature Review About Effects of Phase Changing Materials on Uniaxial Compressive Strength and Thermal Conductivity Coefficient of Building Components, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 10(4), 1495-1508.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. İ. Çelik, 0000-0001-7233-7647
R. Kayabaşı, 0000-0001-6195-7445
A. Şener, 0000-0001-7562-7631

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	05.02.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.02.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	11.02.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Introduction

Buildings and structures are indispensable for living and working life, engineering structures developed by human beings. In ancient times, what was expected of buildings was to meet only basic needs. Today, more features are expected from buildings. Thus, buildings turn into modern structures. Modern engineering structures must have a safe, high-strength, energy-efficient and environmentally friendly structure. The need for heating in the winter months and the need for cooling in the summer are the basic needs for providing comfort conditions in buildings. For these reasons, the use of energy in buildings and the energy identity of the building gain importance. To challenge environmental problems such as carbon dioxide emission and global warming, possible improvements should be made in buildings and energy use should be reduced. While making improvements regarding energy saving in reinforced concrete structures, strength properties should also be preserved or increased. The thermal energy storage capacity of composite materials using FDM increases. The material, which increased heat holding capacity can be used for heating, cooling, heat control and energy storage (Mert et al., 2019).

Insulation and Phase Change Materials (PCM) applied to building components reduce energy use in the building. The savings to be made in heating applications using fossil origin fuels will directly contribute to the economy as well as contribute to the reduction of environmental pollution. As a result of the decrease in energy use, carbon dioxide emissions will decrease and global warming due to greenhouse gases will decrease. Topics such as adding PCM using new methods suitable for the building component, determining the ideal mixing ratio, determining the ideal encapsulation dimensions in the building component and the ideal capsule size are considered as subjects worth researching. In this context, if 1% improvement is achieved in the building component in addition to the existing situation, the energy requirement in the buildings will decrease significantly.

PCM is generally applied on the surfaces of the buildings with various methods for temperature control purposes. In addition to heat savings in modern buildings, the importance of high-strength materials is increasing day by day. For this reason, the issue of strength should also be considered in studies on heat saving. In this study, a literature review has been made on the effect of PCM addition on compressive and flexural strength and heat transfer in cement-based materials. As a result of this research, differences in compressive strength were observed flexural on the macro, micro and nano dimensions and mixing ratios of the PCM addition.

2. Theoretical Framework

Importance of energy and energy resources is increasing in the world. In Turkey, according to the distribution of energy consumption data in 2017, the highest energy consumption in the residential and services sector with 24.8%, were occurred in the industrial sector with 24.4% as shown in Figure 1. Saving energy is seen as a necessity from the production stage to the consumption stage due to the continuation of Turkey's dependence on foreign energy consumption. Although it changes over the years, the energy consumption in houses in our country is in the range of (24-30)% (Anon n.d.). In addition to the importance of owning energy resources, the rapid increase in energy demand reveals the importance of efficient use of energy. In the world, a significant amount of energy is consumed in heating and cooling in buildings. Therefore, solutions for energy saving of buildings attract a lot of attention (Oktay, Yumrutaş, and Argunhan 2020). Researches are carried out to reduce the heat conduction coefficient of building components or to reduce energy use by increasing their heat retention capacity. Some of these studies aimed to use the building component in building heat control by adding PCM to the building components. Providing building heat control with PCM inside the building component will reduce the heating and cooling load.

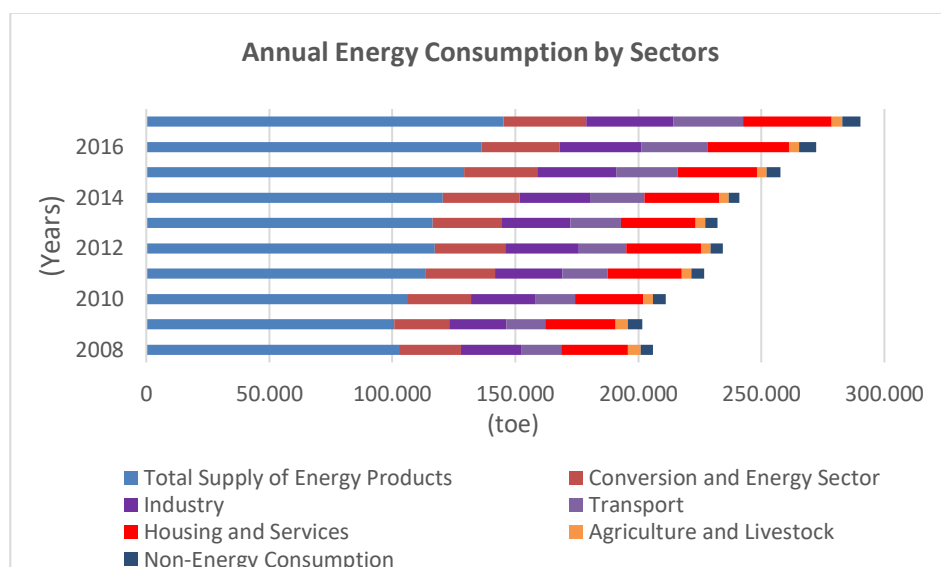


Figure 1: The Distribution Turkey's total energy consumption in 2017 (Anon n.d.)

More than one third of the global energy consumption in the world is used to provide thermal comfort conditions in buildings. Using PCM together with insulation material on the floor and ceiling reduces the heat load of the volumes. This means to spend less energy to provide thermal comfort conditions. While the annual energy use decreases, energy efficiency increases (Haydaraslan, Çuhadaroğlu, and Yaşar 2020).

2.1. Phase Changing Material and Energy-Saving

Energy saving is important in buildings as well as in materials applied for energy saving (Korkut and Torun 2017). PCM is used to store thermal energy in building heat control, heating and cooling applications (Kayabaşı and Kaya 2020). With the use of PCM, the building element gains the latent heat retention capability of the used PCM, as well as its own heat retention capability. PCM solid-liquid, liquid-gas and solid-solid (crystallization heat) are substances that take or give off heat from the control volume during phase change. It releases the latent heat it receives during phase change back to the control volume as the temperature decreases. The use of PCM with high heat holding capacity increases the heat retention potential in the system. During the daytime heating of the building, the PCM changes phase and turns into a liquid form and prevents further heating of the building by absorbing the heat of the building. At night, as the surrounding temperature decreases, it prevents the building from cooling by giving heat to the building, depending on its heat holding capacity.

While using PCMs in construction applications, disadvantageous situations may arise in building components. In case of leakage in the encapsulated PCMs, odor, chemical reaction or corrosion conditions may occur. This situation decreases the strength of the iron and shortens the life of the concrete. Depending on the chemical structure of PCMs, corrosion of steel reinforcement in concrete can accelerate. The strength reduction in the structural element due to the corroded structural element will reduce the strength of the building (Fernández et al. 2015; Ouglova, Berthaud, and Foct 2006).

If PCMs are integrated into building structure components, the heat storage capability of buildings increases. In addition, it prevents overheating even when the outdoor temperature and solar radiation are high. When the building starts to heat up, the heating slows down with the PCM, which has the heat holding capacity in the building component. Thus, the degree of comfort in the building can be passively improved (Bai et al. 2020). In an experimental study, in a commercial office without an active cooling system, microcapsule PCM was added to the plaster to reduce the temperature on the wall surface, thus increasing the thermal comfort of the office. By using microcapsule PCM, the comfort temperature of office was maintained for 6 hours more than the reference material (Schossig, Henning, and Gschwander 2005).

The PCM to be used in the building component should not decrease the strength of the material to which it is added. In structural elements, where the strength is insignificant, there is no suffer in terms of safety if the strength is within the allowed limits. Therefore, the appropriate PCM can be selected according to the properties of the building component. PCMs are as chemical classified under three main headings as organic, inorganic and eutectics is presented in Figure 2. Organic compounds refer to Paraffin and non-paraffin PCM. Inorganic PCMs are divided into salt hydrates and metallics.

Phase Changing Material	Organic Compounds	Paraffins
		Non-Paraffin
	Inorganic Compounds	Salt Hydrates
		Metalics
	Eutectics	Organic - Organic
		Organic - Inorganic
		Inorganic - Inorganic

Figure 2: General classification of PCM

2.2. Energy Consumption in Buildings

Heat loss can be reduced by improving the physical structure of the building in order to save energy in residences. Improvements in the physical structure can be achieved by improving the strength of the building, applying insulation and physical improvement to be made on the windows (Güçül and Aydınalp Köksal 2018). With this situation, the energy requirement in buildings increases as the needs of human beings increase. While some of the energy need in buildings is required for the use of electrical machines, some is required for heating and cooling. It is important to use efficient electrical machines for energy saving, as well as to reduce the need for heating and cooling. With the determination of the comfort temperature according to the intended use of the buildings, the need for heating or cooling arises. In order to keep buildings in comfort conditions, heat loss and gain must be kept under control. In order to realize this situation, besides insulation applications, building heat control applications are performed. PCMs applied in concrete should be evaluated within this scope.

In 2018 25.7% of natural gas consumption in Turkey was consumed in the housing is seen Figure 3. 23.45% of the final energy consumption by 2018 in Turkey was consumed in housing again. Nowadays, 35% of the final energy consumption is spent for the heating and cooling of buildings. It is predicted that by 2050 there will be four times higher final use of renewable energy than today. 40% of the power generated from renewable energy sources will be spent in industry as electrical energy, and 44% in buildings for heating and other direct use. Efforts to reduce energy consumption, which is another branch of the studies to produce energy from environmentally friendly and renewable sources, have gained importance in recent years. In this context, more than 40% of energy consumption is spent for the heating or cooling of buildings. An improvement of 2% has a very important place in ensuring the building temperature control.

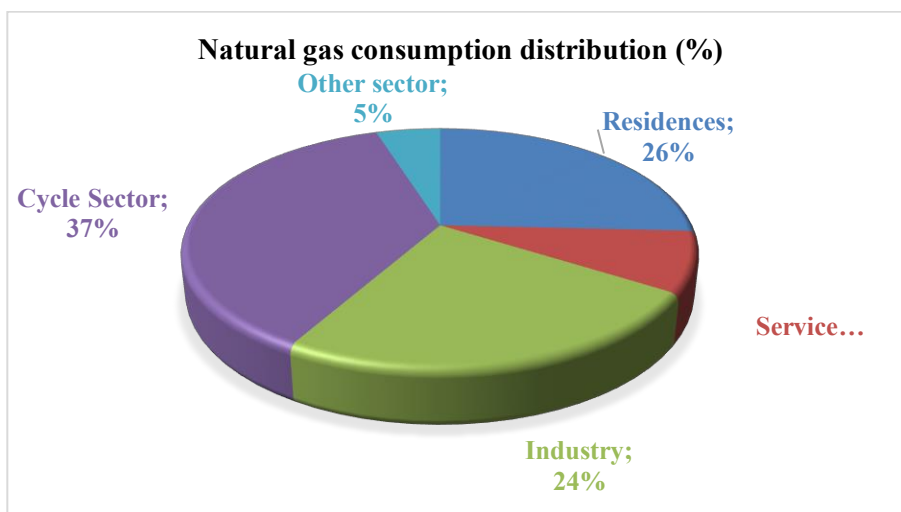


Figure 3. The distribution of natural gas consumption of Turkey for 2018 (Anon n.d.)

From 2010 to 2050, the number of households will have continued to increase rapidly. Per capita usage area in households is gradually increase as shown in Figure 4. Therefore, per capita heating and cooling costs in residences will increase rapidly. In addition, population growth will allow this situation to increase further. This situation will cause an increase in carbon emissions and an increase in global warming (Ürge-vorsatz et al. 2015).

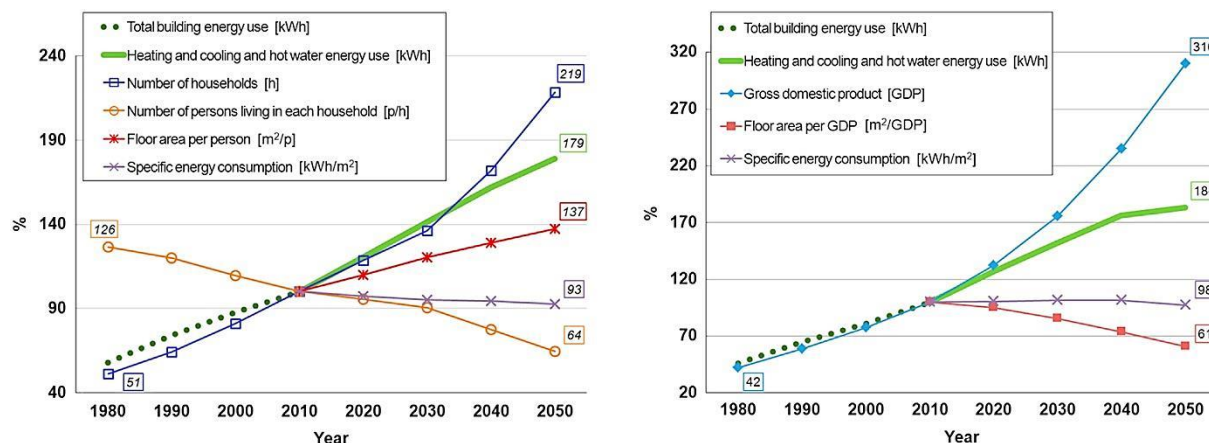


Figure 4. Trends in the different drivers of energy consumption in residential (left) and commercial (right) buildings (Ürge-vorsatz et al. 2015)

When the heat retention capability is gained to the building elements with the addition of PCM or other methods in buildings,

- Decrease in heating and cooling costs,
- Decrease in the use of high-power devices as the peaks for heating and cooling are minimized,
- Decrease in carbon emissions,
- Decrease in the rate of imported energy and decrease in energy deficit due to this situation,
- Regulation of heat distribution inside the building,
- Increasing indoor comfort,
- Important gains such as the increase in the real estate value of the building are achieved.

2.3 Application Methods of PCM on Building Components

Within the scope of the research, the effect of the use of PCM in building components on the strength of the building component and the effect on the thermal conductivity of the building component was investigated by literature review. In the studies carried out, the effects of PCMs added to the building component on the strength and thermal conductivity value of the building component have been investigated.

While determining the methods to be used to add PCMs to concrete, prevention of leaks after phase change should be among the priority issues. Although there are many methods in the studies performed, these methods are classified in two main categories is presented in Figure 5. These methods are direct and indirect addition method (Berardi and Gallardo 2019). Direct use is prepared by mixing PCM into the mortar prepared for the building. In this case, since there is no obstacle between the concrete mix and PCM, it is in direct contact. PCM can change the properties of concrete in case of leakage. PCM applications made by immersion in concrete can also be evaluated within this scope. In encapsulated applications, the connection between concrete and PCM is interrupted and the interaction stops. For this reason, new researches continue by encapsulating PCMs and using them in building elements (Soares et al. 2013).

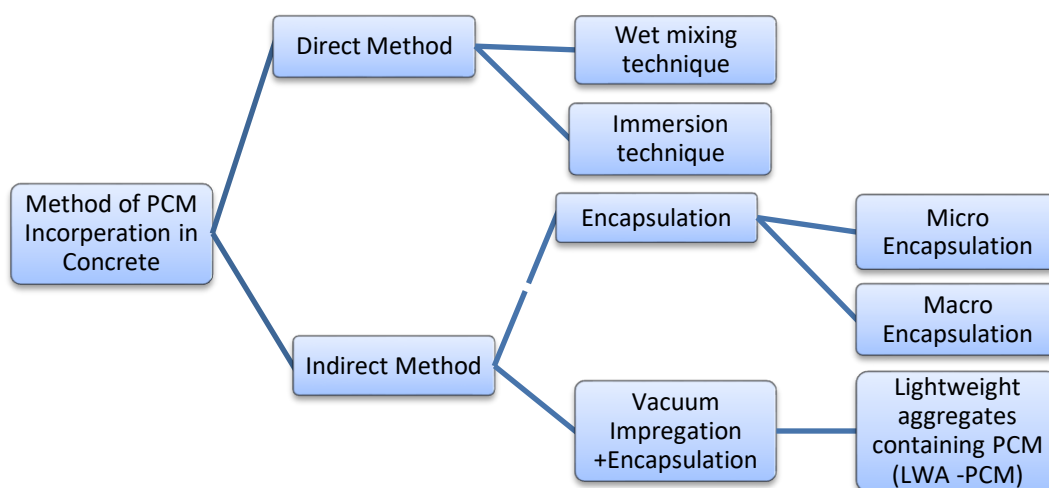


Figure 5. Application of PCM incorporation in concrete (Soares et al. 2013).

In the most of studies conducted in recent years, it is seen that indirect methods, that is, more encapsulation method, are used to include PCM in concrete. The method of adding liquid PCM while mixing wet concrete is called the direct addition method (Navarro, Gracia, Niall, et al. 2016). Although it is easy to apply the method of mixing PCM directly, it can cause leakage in the concrete and degrade the properties of the concrete due to no any barrier between liquid and concrete. In order to reduce the disadvantages in the direct addition method, applications are also made by dipping solid concrete directly into the PCM (Navarro, Gracia, Colclough, et al. 2016).

3. Literature Review

3.1 The Effect of PCM on Compressive Strength

Detailed research is needed on the structure, production technology and use of PCM microcapsules with in reinforced concrete structures. In modern buildings, strengthening is an important issue as well as heat saving. Therefore, it is important to accurately estimate the effect of PCM addition on the compressive strength of cement based reinforced concrete structures (Drissi et al. 2019). More studies are needed to determine performance and long-term durability aspects. In a recent study, it was possible to predict the compressive strength of cementitious composites integrated with PCM through machine learning. In the estimation made, it was found that the compressive strength decreases in concretes with PCM additives, in accordance with the literature. However, in the light of basic materials science, it has been emphasized that more extensive experimental studies and larger data sets are needed to address the chemical and also physical properties of PCM microcapsules with a better perspective (Marani and Nehdi 2020).

Mechanical properties of concrete containing 10% and 20% PCM by volume, according to the results obtained from the studies conducted by Fernandes et al, it has been observed that the inclusion of PCMs in concrete leads to a decrease in the compressive strength of concrete (Fernandes et al. 2014). However, it has been found that using silica ash as the binder alongside ordinary Portland cement improves the compressive strength of concrete mixes. Similarly, Ma and Bai, Ling et al., Cui et al. and Norvell et al. stated that when 30% PCM by volume is added to concrete, it results in a reduction in compressive strength of about 30% (Cui et al. 2015; Ling and Poon 2013; Ma and Bai 2018; Norvell, Sailor, and Dusicka 2013). However, it has been noted that the presence of coarse aggregate in concrete compared to the fine aggregate mortar mix supports the resulting compressive strength (Adesina et al. 2020).

In this study, a comparison has been made in Table 1 to compare the effects of PCMs on concrete strength. According to the results obtained from the literature, it has been observed that the compressive strength of concrete specimens generally decreases with PCM. However, it was observed that the strength increased, contrary to the general literature. Researchers attribute this to the replacement of fine particles in the aggregate with PCMs and the composite coating used in PCM microcapsules (Aguayo et al. 2016). In addition, Adesine (2019) stated that using PCM instead of fine aggregate together with coarse aggregate has a positive effect on strength (Adesina 2019). Based on this, it appears that there is a need for more detailed experimental studies on the use of composites as PCM encapsulation material and the use of PCM instead of fine aggregate.

Table 1. Comparison of compressive strength in concrete with PCM additives

Reference	Sample No	PCM type (mg)	PCM ratio by mass (%)	Phase changing temperature (°C)	Compressive Strength (MPa)
(Norvell et al. 2013)	Control 0%	-	0	0	-
	10% Series A	3	0,375	19	-
	20% Series A	3	0,75	19	-
	30% Series A	3	1,125	19	-
	40% Series A	3	1,5	19	-
	50% Series A	3	1,875	19	-
	10% Series B	3	0,1	19	-
	20% Series B	3	0,2	19	-
	30% Series B	3	0,3	19	-
	40% Series B	3	0,4	19	-
	50% Series B	3	0,5	19	-
	10% Series C	3	0,275	19	-
	20% Series C	3	0,55	19	-
	30% Series C	3	0,825	19	-
40% Series C	3	1,1	19	-	
50% Series C	3	1,375	19	-	
(Aguayo et al. 2016)	OPC	0	-	-	45
	PCM-5%	6	5	-	38
	PCM-10%	12	10	-	34
	PCM-15%	19	15	-	30
	PCM-20%	26	20	-	28
	OPC	0	-	-	44
	PCM-5%	6	5	-	54
	PCM-10%	12	10	-	55
PCM-15%	19	15	-	60	
PCM-20%	26	20	-	45	
(Cellat et al. 2017)	RE	-	-	31,3	54,16
	FA	5	2%	30,8	38,95
	mPCM	5	10%	30,5	33,8
(Beyhan et al. 2017)	PCM	-	-	24,1	-
	MPCM-1	-	61,9	21,53	-
	MPCM-2	-	65,5	19,98	-
(Jiang et al. 2008)	Paraffin	-	25,1	35,6	-
(Sarı, Alkan, and Karaipekli 2010)	n-heptadecane	-	38	18,4	-
(Shan et al. 2009)	n-octadecane	-	70	30	-
(Ma et al. 2014)	Butyl stearate-paraffin mixture	-	63,7	30,1	-
(Chen et al. 2013)	Stearic acid	-	90,6	53,5	-
(Cao, Tang, and Fang 2014)	Paraffin	-	87,1	58,6	-
(Konuklu, Unal, and Paksoy 2014)	Caprylic acid	-	59,3	17,12	-
(He, Wang, and Wu 2014)	n-octadecane	-	41,8	27,96	-
(Sarı, Alkan, and Altıntaş 2014)	Myristic acid	-	48,7	47,5	-
(He, Wang, and Wu 2015)	n-nonadecane	-	41,1	25,8	-
(Lecompte et al. 2015)	M1	-	0	28	20
	M2	-	12,2	28	13,3
	C1	-	0	28	52,1
	C2	-	9,8	28	9,8
	m ref	-	0	28	60,5
	m3	-	14,4	28	16,3
	m4	-	10,1	28	22,9
	m5	-	6,3	28	30
	c ref	-	0	28	54
	c3	-	11,9	28	8,3
	c4	-	5,5	28	20,8
c5	-	3,5	28	30,5	
(Cellat et al. 2015)	Reference	-	-	-	45,2
	Capric acid (CA)	-	0,01-0,02	32	39,81
	Lauric acid (LA)	-	0,01-0,02	42	34,13
	Myristic acid (MA)	-	0,01-0,02	49	37,5
	Palmitic acid (PA)	-	0,01-0,02	61	33,87
	Reference	-	-	-	54,16
	Capric acid (CA)	-	0,01-0,02	32	47,12
	Lauric acid (LA)	-	0,01-0,02	42	38,95
	Myristic acid (MA)	-	0,01-0,02	49	43,38
Palmitic acid (PA)	-	0,01-0,02	61	37,72	
(Figueiredo et al. 2016)	PCM-I	-	0,4	26	15,5
	PCM-II	-	0,4	26	18,33
	BR-I	-	0,4	26	57,77
	BR-II	-	0,4	26	49,73
	PCM-I- Temp	-	0,4	26	17
	BR-I- Temp	-	0,4	26	54
(Hunger et al. 2009)	Reference	-	0	41	74,05
	PCM%1	-	24,96	39,8	52,19

	PCM%3	-	76,6	39,4	34,96
	PCM%5	-	124,3	37,6	21,36
(Zhang et al. 2013)	Reference	-	-	-	23,7
	PCM_05	-	-	26,84	16,1
	PCM_12	-	-	25,38	13,9
	PCM_17	-	-	26,37	12,1
	PCM_25	-	-	25,79	10,5
(Xu and Li 2013)	NC	-	-	-	50
	TESC-10	-	-	41,11	36,6
	TESC-15	-	-	41,11	36,5
	TESC-20	-	-	41,11	28,4
	TESC-30	-	-	41,11	26
(Dakhli, Chaffar, and Lafhaj 2019)	Control 0%	-	0	-	Pure cement
	PCM 10%	-	10	31,4	0,6 x pure cement
	PCM 20%	-	20	31,4	0,6 x pure cement
	PCM 30%	-	30	31,4	0,5 x pure cement
(Eddhahak-Ouni et al. 2014)	Control 0%	-	0	-	25
	PCM 1%	-	1	23-26	21
	PCM 3%	-	3	23-26	19
	PCM 5%	-	5	23-26	17

Concrete strength and reliability in PCM mixed concrete is an issue that needs to be examined in detail. Because any change in the composition of the concrete mix can affect the strength and density of the final product (Paksoy et al. 2017). The addition of PCM in both direct and microencapsulated forms reduce the compressive strength of concrete. In one study, the reference sample and the eutectic-like fatty acid mixture (FA) were compared with the sample. In comparison, it was observed that a significant decrease in concrete compressive strength results was observed with the addition of PCM, and the reduction was calculated as 38% in the 28-day compressive strength tests. This is a result of aggregates being replaced with PCM. According to the results, it has been observed that the compressive strength for a concrete in C50 class has dropped to C37 concrete class as a result of PCM mixture. Although this result is seen as a disadvantage, it has been stated that it is a highly suitable concrete for structures that are not very risky (Cellat et al. 2017).

Standard phase-change materials in polymer capsules are considered to be micro-encapsulated phase-change materials (ME-PCMs) between 1 and 300 µm in size. Particle size of portland cement in solid concrete is between 1 µm and 50 µm, while the diameter of fine aggregate can be approximately 150 µm and more (Norvell et al. 2013). When the cement reacts with water, it binds the aggregate particles together and the strength of the concrete increases thanks to these particles. Particularly, particles smaller than 125 µm other than cement, thanks to the packing density they create, reduce the pores in the cement and its homogeneity increases. This causes positive effects on strength. In other words, fine particles in concrete create a strong bond between cement and coarse aggregates and affect strength (Aguayo et al. 2016). In Figure 6 some references result and maximum strength values are comparison.

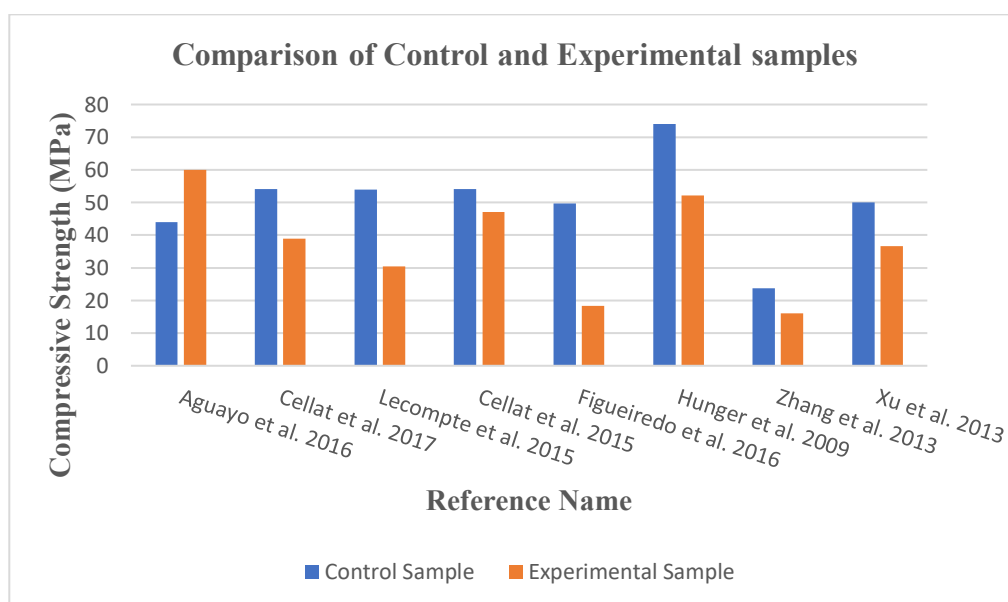


Figure 6. Comparison of the Control Sample and Experimental the Sample by the Maximum Compressive Strength

Moosberg et al. Observed that the strength of the homogeneous concrete formed by the quartz sand particles they added to concrete in varying sizes increased. In addition, they found that adding coarse aggregate or cement instead of fillers tended to reduce strength. In fact, they found that filling materials with particle sizes of 4 μm and 2.2 μm were more effective than average cement particles (Moosberg-Bustnes 2004). In a like study, Çelik and Marar (1996) by replacing the crusher powder with a particle size of 75 μm with 10% fine aggregate, as a result of the study, it was found that the strength of concrete subjected to compression and bending tests increased (Çelik and Marar 1996). Norvell et al. (2019), by adding ME-PCM proportional to the dry materials added to the concrete, group A work, group B work with ME-PCM instead of cement, and group C studies by adding ME-PCM instead of sand, they compared their results with the strengths of the control sample. In the samples, it has been determined that the volume of the voids between the sand particles allows to fully spread, and this has a positive effect on the strength in proportion to the expectations. It may be because of the incomplete cementation of the spaces between the particles, ie. more cementation. The fact that the strength values of all samples are outside the standard error range of the control samples suggests that the effect of integrating ME-PCM into the samples is important.

Cellat et al. (2015) conducted 7-day and 28-day tests by adding bio-based fatty acids to improve concrete heat retention capacity. Compressive strength data for 7 and 28 days for concrete with and without PCM, a systematic decrease in strength properties with increasing PCM content was observed. In addition, for concretes containing 1% and 2% PCM, the total compressive strength varied between 33.87 and 39.81 MPa and 37.72 and 47.20 MPa for 7 and 28 days of concrete, respectively (Cellat et al. 2015).

Density loss in concrete with the addition of PCM was found to be 10.5% on average in the study conducted by Figueiredo et al. (2016) (Figueiredo et al. 2016). With the PCM included, the concrete compressive strength loss was approximately 68%. The effect of the joining method of PCM and the addition of water to the mixing process led to a lower loss of compressive strength in concrete samples with the addition of PCM. Final strength of concrete with PCM was increased by approximately 8% (Hunger et al. 2009). As a new mix design is implemented in concrete, higher strength is expected compared to the standard composition with equal cement content. Therefore, a modification of the F eret equation was applied to obtain an indication for possible compressive strength at 28 days. This modification includes the contribution of other cement-based materials and is expressed by the formula below (Hu C, Saucier F, Lanct ot MC 1999).

$$f_c = (K_g R_c) / \left(\left(1 + 3.1 \frac{W+A}{C(1+K_1+K_2)+BFS} \right) \right) \quad (1)$$

Here, Aggregate coefficient of 5.4 for crushed aggregate and 4.8 for round aggregate with standard value is accepted, W total effective water content, R_c standard cement strength, C cement weight and A volume of fluid air (in kg/m³), BFS, K₁, K₂ pozzolanic and potential shows hydraulic effects.

A significant difference was noted between the compressive strength tendencies of PCM-M and PCM-E containing mortars are shown in Figure 7. The compressive strengths of PCM-M (a) and PCM-E (b) are shown. Standard deviation in compressive strength is between 2 and 5 MPa in the first days. It is between 4 and 10 MPa in the 28-day sample. (C) The standard deviation of the flexural strengths at 28 days in the PCM volume fraction is less than 0.8 MPa. It can be said that the decrease in strength is due to the addition of a material with low mechanical resistance or the interaction of PCM with cement as a result of rupture of capsules. According to the control sample, PCM-M has been found to reduce the compressive strength at all mixing ratios (Figure 7-a). However, in PCM-E, it is observed that the compressive strength increases in all mixing ratios compared to the control sample and it is seen from the graph that the optimum mixture ratio for this PCM type is 10% (Figure 7-b). It is observed that the higher the ratio of PCM-M in the mixture, the lower the flexural strength compared to the control sample. In PCM-E, it is observed that the flexural strength increases up to 10% mixing ratio, and after this value it is observed that the flexural strength decreases (Aguayo et al. 2016).

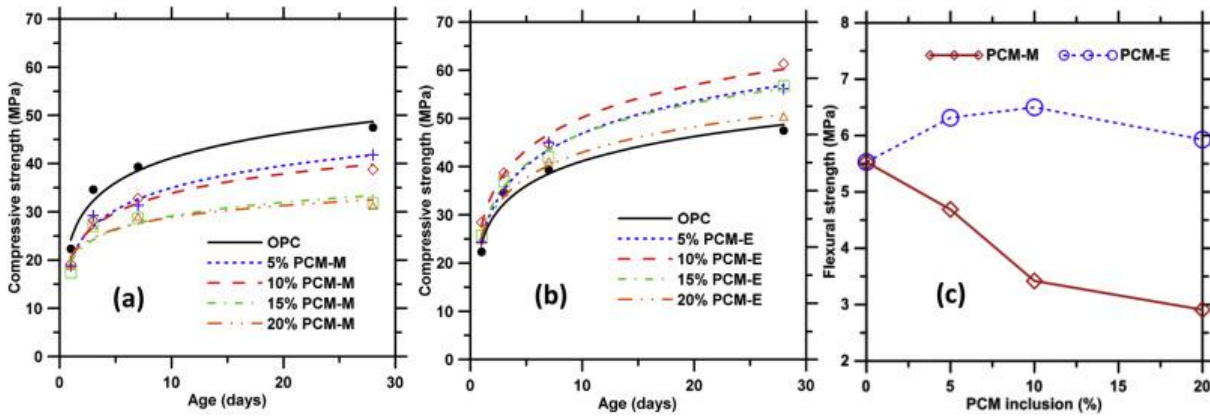


Figure 7. The effect of pcm ratio and pcm type on the compressive strength of concrete (Aguayo et al. 2016)

In the study conducted by Fu et al., 3 different nano PCM types were added to cement based materials and 7-day and 28-day compressive strength was measured. Accordingly, it is seen that the optimum pcm ratio in the mixture is between 0.1% and 2% at the point where the compressive strengths are the highest compared to the control sample according to the added PCM type (Fu et al. 2020).

3.2. The Effect of PCM on Thermal Conductivity

Due to the high heat retention capability of PCMs, it is possible to use them in heat storage systems and temperature control. The use of PCM in the building element increases the heat holding capacity of the building element. Control volumes surrounded by structural elements with increased heat retention capability are less affected by the changing ambient temperature due to climatic conditions. The fact that the building is less affected by the changes in ambient temperature allows the temperature control of the control volumes to be achieved by consuming less energy.

In a study by Hunger et al. (2009), 100 × 100mm × 50mm samples were prepared to determine the effect of PCM ratio in concrete on thermal conductivity value and 1% PCM, 3% PCM and 5% PCM were added in proportion to the weight of the concrete. By measuring three mixes and a reference, it was observed that PCM particles decrease the thermal conductivity of concrete (Hunger et al. 2009). Berardi and Gallardo conducted an experimental study to reduce the thermal conductivity of the building in their study. They made experiments to determine the effect of PCM on building thermal conductivity. As a result, they saw that thermal conductivity of the concrete decreased when microencapsulated paraffin (according to the mass of the concrete) was added at 1%, 3% and 5% as shown in Figure 8 (Berardi and Gallardo 2019).

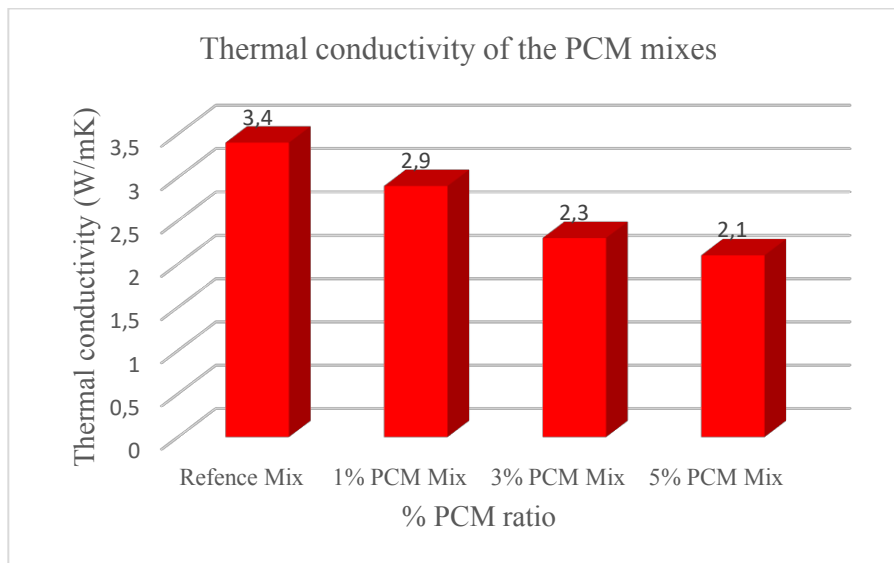


Figure 8. Thermal conductivity of the PCM mixes (Hunger et al. 2009).

The phase change temperature, heat holding capacity and other properties of the PCM type to be preferred while providing building heat control will affect the heat retention capability to be provided to the building. Decreasing the heat transfer coefficient of the building element (wall, floor, ceiling, roof) reduces the total

heating and cooling load of the building. Decrease of thermal conductivity results in concrete by means of different encapsulated is presented in Figure 9.

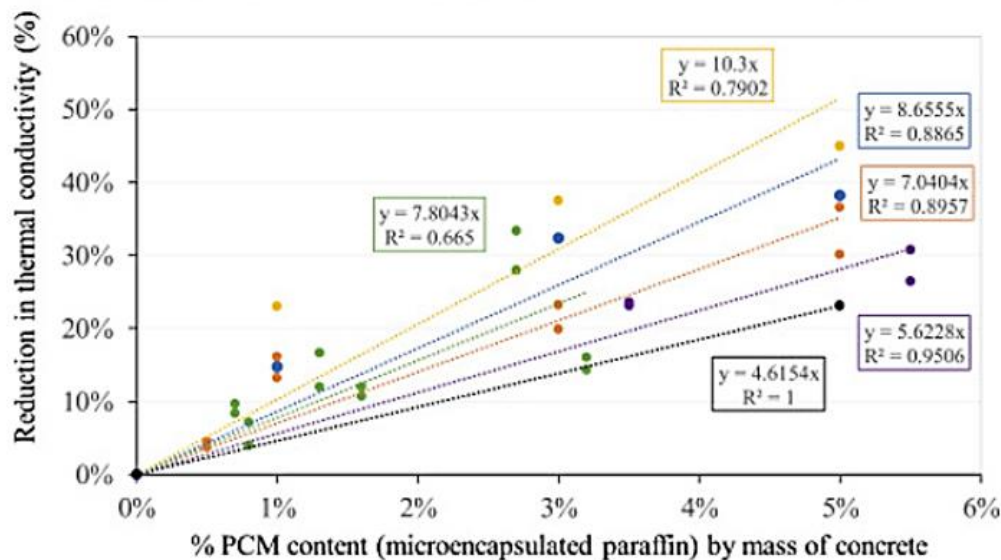


Figure 9. Decrease of thermal conductivity results in concrete by means of different encapsulated PCM (Berardi and Gallardo 2019).

The use of insulation material and the use of PCM in building elements provides benefits to the buildings in terms of energy saving. PCM used in buildings has the potential to reduce the heating and cooling load by up to 50%. In winter, the temperature of the wall using PCM is 5°C higher than the reference wall. This application provides energy savings of up to 13% per year (Paksoy et al. 2017). The energy savings achieved during the summer periods were different from those achieved during the winter periods. While the total energy saving that can be achieved in the building increases with insulation material, it increases 2.3 times when PCM or insulation material is applied. This situation provides about 66.2% benefit. For this reason, researchers recommend PCMs with high thermal conductivity (Drissi et al. 2019).

In the study of Dakhli et al., thermal conductivity measurement was performed to evaluate the effect of cement and PCM integration on thermal conductivity. For each PCM integration, the sample was tested 3 times and averaged. An average of 0.701 W/mK was found for 0% PCM integration. An average of 0.599 W/mK was found for 10% PCM integration. An average of 0.565 W/mK was found for 20% PCM integration. Finally, an average of 0.534 W/mK was found for 30% PCM. The thermal conductivity for pure cement is 0.7 W/mK. Thermal conductivity drops to 0.6W/mK for 10% PCM integration. Thermal conductivity continues to drop down to 0.56 W/mK for 20% PCM integration. Finally, the thermal conductivity for 30% PCM integration gives 0.53 W/mK. Thermal conductivity decreases when the addition of PCM to cement increases. This proves that the integration of PCM into cement can improve thermal insulation (Dakhli et al. 2019).

In a study, nanofibers containing FDM were produced by electro spinning system. The structure of nanofibers is fatty acid-based (Özmen and Alay, 2020) FDMs. Lauric acid (LA), capric acid (KA) and myristic acid (MA) were used in the study. The heat storage capacity was highest in nanofibers containing lauric acid. Ouni et al. added 0%, 1%, 3% and 5% PCM to Portland concrete cement in their study. The thermal conductivity decreased by about 0.02 W/mK with the addition of PCMs. In the study, it was observed that the PCM addition was relatively stable between 0% and 5%, and the thermal conductivity change was reduced with 10% and more additions.(Eddhahak-Ouni et al. 2014).

4.Conclusion

The materials used in the construction industry are constantly being developed and renewed. These considerations are the strength of the building component and the thermal resistance of the building component. In building components, thermal conductivity is as important as strength. For this reason, the developed material should both increase the strength and provide thermal resistance to the structure. Thus, the strength of the buildings will increase and the thermal comfort in the buildings will be provided by consuming less energy. In this study, the effect of macro, micro and nano-encapsulated PCMs on the compressive strength

and thermal conductivity of cement-based materials was investigated by literature review. The following results were obtained from the literature review studies.

- 1- In Macro PCM addition, it is seen that the compressive strength decreases as the PCM mixture ratio increases. On the other hand, as the PCM mixture ratio increases in the macro PCM addition, the thermal conductivity of the structural element decreases.
- 2- It has been observed that micro sized PCMs have positive and negative effects on compressive strength. It has been determined that the PCM particle size is smaller in cases that have a positive effect on the compressive strength than the pcm in the negative conditions. Compared to the control sample, it was observed that the change in compressive strength ranged from -60% to + 50%. On the other hand, as the PCM mixture ratio increases in micro PCM addition, the thermal conductivity of the building element decreases.
- 3- According to Aguayo et al (2016), although higher compressive strength was obtained than the reference sample with the addition of Nano PCM in the range of +%18 and +%23, it was determined that the compressive strength decreased after 10% PCM mixture amount. On the other hand, as the mixture ratio of PCM increases in nano-PCM addition, the thermal conductivity of the building element decreases.
- 4- By developing composite encapsulation methods, the strength of concrete can be increased and PCM leaks are prevented throughout the life of the concrete. Preventing leaks that may occur in concrete over time will ensure the strength of concrete and steel reinforcement.
- 5- PCMs to be used in building components must be encapsulated in compliance with building components, with low volume changes and not causing leakage.
- 6- New production methods and application methods to building components should be developed in order for the materials to be used as PCM to be economical.
- 7- The priority in building components is the strength of the building component. For this reason, PCMs used for low heat conduction coefficient sought for energy saving should not reduce the strength of the building component.
- 8- Generally, PCM encapsulation applications are made in scientific laboratories. But this is not economical. For the widespread use of PCM in building elements, economical mass production encapsulation methods should be developed. Hence it will be increase PCM application in building elements.
- 9- PCMs with phase change temperature range suitable for the operating temperature range of building components in summer and winter conditions and with high heat retention capacity should be investigated.
- 10- For building heat control in summer and winter conditions, PCMs that reduce the heat load of the building and have high heat holding capacity should be investigated.

Conflict of interest

No conflict of interest has been declared by the authors.

References

- Adesina, A., P. O. Awoyera, A. Sivakrishna, K. Rajesh Kumar, and R. Gobinath. 2020. "Materials Today : Proceedings Phase Change Materials in Concrete : An Overview of Properties." *Materials Today: Proceedings* 27:391–95.
- Adesina, Adeyemi. 2019. "Use of Phase Change Materials in Concrete: Current Challenges." *Renewable Energy and Environmental Sustainability* 4:9.
- Aguayo, Matthew, Sumanta Das, Amit Maroli, Nihat Kabay, James C. E. Mertens, Subramaniam D. Rajan, Gaurav Sant, Nikhilesh Chawla, and Narayanan Neithalath. 2016. "The in Fl Uence of Microencapsulated Phase Change Material (PCM) Characteristics on the Microstructure and Strength of Cementitious Composites : Experiments and Fi Nite Element Simulations." *Cement and Concrete Composites* 73:29–41.
- Anon. n.d. "The Distribution of Natural Gas Consumption of Turkey for 2018." Retrieved August 10, 2020a (<http://www.enerji.gov.tr>).
- Anon. n.d. "The Distribution Turkey's Total Energy Consumption in 2017." Retrieved August 1, 2020b (<http://www.eigm.gov.tr/>).
- Bai, Lu, Jingchao Xie, Mohammed M. Farid, Wei Wang, and Jiaping Liu. 2020. "Analytical Model to Study the Heat Storage of Phase Change Material Envelopes in Lightweight Passive Buildings." *Building and Environment* 169(July 2019):106531.
- Berardi, Umberto and Andres Alejandro Gallardo. 2019. "Energy & Buildings Properties of Concretes Enhanced with Phase Change Materials for Building Applications." *Energy & Buildings* 199:402–14.
- Beyhan, Beyza, Kemal Cellat, Yeliz Konuklu, Caner Gungor, Okan Karahan, Cengiz Dundar, and Halime Paksoy. 2017. "Robust Microencapsulated Phase Change Materials in Concrete Mixes for Sustainable Buildings." *International Journal of Energy Research* 41(1):113–26.
- Cao, Lei, Fang Tang, and Guiyin Fang. 2014. "Synthesis and Characterization of Microencapsulated Paraffin with Titanium Dioxide Shell as Shape-Stabilized Thermal Energy Storage Materials in Buildings." *Energy & Buildings* 72:31–37.
- Çelik, Tahir and Khaled Marar. 1996. "Effects of Crushed Stone Dust on Some Properties of Concrete." *Cement and Concrete*

Research 26(7):1121–30.

- Cellat, Kemal, Beyza Beyhan, Caner Güngör, Yeliz Konuklu, and Okan Karahan. 2015. "Thermal Enhancement of Concrete by Adding Bio-Based Fatty Acids as Phase Change Materials." *Energy & Buildings* 106:156–63.
- Cellat, Kemal, Fatih Tezcan, Beyza Beyhan, Gülfeza Kardas, and Halime Paksoy. 2017. "A Comparative Study on Corrosion Behavior of Rebar in Concrete with Fatty Acid Additive as Phase Change Material." c:490–500.
- Chen, Zhi, Lei Cao, Feng Shan, and Guiyin Fang. 2013. "Preparation and Characteristics of Microencapsulated Stearic Acid as Composite Thermal Energy Storage Material in Buildings." *Energy & Buildings* 62:469–74.
- Cui, Hongzhi, Wenyu Liao, Xuming Mi, Tommy Y. Lo, and Dazhu Chen. 2015. "Study on Functional and Mechanical Properties of Cement Mortar with Graphite-Modified Microencapsulated Phase-Change Materials." *Energy & Buildings* 105:273–84.
- Dakhli, Zakaria, Khaled Chaffar, and Zoubair Lafhaj. 2019. "The Effect of Phase Change Materials on the Physical, Thermal and Mechanical Properties of Cement." *Sci* 1(1):27.
- Drissi, Sarra, Tung-chai Ling, Kim Hung, Anissa Eddhahak, Kim Hung Mo, and Anissa Eddhahak. 2019. "A Review of Microencapsulated and Composite Phase Change Materials: Alteration of Strength and Thermal Properties of Cement-Based Materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110(May):467–84.
- Eddhahak-Ouni, Anissa, Sarra Drissi, Johan Colin, Jamel Neji, and Sabine Care. 2014. "Experimental and Multi-Scale Analysis of the Thermal Properties of Portland Cement Concretes Embedded with Microencapsulated Phase Change Materials (PCMs)." *Applied Thermal Engineering* 64(1–2):32–39.
- Fernandes, Fabio, Shilpa Manari, Mathew Aguayo, Kevin Santos, Tandre Oey, Zhenhua Wei, Gabriel Falzone, Narayanan Neithalath, and Gaurav Sant. 2014. "Cement & Concrete Composites On the Feasibility of Using Phase Change Materials (PCMs) to Mitigate Thermal Cracking in Cementitious Materials." *Cement and Concrete Composites* 51:14–26.
- Fernández, A. Inés, Aran Solé, Jessica Giró-paloma, Mònica Martínez, Mila Hadjieva, Abdel Boudenne, Mariaella Constantinescu, Elena Maria, Marta Malikova, Igor Krupa, Conchita Peñalosa, Ana Lázaro, Halime O. Paksoy, Kemal Cellat, Jana Vecstaud, Diana Bajare, Bostjan Sumiga, Bojana Boh, Thomas Haussmann, Stefan Gschwander, Robert Weber, Piotr Furmanski, Maciej Jaworski, and Luisa F. Cabeza. 2015. "Unconventional Experimental Technologies Used for Phase Change Materials (PCM) Characterization : Part 2 – Morphological and Structural Characterization , Physico-Chemical Stability and Mechanical Properties." 43:1415–26.
- Figueiredo, António, José Lapa, Romeu Vicente, and Claudino Cardoso. 2016. "Mechanical and Thermal Characterization of Concrete with Incorporation of Microencapsulated PCM for Applications in Thermally Activated Slabs." *Construction and Building Materials* 112:639–47.
- Fu, Chao, Chunyan Xie, Jing Liu, Xiuli Wei, and Dake Wu. 2020. "A Comparative Study on the Effects of Three Nano-Materials on the Properties of Cement-Based Composites." *Materials* 13(4):857.
- Güçül, Gül Nihal and Merih Aydınalp Köksal. 2018. "Müstakil Bir Konutun Enerji Tüketiminin Azaltılmasında Kullanılan Yöntemlerinin Ekonomik Değerlendirmesi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2018(2018).
- Haydaraslan, Ersin, Burhan Çuhadaroğlu, and Yalçın Yaşar. 2020. "Kat Isıtmasında Yüzer Döşeme ve Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Enerji Verimliliğine ve Konfor Koşullarına Etkisi." *Mühendis ve Makina* 61(700):180–97.
- He, Fang, Xiaodong Wang, and Dezheng Wu. 2014. "New Approach for Sol e Gel Synthesis of Microencapsulated n - Octadecane Phase Change Material with Silica Wall Using Sodium Silicate Precursor." *Energy* 67:223–33.
- He, Fang, Xiaodong Wang, and Dezheng Wu. 2015. "Phase-Change Characteristics and Thermal Performance of Form-Stable n -Alkanes/Silica Composite Phase Change Materials Fabricated by Sodium Silicate Precursor." *Renewable Energy* 74:689–98.
- Hu C, Saucier F, Lanctôt MC, Clavaud B. 1999. "Investigation on the Strength Limit of Very High Strength Concretes." in 5th international symposium on utilization of high strength/high performance concrete. Sandefjord, Norway.
- Hunger, M., A. G. Entrop, I. Mandilaras, H. J. H. Brouwers, and M. Founti. 2009. "The Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials." *Cement and Concrete Composites* 31(10):731–43.
- Jiang, Mengjin, Xiaoqing Song, Guangdou Ye, and Jianjun Xu. 2008. "Preparation of PVA / Paraffin Thermal Regulating Fiber by in Situ Microencapsulation." 68:2231–37.
- Kayabaşı, Ramazan and Metin Kaya. 2020. "Fotovoltaik Modüllerde Faz Değiştiren Madde Kullanımı ve Verimlerine Etkisi." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 8(2):262–78.
- Konuklu, Yeliz, Murat Unal, and Halime O. Paksoy. 2014. "Solar Energy Materials & Solar Cells Microencapsulation of Caprylic Acid with Different Wall Materials as Phase Change Material for Thermal Energy Storage." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 120:536–42.
- Korkut, Özlem and Gülşah Torun. 2017. "Preparation Of Cement Based Composites And Cellulosic Panels From Barley Straw For Thermal Insulation." *Gazi University Journal of Science* 30(1):31–42.
- Lecompte, T., P. Le Bideau, P. Glouannec, D. Nortershauser, and S. Le Masson. 2015. "Mechanical and Thermo-Physical Behaviour of Concretes and Mortars Containing Phase Change Material." *Energy & Buildings* 94:52–60.
- Ling, Tung-Chai and Chi-Sun Poon. 2013. "Use of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Concrete: An Overview." *Construction and Building Materials* 46(September):55–62.
- Ma, Qinyong and Mei Bai. 2018. "Mechanical Behavior , Energy-Storing Properties and Thermal Reliability of Phase-Changing Energy-Storing Concrete." *Construction and Building Materials* 176:43–49.
- Ma, Yanhong, Shiding Sun, Jianguo Li, and Guoyi Tang. 2014. "Preparation and Thermal Reliabilities of Microencapsulated Phase Change Materials with Binary Cores and Acrylate-Based Polymer Shells." *Thermochimica Acta* 588:38–46.
- Marani, Afshin and Moncef L. Nehdi. 2020. "Machine Learning Prediction of Compressive Strength for Phase Change Materials Integrated Cementitious Composites." *Construction and Building Materials* 265:120286.
- Moosberg-Bustnes, H. 2004. "The Function of Fillers in Concrete." *Materials and Structures* 37(266):74–81.
- Navarro, Lidia, Alvaro De Gracia, Shane Colclough, Maria Browne, Sarah J. McCormack, Philip Grif, and Luisa F. Cabeza. 2016. "Thermal Energy Storage in Building Integrated Thermal Systems : A Review . Part 1 . Active Storage Systems." 88.
- Navarro, Lidia, Alvaro De Gracia, Dervilla Niall, Albert Castell, Maria Browne, Sarah J. McCormack, Philip Grif, and Luisa F.

- Cabeza. 2016. "Thermal Energy Storage in Building Integrated Thermal Systems : A Review . Part 2 . Integration as Passive System." 85:1334–56.
- Norvell, Chad, David J. Sailor, and Peter Dusicka. 2013. "The Effect of Microencapsulated Phase-Change Material on the Compressive Strength of Structural Concrete." *Journal of Green Building* 8(3):116–24.
- Oktay, Hasan, Recep Yumrutaş, and Zeki Argunhan. 2020. "An Experimental Investigation of the Effect of Thermophysical Properties on Time Lag and Decrement Factor for Building Elements." *Gazi University Journal of Science* 33(2):492–508.
- Ouglova, A., Y. Berthaud, and F. Foct. 2006. "Mechanical Properties of an Iron Oxide Formed by Corrosion in Reinforced Concrete Structures." 48:3988–4000.
- Paksoy, H., G. Kardas, Y. Konuklu, K. Cellat, and F. Tezcan. 2017. "Characterization of Concrete Mixes Containing Phase Change Materials." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 251:012118.
- Sarı, Ahmet, Cemil Alkan, and Ayşe Altıntaş. 2014. "Preparation, Characterization and Latent Heat Thermal Energy Storage Properties of Micro-Nanoencapsulated Fatty Acids by Polystyrene Shell." *Applied Thermal Engineering* 73(1):1160–68.
- Sarı, Ahmet, Cemil Alkan, and Ali Karaipekli. 2010. "Preparation , Characterization and Thermal Properties of PMMA / n - Heptadecane Microcapsules as Novel Solid - Liquid MicroPCM for Thermal Energy Storage." *Applied Energy* 87(5):1529–34.
- Schossig, P., H. Henning, and S. Gschwander. 2005. "Micro-Encapsulated Phase-Change Materials Integrated into Construction Materials." 89:297–306.
- Shan, X. L., J. P. Wang, X. X. Zhang, and X. C. Wang. 2009. "Thermochemical Acta Formaldehyde-Free and Thermal Resistant Microcapsules Containing n -Octadecane." 494:104–9.
- Soares, N., J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos. 2013. "Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems towards Buildings ' Energy Efficiency." *Energy & Buildings* 59:82–103.
- Ürge-vorsatz, Diana, Luisa F. Cabeza, Susana Serrano, and Camila Barreneche. 2015. "Heating and Cooling Energy Trends and Drivers in Buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:85–98.
- Xu, Biwan and Zongjin Li. 2013. "Paraffin / Diatomite Composite Phase Change Material Incorporated Cement-Based Composite for Thermal Energy Storage." *Applied Energy* 105:229–37.
- Zhang, Zhengguo, Guoquan Shi, Shuping Wang, Xiaoming Fang, and Xiaohong Liu. 2013. "Thermal Energy Storage Cement Mortar Containing N-Octadecane / Expanded Graphite Composite Phase Change Material." *Renewable Energy* 50:670–75.