



KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi Journal of Engineering Sciences

2022

SAYI / NUMBER : 3

CILT / VOLUME : 25



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

<http://jes.ksu.edu.tr/>

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.

This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.



Sahibi / Owner

Prof.Dr. Niyazi CAN
KSU Rector

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Hüseyin TEMİZ
htemiz@ksu.edu.tr

Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

Assist. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER
zeynepozger@ksu.edu.tr

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
asyilmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet ALKAN
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
aalkan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL
Civil Eng.
KSU Univ. TURKEY
munsal@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet KAYA
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
kaya38@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
Civil Eng.
Atatürk Univ.,TURKEY
rsahin@atauni.edu.tr

Prof Dr. Yücel ÖZMEN
Mechanical Eng.
Karadeniz Teknik Univ.,TURKEY
yozmen@ktu.edu.tr

Prof.Dr. Özlem TURGAY
Food Eng.
KSU Univ. TURKEY
ozlem@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU
Landscape Arc.
KSU Univ. TURKEY
fmengelo@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI
Electrical Eng.
İstanbul Teknik Univ, TURKEY
akincitc@itu.edu.tr

Prof. Dr. Kristina SARIC
Geological Eng.
University of Belgrade, SERBIA
kristina.saric@rgf.bg.ac.rs

Prof. Dr. Ramazan GÖKÇE
Food Eng.
Pamukkale Univ., TURKEY
rgokce@pau.edu.tr

Prof. Dr. A. Mehmet YÜCEER
Chemical Eng.
İnönü Univ., TURKEY
mehmet.yuceer@inonu.edu.tr

Assoc. Prof.Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ., TURKEY
tamer@ksu.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Fethullah GÖÇER
Industrial Eng.
KSU Univ. TURKEY
fgocer@ksu.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Yakup CUCİ
Environmental Eng.
KSU Univ. TURKEY
cuci@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Erdem SELVER
Textile Eng.
KSU Univ. TURKEY
esilver@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Hasan BADEM
Computer Eng.
KSU Univ. TURKEY
hbadem@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Beril ÖZÇELİK
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
bozcelik@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Özdeş ÇERMİK
Language Editor
KSU Univ. TURKEY
ozdescermik@ksu.edu.tr

Research Assist. Fahriye GEMCİ
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
fahriyegemci@ksu.edu.tr

Res. Assist. Dr. S.Hatice GÖKLER
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sedahaticegokler@ksu.edu.tr

Res. Assist. Elif ÇELİK
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
elifcelik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Sermet AYMAN
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sayman@ksu.edu.tr

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Cetin Kaya KOC

Dep. of Computer Eng.
Univ Of Cal.
Santa Barbara. USA
koc@cs.ucsb.edu

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Sakarya Univ. Sakarya,
TURKEY
aozdemir@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK

Dep. Of Elcn & Comm Eng.
İTU Univ.
İstanbul. TURKEY
korurek@itu.edu.tr

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ

Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI

Dep. of Mechanical Eng.
Alanya Alaaddin Keykubat
Univ. Antalya, TURKEY
apinarbasi@alanya.edu.tr

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER

Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
YBU Univ.
Ankara, TURKEY
serel@ybu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT

Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul. TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK

Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul. TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI

Dep. of Civil Eng.
Brunel Univ.
Uxbridge, UK
mizi.fan@brunel.ac.uk

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY

Dep. of Microelectronics
Panjab Univ,
Chandigarh, India
amit_chaudhry01@yahoo.com

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras. TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Selim AY

Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul. TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Murat PALA

Dep. of Civil Eng.
Adıyaman Univ.
Adıyaman. TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ

Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş. TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



BU SAYIYA (CİLT 25 SAYI 3) KATKI VEREN HAKEMLER

Harun TÜRKMENLER

Yahya CAN

Meryem GÖKSEL SARAÇ

Burcu ERCAN

İlknur ŞENTÜRK

Volkan BAŞER

Meral OLTULU

Şemsettin KILIÇARSLAN

Tayyip ÖZCAN

Mehmet Tahir ERDİNÇ

Oğuz Akın DÜZGÜN

Atila KUMBASAROĞLU

Berna YAVUZ PEHLİVANLI

Abdurrahman ÖZBEYAZ

Mustafa OKUMUŞ

Hussein DALFİ

Nazan Yalçın ERİK

İsmail ALTIN

Sami ŞİT

Yakup CUCİ

Hasan CANGİ

Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Bülent ÖZKAN

Kubilay Muhammed SÜNNETCİ

Kemal DELİHACIOĞLU

Fatih KANTARCI

Fevzi HANSU

Ertuğ AYDIN

Kamil VARINCA

Rıfat BATTALOĞLU

Nazife YILMAZ

Muhammet Ömer DİŞ

Emre Oğuz KÖROĞLU

Fatih DÖNER

Şemsi YAZICI

Selçuk ASLAN

Nuh AZGINOĞLU

Halil İbrahim BURGAN

Kemal BEYEN

Muhittin KARAMAN

Eser SERT

Hasan ESKALEN

Mehmet Erdem İNCE

Muhammet ÇINAR

Mehmet DAŞ

Müjdat FIRAT

Ramazan SOLMAZ

Derya KILIÇASLAN

Mehmet Latif LEVENT

Elif ERZAN TOPÇU

Mehmet İsmail GÜRSOY

Furkan DİNÇER

İsrafil KARADÖL

Enes EKİNCİ

Ahmet Hayrullah SEVİNÇ



İÇİNDEKİLER

- Adıyaman İlinin Katı Atıkların Elektrik Potansiyelinin Belirlenmesi**
Determination The Electric Potential Of Solid Waste in Adıyaman Province 173-182
Hakkı GÜLŞEN, Abdurrahman AKKUŞ, Abdurrahman YOLUN, Mustafa ASLAN
- Memran Teknolojileri Ve Membran Teknolojilerinin Elektrosinning Yöntemi İle Nano Lif Üretimi Üzerine Literatür Taraması**
Literature Search On Memran Technologies and Membrane Technologies On Nano Fiber Production By Electrosinning Method 183-211
Abdullah GÜL, İsmail TİYEK
- Farklı Renk Karabiber Esansiyel Yağların Karakteristik Özellikleri: Ön İşlem Mikrodalga Uygulamasının Etkisi**
Characteristics Of Different Colored Black Pepper Essential Oils: Effect Of Pretreatment Microwave Treatment 212-221
Tuğba DEDEBAŞ
- Taşkın Yayılım Haritalarında Arazi Kullanım Türü Ve Yüzeysel Akış Etkilerinin Değerlendirilmesi: Malatya İli Örneği**
Evaluation Of Land Use Type And The Effects Of Runoff In Flood Inundation Maps: The Case Of Malatya Province 222-236
Burak ÇIRAĞ, Mahmut FIRAT
- Organik Atıklardan Üretilen Kompozit Bir Modifiye Biyokömür Kullanılarak Sulu Çözeltilerden Safranin T Giderimi**
Safranin T Removal From Aqueous Solution Using a Composite Modified Biochar Produced From Organic Wastes 237-248
Dilek GÜMÜŞ
- Yayla Alanlarında Yapılaşmanın İncelenmesi: Bolu Atyaylası Örneği**
Investigation Of Construction On Summer Pasturelands: Case Of Bolu Atyaylası 249-258
Muzaffer Can İBAN, Muhammed Eren KILIÇ
- Fresh and Hardened State Properties Of SCCs Prepared With Lısmestone-Based Manufactured Aggregates and Powder**
Kireçtaşı Esaslı Kırmataş Agrega Ve Taş Tozu İle Hazırlanan Kyb'lerin Taze Ve Sertleşmiş Hal Özellikleri 259-272
Cengiz ŞENGÜL, Hayati HİLMİOĞLU, M. Hulusi ÖZKUL

- Lineer Olmayan Sistemlerin Kimliklendirilmesi İçin Kelebek Optimizasyon Algoritması Kullanılarak İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağının Eğitimi**
Training Of Feed Forward Neural Network By Using Butterfly Optimization Algorithm For Identification Of Nonlinear Systems 273-284
Ceren BAŞTEMUR KAYA
- SPI Ve SPEI İle Samsun İli Kuraklık Analizi**
Samsun Province Drought Analysis With SPI And SPEI 285-295
Mehmet İshak YÜCE, Hafzullah AKSOY, Ali AYTEK, Musa EŞİT, Fetihhan UĞUR, İslam YAŞA, Abdulselam ŞİMŞEK, İbrahim Halil DEGER
- Bodrum Katlarda Rijit Bodrum Perde Tasarımının Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi**
The Influence of Basement Rigid Wall Design on Structural Behavior 296-312
İsmail ÜNSAL, M. Fatih ŞAHAN
- Şaphane (Çorum) Damar Tipi Altın (Au) Cevherleşmesinde Multispektral Uydu Görüntüleri Kullanılarak Hidrotermal Alterasyon Mineral Haritalaması Ve Çizgisellik Analizi**
Hydrothermal Alteration Mineral Mapping and Lineament Analysis Using Multispectral Satellite Images in Vein Type Gold (Au) Mineralization In Şaphane (Çorum) 313-328
Oktay CANBAZ, Esra Ünal ÇAKIR
- Mekansal Piramit Havuzlama Tabanlı Evrişimli Sinir Ağı İle Otomatik Drone Sınıflandırma**
Automated Drone Classification With a Spatial Pyramid Pooling-Based Conventional Neural Network 329-340
Deniz KORKMAZ, Hakan AÇIKGÖZ
- Çinko Oksit Nanoparçacık Sentezlenmesi Ve E7 Nematik Sıvı Kristalinin Dielektrik Ve Kapasitansa Etkisi**
Synthesis Of Zinc Oxide Nanoparticle and Its Effect Of E7 Nematic Liquid Crystals On Dielectric And Capacitance 341-348
Şükrü ÖZĞAN, Fatma Betül YILDIZ
- Compressive Behavior of a Novel Core Material for Sandwich Composites**
Sandviç Kompozitler İçin Özgün Bir Çekirdek Malzemesinin Basma Davranışı 349-355
Neslihan HAYTA, Gaye KAYA
- Stabilizasyonda Kireç Ve Tüflerin Birlikte Kullanımının Bentonit Dayanımına Etkisi**
The Effect Of Using Lime and Tuff Together In Stabilization On The Strength On Bentonite 356-369
Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU
- Binalarda Isı Kaybına Neden Olan Yapısal Sorunların Termal Kamera Görüntüleme Tekniği İle Değerlendirilmesi**
Evaluation Of Structural Problems That Cause Heat Loss In Buildings With Thermal Camera Imaging Technique 370-380
Ali ELHUYEYDİ, Faruk ORAL
- Dizel Motorlarda Dimetil Eter Kullanımının NOx Emisyonlarına Etkileri Üzerine Bir Derleme Çalışması**
A Review Study On The Effects Of Dimethyl Ether On NOx Emissions In Diesel Engines 381-398
İsmet SEZER

- DC Motora Uygulanan LQR Kontrolcü İçin Ağırlık Matrislerinin Nsga-II Tabanlı Çok Amaçlı Optimizasyonu
Nsga-II Based Multi-Objective Optimization Of Weight Matrices For LQR Controller Applied To DC Motor 399-407
Ali Fazıl UYGUR
- Bölgesel Olarak Toplanan Atık Li-İyon Pillerinin Geri Dönüşümünde İçerik Ve Maliyet Analizlerinin Belirlenmesi
Determining The Content And Cost Analysis Of Recycling Regionally Collected Waste Li-Ion Batteries 408-417
Hasan AKSU, Cengiz Ayhan ZIBA, Mehmet Hakan MORCALI
- Mopso Tabanlı LQG Servo Kontrol Yaklaşımı İle Araç Üzerinde Konumlu Ters Sarkacın Kontrolü
Control Of The Inverted Pendulum On A Cart With The Mopso-Based LQG Servo Control Approach 418-433
Ali Fazıl UYGUR
- Kendi Kendini Konfigüre Edebilen Robotik Bir Sistem İçin Mikro Ölçekte Elektromanyetik Dış Eyleyici Tabanlı Hareket Modeli Geliştirilmesi
Developing External Magnetically Actuation Model In Micro Scale For A Self-Reconfigurable Robotic System 434-449
Halil İbrahim DOKUYUCU, Nurhan GÜRSEL ÖZMEN
- Gömülü Ve Sarıcı Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Kullanılması İle Akciğer Rahatsızlıklarının Tespiti
Detection Of Lung Disorders Using Embedded And Wrapper Feature Selection Methods 452-460
Mustafa Alptekin ENGİN, Selim ARAS
- Nesnelerin İnterneti (IOT) Uygulamaları İçin Polarizasyondan Bağımsız Metamalzeme Emici Tabanlı Enerji Hasatlama
Polarization-Independent Metamaterial Absorber Based Harvesting For Internet Of Things (IOT) Applications 461-471
Ayşe İNCESU DOKUMACI, Vedat ÖZKANER, Muharrem KARAASLAN
- İki Farklı Pomza Agregası İçeren Cam Tozu Katkılı Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
Investigation Of Physical And Mechanical Properties Of Glass Powder Additive Concretes Containing Two Different Pumice Aggregates 472-479
Ali CEYHAN, Ahmet Hayrullah SEVİNÇ, Yusuf URAS
- OG-AG Elektrik Şebekelerinde Dinamik Kontrollü Kompanzasyon Uygulaması
Dynamically Controlled Compensation Application In MV-LV Electric Grids 480-490
Ramazan SOLMAZ, Muhammet SARI, Fatih BALTACI, Mustafa TEKİN
- Mechanical Properties Of Mortars Containing Wood Bottom Ash Instead Of Cement
Çimento Yerine Odun Taban Külü İçeren Harçların Mekanik Özellikleri 491-502
Mehmet Timur CİHAN, Yunus Emre AVŞAR



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :02.08.2021
Kabul Tarihi : 01.06.2022

Received Date : 02.08.2021
Accepted Date : 01.06.2022

ADİYAMAN İLİNİN KATI ATIKLARIN ELEKTRİK POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION THE ELECTRIC POTENTIAL OF SOLID WASTE IN ADİYAMAN PROVINCE

*Hakki GÜLŞEN*¹ (ORCID: 0000-0002-0726-555X)
*Abdurrahman AKKUŞ*¹ (ORCID: 0000-0001-9130-7195)
*Abdurrahman YOLUN*² (ORCID: 0000-0001-5938-3534)
*Mustafa ASLAN*¹ (ORCID: 0000-0002-9283-7654)

¹ Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye
² İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Abdurrahman YOLUN, abdurrahmanyolun@gmail.com

ÖZET

Günümüzde enerji kaynakları hızla artmakta ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde bir çok ülke yoğunlaşmaktadır. Bu teknolojilerin temelinde anaerobik çürütme ve deponi gazı üretimi bulunmaktadır. Depo sahasında oluşan depo gazı borularla toplanacak ve booster yardımıyla elektrik üretim tesisine iletilecektir. Booster ünitesinde ise gaz analizi otomatik olarak yapılacak ve öncelikle gaz içerisindeki hidrojen sülfürün (H₂S) giderilmesi sağlanacaktır. Daha sonra toplanan bu gazın biyogaz soğutucusundan geçirilmesinin akabinde biyogaz motorudan sonra trafoya aktarılacak ve ulusal elektrik şebekesine verilecektir. Adıyaman ilinde günlük toplanan yaklaşık 400 ton katı atık içerisinde %45-55 oranında bulunan organik atıklardan yıllık 4,160,440 m³ biyogaz üretilmesi hedeflenmiştir. Depolama alanına gelen yıllık katı atık miktarı yaklaşık 140,000 ton arasında olup çıkan enerji miktarı 32,956,035 kwh olması beklenmektedir. Bu çalışma sayesinde Adıyaman ilindeki katı atıkların elektrik potansiyelinin belirlenmesi ile ülke ekonomisine büyük katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, belediye atıkları, yenilenebilir enerji, fermantasyon

ABSTRACT

Today, energy resources are increasing rapidly and many countries are focusing on renewable energy resources. On the basis of these technologies there are anaerobic digestion and landfill gas production. The landfill gas generated in the storage area will be collected by pipes and will be transmitted to the electricity generation facility with the help of booster. In the booster unit, gas analysis will be done automatically and first of all, the hydrogen sulfide (H₂S) in the gas will be removed. After this collected gas is passed through the biogas cooler, it will be transferred to the transformer after the biogas engine and will be supplied to the national electricity grid. In Adıyaman province, which is 45-55% in approximately 400 tons of solid waste collected daily, it is aimed to produce 4,160,440 m³ of biogas annually from organic waste. The annual amount of solid waste arriving at the landfill is approximately 140,000 tons and the energy output is expected to be 32,956,035 kWh. Thanks to this study, it is expected that the determination of the electricity potential of solid wastes in Adıyaman will make a great contribution to the country's economy.

Keywords: Biogas, municipal waste, renewable energy, fermentation

ToCite: GÜLŞEN, H., AKKUŞ, A., YOLUN, A., & ASLAN, M., (2022). ADİYAMAN İLİNİN KATI ATIKLARIN ELEKTRİK POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(3), 173-182,

GİRİŞ

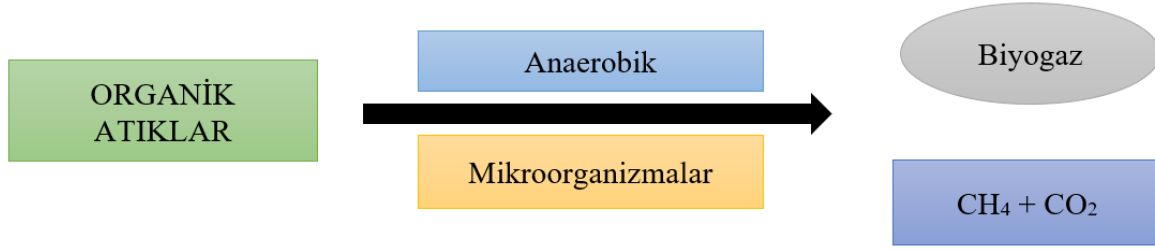
Hızla büyüyen ve sanayisi gelişen ülkemizde en temel ihtiyaçların ilk sırasında enerji gelmektedir (Ascı, 2018). Artan sera gazı salınımının güneş ışınlarını geri yansıtması yeryüzündeki sıcaklık dengelerini etkilediği için küresel ısınmaya neden olmaktadır (Yavrucu, 2019). Ülkelerin kendilerini geliştirmeleri ve günümüz çağındaki teknolojik gelişmeleri hızla takip ederek gelişen dünya standartlarına ayak uydurmaları için en önemli parametrelerden biri enerji kullanımınıdır. Bu yüzden de yenilenebilir enerji kaynakları daha yaşanılabilir bir dünya için daha da önemli bir konu haline gelmektedir. Özellikle fosil yakıtlarda meydana gelen maliyet artışları ve bilimsel çalışmalar sonucunda ispatlanmış tükenmişliğe doğru giden fosil yakıtlar ile birlikte dünyada enerji kaynaklarının kullanımı konusundaki çalışmalar, önemli ve hızlı bir şekilde dünyada etkisini arttırmaktadır. Bu açıdan yenilenemez enerji kaynakları yerine doğa dostu olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek daha rasyonel hale gelmiştir (Ascı, 2018; Yavrucu, 2019).

Temiz enerji kaynaklarının başında biyokütle, güneş, rüzgâr, jeotermal ve hidrolik gelmektedir. Bu enerji kaynakları arasında biyokütle enerjisi önemli bir yer tutmaktadır (İlkılıç ve Deviren, 2011). Elde edilen biyogaz enerjisi üretim santrallerinde, yerel çapta aktarılan veya şebekeye aktarılan elektrik enerjine dönüştürülmektedir. Yanma aşamasında açığa çıkan ısı enerjisi tesis içinde ve dışındaki binalar, evler veya seraların ısıtılmasında ve ahırların iklimlendirilmesinde kullanılmaktadır (Saz, 2015). Ancak CO₂ oranı %50-55 görülse de metan gazı karbondioksit oranla 20-25 kat daha verimli olması sebebiyle metan gazı oranının azaltılması son derece büyük önem arz etmektedir (Kankılıç, 2015). Çöp depolama alanları %22'lik oran ile Amerika Birleşik Devletleri'nde olmakla beraber, insanlar tarafından atılan çöplerle metan gazı üretiminin ikinci büyük kaynağı olarak kaydedilmiştir. Katı atık depolama sahalarında oluşan %21'lik metan gazı üretiminin ikinci büyük kaynağı Avrupa'da kaydedilmiştir. Çöp depolama alanları dünya genelinde yılda büyük ölçeklerde metan emisyonunu atmosfere vermektedir (Denman et al., 2007). Katı atık sahalarında biriken depo gazı lotlarının üstü kapatıldıktan sonra toplama sistemi yardımı ile ana toplayıcıya iletilmektedir. Sistemden çıkan enerjiyi elde etmek için, toplanan gazın, su ve toz taneciklerinden giderilmesi gerekmektedir. Bunun için özel olarak hazırlanmış filtreler vasıtasıyla tutulması işlemlerinden geçirilir. Bir sonraki aşamada depolanan gaz jeneratör ve motor yardımıyla yakılarak elektrik enerjisine dönüştürülür (Çelebi, 2017). Bu sayede düzenli depolama sistemlerinde elde edilen gaz, enerji temini konusunda önemli bir alternatif kaynak teşkil etmektedir. Katı atıklarından düzenli depolama ile oksijensiz (anaerobik) çürütme yöntemleri ile oluşan gaz (LFG) kojenerasyon sistemlerinde yanmalı motorlar yardımıyla yakılması sonucu enerji üretimi sağlanmaktadır. Düzensiz depolanma, atık bertaraf yöntemlerinin en eskisidir.

Atıkların arazilere gelişigüzel atılması ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Arazilere atılan katı atıklardan dolayı doğal çevre ve insan sağlığı bakımından çok sayıda istenmeyen nedenlere sahip bu bertaraf şekli nedeniyle dolayı çöplerden çıkan kötü koku, çöplerin rüzgâr etkisi ile etrafa yayılarak hoş olmayan görüntü kirliliğine neden olması, sinek, fare ve haşere gibi insan sağlığını ciddi şekilde etkileyen türlerin üreme ve barınma meskeni olması, çöp kaynaklarından yayılan sızıntı sularının yeraltında ve yerüstünde bulunan su kaynaklarını kirletmesi ile suda yaşayan canlı grupların olumsuz etkilenmesi olarak sayılabilir. Düzenli depolama sahası katı atıkların, yeraltı sularına zarar vermeyecek şekilde sızdırmazlık özellikleri sağlanmış olan bu alanlara dökülmesi, preslenmesi ve üzerinde kalın toprak ile örtülerek doğal biyolojik reaktör şekline getirilmesi olarak tanımlanabilir (Kankılıç, 2015). Buna bağlı olarak yaptığımız çalışmada, bahsedilen ve daha pek çok avantajından dolayı Adıyaman ilinin katı atıkların çöp depolama alanındaki katı atıkların organik bölümleri (yaklaşık % 45-55) depolama yapıldıktan kısa süre sonra çürümeye başlayıp metan gazı üretmeye başlanacaktır. Yine bilindiği gibi metan gazı atmosfere bırakıldığında sera gazı etkisi yaparak doğal çevreye zarar verir. Ayrıca katı atık sahası çevresinde kokuya neden olan bu metan gazları toplanıp yakılarak veya motorlarda tüketilerek bertaraf edilirse, vereceği zararlar hem önlenmiş olur hem de bu motorların üreteceği elektrik ülkeye kazanılmış olur.

Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar

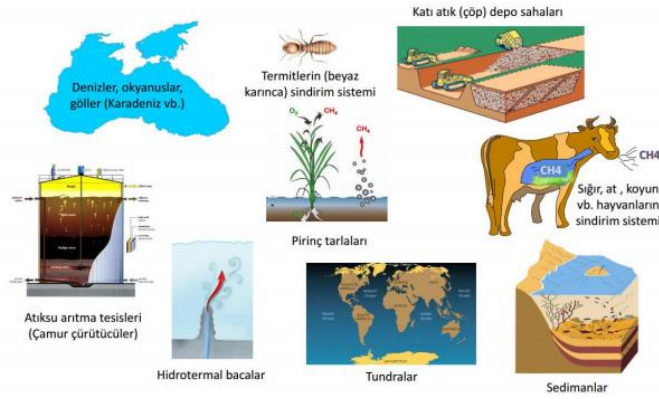
Biyogaz, biyokütle oksijensiz ortamda ve anaerobik çürümeye sonucunda elde edilen yanıcı bir gazdan oluşur. Bu gaz öteki gaz kaynaklarından farklı olarak bitkisel veya hayvan kaynaklı organik hammaddelerden elde edilir. Organik atıklar, biyolojik atıklar, mısır veya şeker pancarı ve gıda sanayii kaynaklı olanlar gibi enerji kaynağı olan bitkiler ile hayvan besiciliğinde oluşan hayvansal dışkıları biyogaz tesisinde doğal hammadde kaynağı olarak da oluşturmaktadır. Karbondioksit göre 20-25 kat daha fazla metan gazı sera etkisine sebep olur. Bu bakımdan endüstriyel, bitkisel ve hayvansal atık kaynaklı biyogaz enerjisinin elde edilmesi, ülke ekonomik getirisi fazladır (Saz, 2015; Deviren vd., 2017). Şekil 1'de biyogaz basit gösterimi görülmektedir.



Şekil 1. Organik Atıklardan Biyogazın Elde Edilmesi

Atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarı atıkların kimyasal yapısına C/N oranına ve biyokimyasal olarak parçalanma özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Yakılacak atık Şekil 2’de görüldüğü gibi evsel atıklar, endüstri atıkları, kurutulmuş arıtma tesisi çamuru, organik atıklar ve hayvansal atıklardır (Gönüllü, 2006).

Biyogaz (CH₄) Üretilen Ortamlar

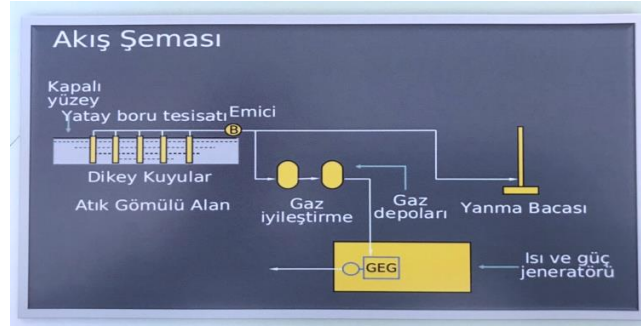


Şekil 2. Biyogaz Atıkları

Biyogazdan Elektrik Enerji Üretimi

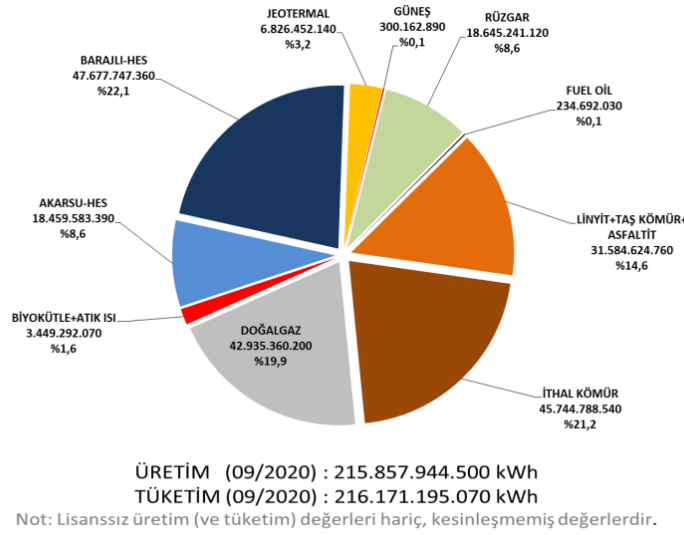
Biyogaz enerji kaynakları çok yönlü bir enerji kaynağı olup ısıtma, iklimlendirme ve elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılabilir. Bu enerjinin yapısında % 95 metan gazı içeren biyogaz doğalgaz rezervuarlarında değişiklik yaparak doğalgazın yerine kullanılabilir. Bunun nedeni materyalin organik bileşenlerinden üretilen biyogaz çok temiz bir yan ürüne sahiptir. Ülkelerin ekonomik gelişimleri göz önüne alındığında, elektrik enerjisinin elde edilmesi için yeni nesil enerji kaynaklarının kullanımının artırılması büyük fayda sağlamaktadır. Bu doğrultudaki çalışmalar, ilgili kurumların daha önceden belirledikleri mevzuatların incelenmesiyle başlamaktadır. Sonrasında, biyogaz tesisinde üretilen elektrik enerjisinin iç ve dış piyasaya satılabilmesi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından verilen "Yenilenebilir enerji kaynak belgesi (YEK Belgesi)"ni temin etmesi gerekmektedir. Bununla birlikte güncel 2020 EPDK verilerinin yer aldığı aynı tabloda, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok devlet desteğinin verildiği kaynaklar arasında güneş enerjisi ve biyogazın geldiği dikkat çekmektedir (Şenol, 2017).

Katı atık düzenli depolanma tesislerinde depolanan biyogazın, içten yanmalı elektrik motorları için yakıt olarak kullanılarak jeneratörler desteğiyle elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanan sistemin genel çalışma prensibi Şekil 3’te görülmektedir. Çöp sahasından metan gazlarını toplayıp elektrik enerjisine çevirme işlemine "Deponi gazından enerji üretimi" denilmektedir. Deponi gazını sahadan toplamak için, düzenli katı atık sahasına uygun aralıklarla gaz kuyuları açılıp, bu gaz kuyularına gaz toplama boruları dönecektir. Bu gaz toplama boruları da ana gaz toplama borusunda toplanıp gaz emici Booster ünitesine bağlanacaktır. Booster sisteminde gaz analizi otomatik olarak yapılacak ve gaz, elektrik üretim motoruna yönlendirilerek elektrik üretilecektir. Üretilen elektrik, şalt sisteminde şebekeye uygun gerilim seviyesine çıkarılarak ulusal elektrik şebekesine verilecektir (Kömürlü ve Akyel, 2018).

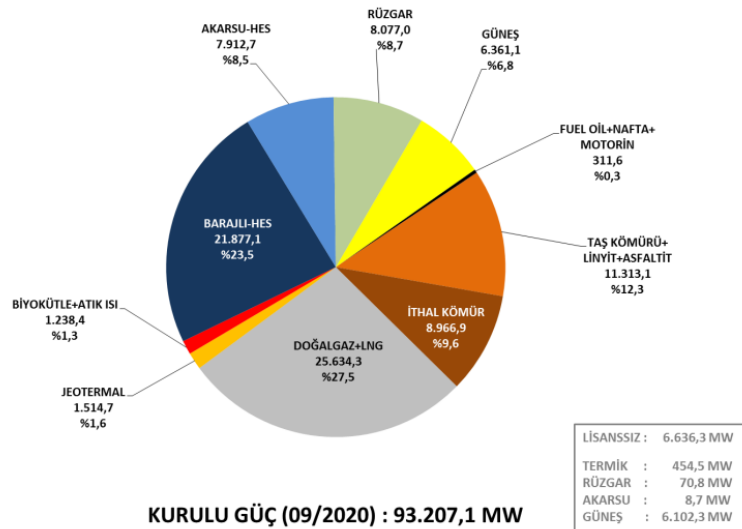


Şekil 3. Biyogazın Elektrik Enerjisine Dönüştürülmesi

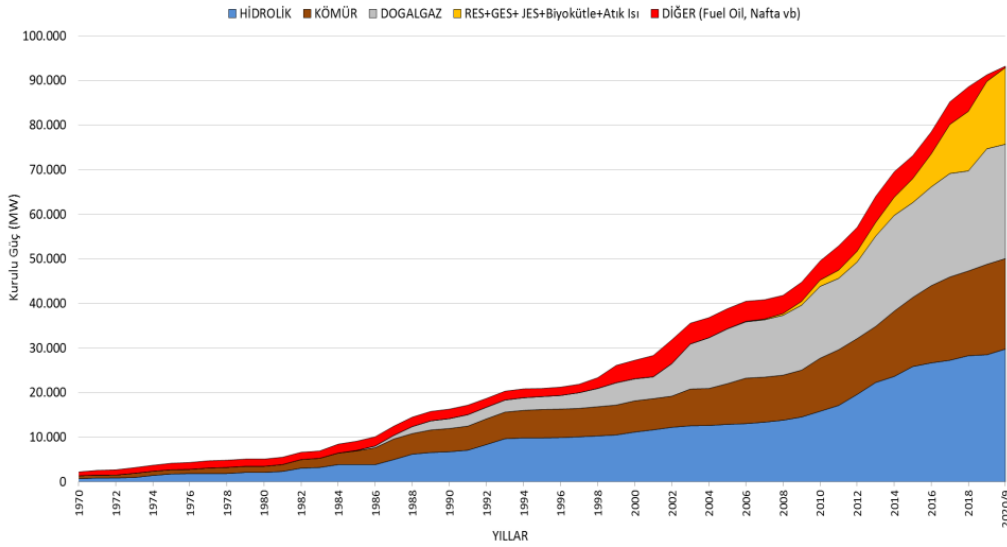
Şekil 4’de 2020 yılına ait enerjilerin üretim ve tüketim değerleri görülmektedir. Şekil 5’te 2020 yılına ait yıllara göre değişimini gösteren elektrik enerjisinin üretim kaynaklarına göre dağılımları grafik verilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 6’da verilen eğride görüldüğü üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimindeki oranının son yıllarda gittikçe arttığı görülmektedir (Behçet vd., 2014).



Şekil 4. 2020 Yılına Ait Enerjilerin Üretim ve Tüketim Değerleri



Şekil 5. 2020 Yılına Ait Elektrik Enerjisi Kurul Gücünün Üretim Kaynaklarına Göre Dağılımları



Şekil 6. Türkiye'deki Elektrik Enerjisi Kurulu Gücünün Değişimi

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, ilk olarak Adıyaman ilinin nüfus hesabı yapılacaktır;

$$N = N1 \times A \quad (1)$$

N: Hesaplanan yıl
N1: Bir önceki yıl
A: Nüfus artış hızı

Daha sonra yapılan nüfus hesaplamalardan çıkan bu sonuçla Katı Atık miktarı hesabı yapılacaktır. Katı Atık miktarı hesabı;

$$K = K1 \times e^M \quad (2)$$

K: Eysel katı atık miktarı (ton)
K1: Önceki yılın evsel katı atık miktarı (ton)
M: Belediyede yıllık çıkan katı atık miktarı (ton)

Son olarak da katı hesabından çıkan sonuçla depo gazı hesabı yapılır. Bunun için LandGEM (Landfill Gas Emission Model) Modeli depo gazı Hesabı yapılacaktır.

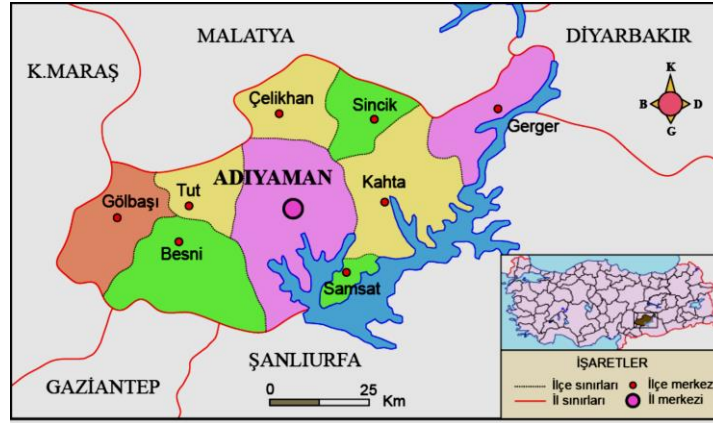
$$Q = 2.L_0.m_0.(e^{-x} - e^{-y}) \quad (3)$$

Q: t yılda üretilmesi beklenen gaz miktarını, (m³/yıl)
L₀: Depolanan evsel katı atığın metan üretim potansiyeli (140-180 m³ CH₄/ton KKA)
m₀: Depolanan yıllık ortalama atık miktarı (ton/yıl)
x: Metan gazı üretim hızı sabiti (0.15)
y: Depo gazının kapatıldıktan sonraki süre (yıl)

Adıyaman Hakkında Genel Bilgiler

Adıyaman ili coğrafi konumu nedeni ile Doğu Anadolu Bölgesi ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi arasında geçiş vazifesi gören bir şehirdir. Bu da Adıyaman'ın Orta Fırat bölümü içinde yer aldığını göstermektedir. Adıyaman ilinin Kuzey noktasında Malatya ili, Batı noktasında Kahramanmaraş ili, Güneydoğu noktasında Şanlıurfa ili Güneybatıda Gaziantep, Doğuda ise Diyarbakır ili bulunmaktadır. Adıyaman ilçesinin bir kısmı Doğu Anadolu Bölgesinin

içerisinde, diğer kısmı ise Akdeniz Bölgesi içerisinde yer almaktadır. Bu sebepten dolayı Adıyaman ili coğrafik durumu nedeniyle dört mevsimi yaşayan bir ilimizdir. Tarih boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yapan Adıyaman ili Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır. Adıyaman ili; 39 derece doğu boylamı, 37 derece 25 dakika ile 38 derece 11 dakika kuzey enlemi, 37 derece ve arasında yer almaktadır. Yüzölçümü 7,614 km² olan Adıyaman İli gölleri ile beraber 7,871 km² olup, rakım değeri ise 669 m'dir. Şekil 7'de Adıyaman ili ve ilçelerini gösteren bir harita verilmiştir (Gönüllü, 2006; Behçet vd., 2014).



Şekil 7. Adıyaman İl ve İlçeleri

Adıyaman İli Katı Atık ve Nüfus Değerleri

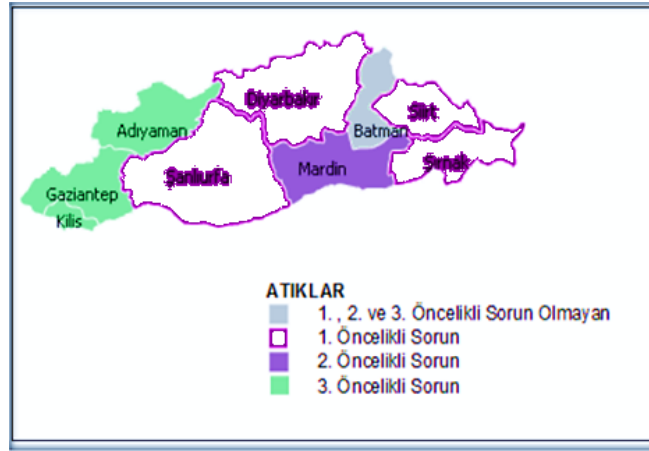
Çevre ve insan sağlığı açısından önemli bir risk oluşturan Adıyaman ilindeki katı atık miktarı önemli boyuttadır. Çöp depolama alanındaki katı atıkların organik bölümleri %45-55 arasında depolanmaktadır. Tablo 1'de Adıyaman katı atık kompozisyonu verilmiştir. Bu çalışmada çeşitli yönleriyle ortaya konulacak olan ile ait katı atıklar, başlıca aşağıdaki kaynak ve çeşitlerden oluşmaktadır:

- Evsel katı atıklar; Günlük faaliyetler sonucu evde oluşabilecek zararlı ve tehlikeli atık grubuna girmeyen her çeşit katı atıklar evsel atık grubuna dâhil edilmektedir.
- Endüstriyel katı atıklar; Sanayi tesisleri ve büyük fabrikalarda çıkan tehlike arz etmeyen atıklardır.
- Tehlikeli atık türleri genel olarak; Çevre ve insan sağlığı için tehlikeli olabilecek atıklardır.
- Tıbbi atıklar; Başta hastaneler olmak üzere sağlık kuruluşlarında oluşan tehlike arz eden atıklardır.
- İnşaat ve yıkım atıkları; Her türlü inşaat atıklarının yıkımı, tadilatı, tamiri, yıktırılması gibi sebeplerden oluşan atıklardır (Kankılıç, 2015).

Tablo 1. Adıyaman Katı Atık Kompozisyonu

Atık Bileşenleri	Yüzde (%)
Organik atık	55
Plastik	25
Cam	5
Metal	1
Kağıt	5
Kül	1
Diğer yanabilen maddeler	9

İçerisinde bulunduğu Güney Doğu Anadolu bölgesi ele alındığında, Adıyaman ili katı atık düzensiz depolanma problemi bakımından 3. öncelikli sorun teşkil eden iller arasında yer almaktadır. Şekil 8’de güneydoğu anadolu bölgesinde atık öncelikleri haritası görülmektedir.



Şekil 8. Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde Atık Öncelikleri Haritası

İldeki katı atık bertaraf sorunu, merkez ve ilçelerinde artan nüfusla Tablo 2’de görüldüğü 2019 yılına ait olup günümüzde daha da büyümüştür. Bununla birlikte Adıyaman ilindeki atıklar, yakın tarihlere kadar çevre açısından önemli sorunlara yol açabilecek, ormanlık alanlara, yol kenarlarına veya yüzeysel su kaynakları civarına dökülmüştür (Gönüllü, 2006).

Tablo 2. Adıyaman İli ve İlçelerinin Nüfusu

İLÇE	İLÇE NÜFUSU	ERKEK NÜFUSU	KADIN NÜFUSU	NÜFUS YÜZDESİ
Merkez	308915	155396	153519	%49.31
Kahta	123861	62976	60885	%19.77
Besni	76674	38569	38105	%12.24
Gölbaşı	49253	24795	24458	%7.86
Gerger	17552	8795	8757	%2.80
Sincik	16855	8398	8457	%2.69
Çelikhan	15470	7960	7510	%2.47
Tut	9905	5112	4793	%1.58
Samsat	7980	4111	3869	%1.27

Adıyaman da kişi başına düşen evsel atık miktarı Tablo 3’teki güncel TÜİK verilerine göre; 2018 yılı için yaklaşık olarak 1,02 kg/kişi-gündür. Adıyaman ilinde meydana gelen atıklar evsel, belediye ve ilçe belediyelerin atıkları, tıbbi ve endüstriyel atıklardır. TÜİK verilerinin yer aldığı Tablo 4’de görüldüğü üzere Adıyaman ilinin nüfusu göz önüne alındığında günde ortalama atık 645,108 kg/gün belediye tarafından toplanarak vahşi depolama alanlarına dökülmektedir. Adıyaman Belediye Birliği tarafından 03.03.2020 tarihinde yapılan ihale ile Adıyaman Düzenli Depolama Alanı inşaatına başlanmış ve bu tarihten itibaren atıklar, katı atık düzenli depolama alanına toplanmaya başlanmıştır. Başlangıç olarak günlük yaklaşık 20-30 Megavatlık bir elektrik üretmeyi beklenmektedir. Bu elektrik yaklaşık olarak 7-9 bin hanenin elektriğine karşılık geliyor. Ayrıştırma ve fermantasyon tesisimiz de devreye girerse, ilçelerin çöpleri eklendiğinde yaklaşık olarak günlük 36 megavat civarında bir elektrik üretimi sağlayabilecektir.

Tablo 3. Kişi Başına Düşen Katı Atık Miktarı

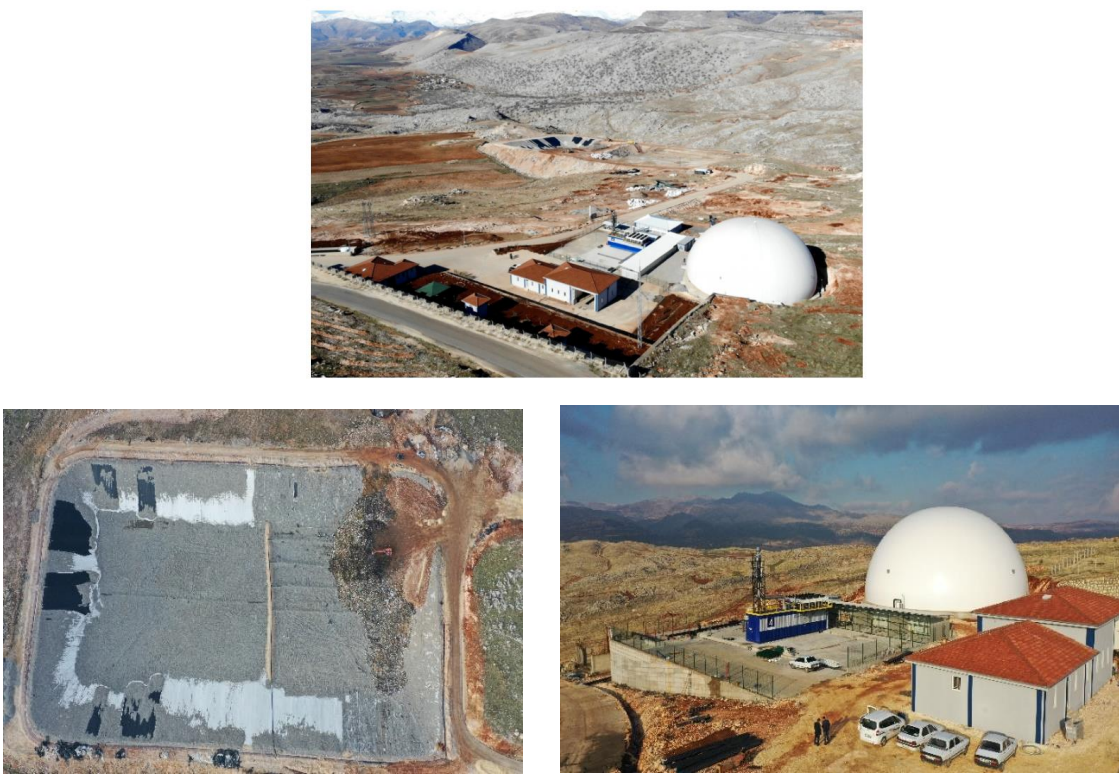
Yıllar	Kişi başına düşen katı atık miktarı (kg/kişi.gün)	
	Türkiye	Adıyaman
2002	1.34	1.15
2004	1.31	1.16
2006	1.21	1.30
2008	1.50	1.13
2010	1.14	0.96
2012	1.20	0.99
2014	1.08	1.05
2016	1.17	1.04
2018	1.16	1.02

Tablo 4. Kişi Başına Düşen Atık Miktarı Projeksiyonu

Yıllar	Nüfus (kişi)	Atık Miktarı (kg/kişi-gün)	Atık Miktarı (kg/gün)	Atık Miktarı (ton/yıl)
2020	632459	1,02	645108	235464
2021	632148	1,03	651112	237656
2022	633553	1,03	652560	238184
2023	634553	1,04	659935	240876
2024	635553	1,04	660975	241256
2025	636553	1,05	668381	243959
2026	637553	1,05	669431	244342
2027	638553	1,06	676866	247056

Adıyaman Katı Atık Düzenli Depolanma Tesisinde Elektrik Üretimi

Bu bölümde, Adıyaman ili düzenli katı atık depolanma ve enerji üretim tesisine ait bilgiler yer alacaktır. Şekil 9'da Adıyaman katı atık düzenli depolama tesisinin kuşbakışı görüntüleri görülmektedir.



Şekil 9. Adıyaman Katı Atık Tesisinin Kuşbakışı Görüntüleri

Adıyaman’da katı atık düzenli depolanma sahası Adıyaman Belediyeler Birliği tarafından yürütülmektedir. Mevsimsel değişimler olmakla birlikte, Adıyaman ilinin günlük ortalama oluşan katı atık miktarı yaklaşık 400 ton arasındadır. Türkiye İstatistik Kurumu 2020 yılı verilerine göre, Adıyaman Belediyesine ait katı atık depolama sahasında toplanan son bir yıllık katı atık miktarı yaklaşık 140,000 ton öngörülmektedir. Adıyaman’da mevcut katı atık düzensiz depolama (vahşi depolama) alanı yaklaşık 30-35 yıldır kullanılmaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, GAP Kalkınma İdaresi tarafından sağlanan finansman ile Adıyaman Belediyeler Birliği tarafından ihale edilerek hizmete açılan katı atık depolama tesisi, bir yılda 70 bin ton çöpü enerjiye çevirdi. Bir yıl önce çöp depolamaya başlayan ve 6 aydan beri enerji üretmeye başladı. Söz konusu birikmiş metan gazından elektrik enerjisi temini için Adıyaman Belediyeler Birliği tarafından 03.03.2020 yılı içerisinde yap-işlet-devret modeliyle Adıyaman katı atık düzenli depolanma tesis ihalesi gerçekleştirilmiştir. Vahşi depolama alanında bulunan katı atıkların bertaraf işlemiyle metan gazının patlaması, çöp yangınları, istenmeyen koku, çevreye zararı ve görüntü kirliliği giderilerek 2021 yılı başında elektrik üretim santrallerinin devreye alınması planlanmıştır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Güvenilir ve daha düşük maliyetli olmasıyla birlikte ekolojik dengenin korunması, sera gazı etkisi, çevre ve insan sağlığı konuları da göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin olarak kullanılması zaruri olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyogaz enerjisi EPDK tarife ücretinde de belirttiği gibi güneş enerjisi ile birlikte en fazla devlet desteğinin verildiği enerji kaynağıdır. Bu kaynağı devlete 1 kWh elektrik enerjisine karşılık 13.3 \$ cent teşvik sağladığı bilinmektedir. Bununla birlikte, rakamların mevzuatta belirtilen yönetmeliklerle garanti altına alınmış olması önemli bir husus olarak belirmektedir. Tüm bu açılardan bakıldığında, Biyogaz tesislerinin gerekli yatırımlar yapılarak ülkenin geneline yayılmasının büyük katkılar sağlayacağı açıktır. Biyogaz tesislerinde elde edilen ve zararı karbondioksitten 20-25 kat metan gazının yakıt olarak kullanılmasıyla, çevreye oluşan zararının minimize edilmesi dikkatlerden kaçmayacak kadar önemli bir husustur. Ayrıca bu yeni ve doğa dostu yöntemlerin kullanılması ülkemizin enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltıp, önemli katkılar sağlayacaktır. Yapılacak tesis yaklaşık 6,500,000 dolar yatırımla kurulacak tesisin 2021 yılında devreye alınması planlanmaktadır. Tesis yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı yıllık 32,956,035 kWh olacaktır. Adıyaman ilinde katı atık düzenli depolama tesisi hayata geçirilerek önemli bir gayret olarak nitelendirilmiş ve yeni bölgeler için de rol model teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

- Ascı, M.F. (2018). Hatay ili biyogaz enerjisi potansiyelinin incelenmesi, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Behçet, R., İlkılıç, C., Oral, F. (2014). Malatya ilinde oluşan evsel katı atıklardaki enerji potansiyeli, *ISEM2014*, 433-443.
- Çelebi, M. (2017). Belediye atıklarından çöp gazı elde edilerek elektrik enerjisi üretilmesi ve ülkemizdeki örneklerin incelenmesi, İller Bankası A.Ş. Uzmanlık Tezi.
- Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry, in *Climate Change 2007*, pp.499-587, Cambridge University Press, UK
- Deviren, H., İlkılıç, C., Aydın, S. (2017). Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller ve biyogazın kullanım alanları, *Batman University Journal of Life Sciences*, 7(2/2), 79-89
- Gönüllü, M.T. (2006). Adıyaman'da Çevre Sorunları ve Çözüm Önerileri, Medeniyetler Kavşağı Adıyaman Sempozyumu, Adıyamanlılar Vakfı Yayınları, İstanbul. ss.405-426.
- İlkılıç, C., Deviren, H. (2011). Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Safılaştırma Yöntemleri, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kankılıç, T. (2015). Belediye Atıklarından Düzenli Depolama Sahalarında Biyogaz ve Enerji Üretimi, *Mühendis ve Makina*, 56(669),58-69.
- Kömürlü, R., Akyel, İ. (2018). Kamu Özel Ortaklığı: Türkiye ve Diğer Ülkelerde Tarihi ve Uygulamalarının Karşılaştırılması. 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, ISAS Winter 2018, Samsun, Türkiye, 30 Kasım - 02 Aralık 2018, ss.976-979
- Saz, S. (2015). Biyokütle enerjisi ve yararlanma yöntemleri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
- Şenol, H. (2017). Türkiye'de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92.
- Yavrucu, K. (2019) Biyogaz Üretim Parametrelerinin İncelenmesi, Safılaştırılması ve Askeri Birlikler İçin Analizi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.12.2021
Kabul Tarihi : 05.07.2022

Received Date : 24.12.2021
Accepted Date : 05.07.2022

MEMRAN TEKNOLOJİLERİ VE MEMBRAN TEKNOLOJİLERİNİN ELEKTROSPİNNİNG YÖNTEMİ İLE NANO LİF ÜRETİMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

LITERATURE SEARCH ON MEMBRAN TECHNOLOGIES AND MEMBRANE TECHNOLOGIES ON NANO FIBER PRODUCTION BY ELECTROSPINNING METHOD

Abdullah GÜL^{1*} (ORCID: 0000-0001-6990-417X)
İsmail TİYEK² (ORCID: 0000-0002-1643-8977)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Abdullah Gül, Abdullahgul46@gmail.com

ÖZET

Nanoteknoloji alanında yapılmış birçok çalışma, yeni filtreleme teknikleri üzerine 100 ile 1000 nm arasında değişen lif çaplarına sahip elektrospinning tekniği ile rahatlıkla üretilen nanolif yapısındaki membran filtre sistemlerini konu almaktadırlar. Nanolif üretimi için en etkili teknik "Elektrospinning" yöntemidir. Elektrospinning, yüksek gözenekli ve geniş yüzey alanına sahip membran yapıları oluşturur.

Son zamanlarda membran teknolojileri; başta çevre, sağlık, enerji ve endüstriyel alanlar olmak üzere birçok alanda uygulama alanı edinmiştir. Membran teknolojilerinin uygulamalarındaki esas hedef, membran yapısının bileşenlerden oluşmuş çözeltilerde amaca uygun olarak istenilmeyen bileşenlerin geçişini engelleyerek süzülmesidir.

Membran teknolojileri, ayrışma sağlayacak şekilde süzmenin ve moleküler taşınmanın yerine getirildiği kontrollü geçirgen sistemler olarak tarif edilebilir. Ayrıştırma prosesi, membran yapısının hem moleküler yapısına hem de tasarımsal karakteristiklerine bağlı olarak uygulanan ortamın birkaç özelliğine bağlı olarak yerine getirilmesi ile sağlanır. Ayrıca ayrıştırma prosesi, gözenekli yapıya sahip membranlarda; gözenek çapı, formu ve yük ayrışmasına göre kontrol edilirken gözeneksiz yapıya sahip membranlarda ise difüzyon ve sorpsiyon tasarımlarına göre kontrol etmektedir. Membran teknolojilerinde membranın performansı, akı ve seçicilik parametreleri dikkate alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrospinning, membran, nanolif, arıtma, filtrasyon.

ABSTRACT

Many studies in the field of nanotechnology focus on new filtering techniques, membrane filter systems with nanofiber structure that can be easily produced with the electrospinning technique with fiber diameters ranging from 100 to 1000 nm. The most effective technique for nanofiber production is the "Electrospinning" method. Electrospinning creates membrane structures with high porosity and large surface area.

ToCite: GÜL, A., & TİYEK, İ., (2022). MEMRAN TEKNOLOJİLERİ VE MEMBRAN TEKNOLOJİLERİNİN ELEKTROSPİNNİNG YÖNTEMİ İLE NANO LİF ÜRETİMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 183-211.

Recently, membrane technologies have gained many application areas especially in the environment, health, energy and industrial areas. The basis goal in the applications of membrane technologies is to filter membrane structure in solutions consisting of components by preventing the passage of undesired components in accordance with the purpose.

Membrane technologies can be described as controlled-permeable systems in which filtration and molecular transport are performed to achieve dissociation. The separation process is achieved by performing membrane structure depending on both its molecular structure and design characteristics, depending on several properties of the applied environment. In addition, the separation process, membranes with a porous structure; While it is controlled according to the pore diameter, form and charge separation, it is controlled according to the diffusion and sorption designs in non-porous membranes. In membrane technologies, membrane performance, flux and selectivity parameters are taken into account.

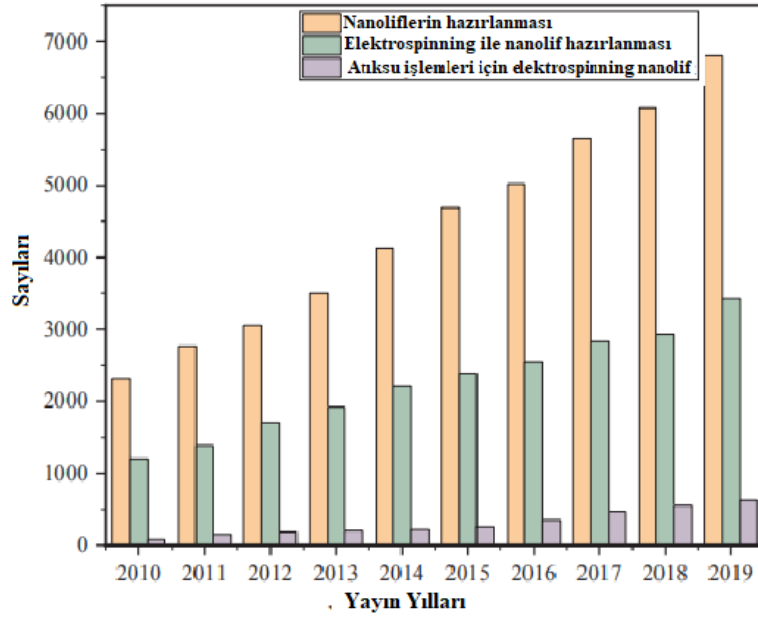
Keywords: Electrospinning, membrane, nanofiber, purification, filtration.

GİRİŞ

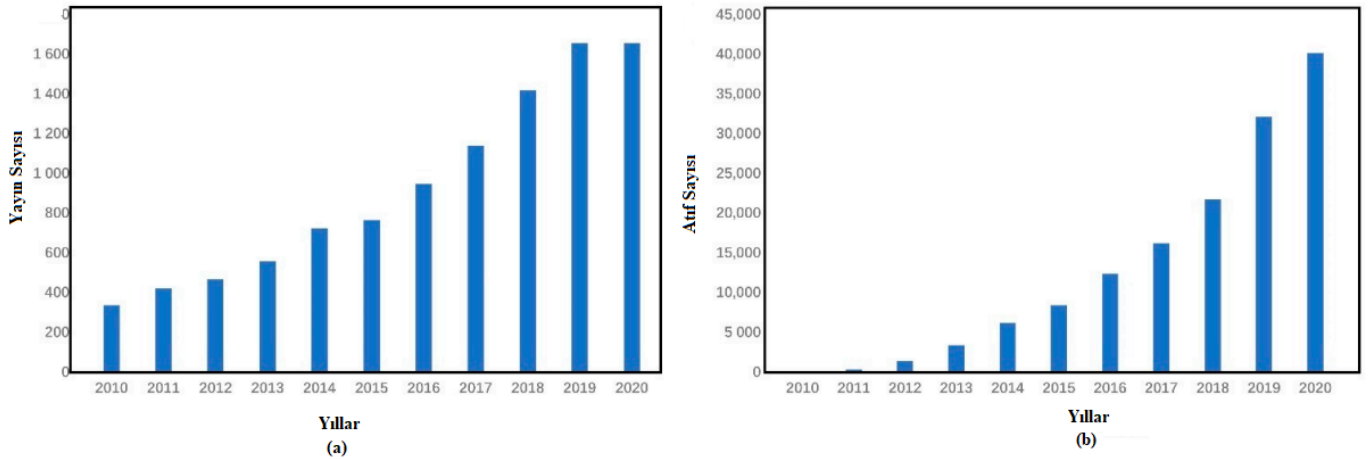
Arıtma sistemleri arasında, özellikle birçok alanda safsızlıkları etkili bir şekilde buldukları bileşenli ortamlardan uzaklaştıran membran teknolojileri, son zamanlarda adından oldukça bahsedilen konu olmuştur. Membran teknolojisi, çevremizde uygulama alanı bulan birçok fiziksel ve kimyasal ayrıştırma yöntemlerine alternatif bir seçenek olarak dikkat çekmektedir. Özellikle sulu ortamlarda bulunan safsızlıkların giderilmesi ve yeniden kullanılması oldukça yüksek verimler kazandırmaktadır. Bu özelliğinden dolayı membran arıtma yöntemleri, önümüzdeki uzun yıllar boyunca dahi üstün performans gösteren arıtım teknolojileri olarak yerini koruyacaktır (Juang & Wany, 2002; Kulkarni & Mahajani, 2002; Dhaouadi & Marrot, 2008; Yuan et al, 2008).

Filtrasyon prosesi, belirli karakteristik özelliklerine göre birden fazla kategoriye ayrılmaktadırlar. Bu tanıma göre; filtrasyon mekanizması sistematiği açısından: yüzey ve derinlik filtrasyonu. Ayrılan parçacıkların boyutu açısından: hiper filtrasyon, nano filtrasyon, ultra filtrasyon, mikro filtrasyon ve partikül filtrasyonu. Kullanılan filtre yapıları açısından: granül filtreler, tekstil filtreleri ve membranlardır. Sıvıların arıtma prosesleri, ticari veya endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez bir parçasıdır. Özellikle yağ filtrasyonu (hidrolik yağlar, yakıt) ve su filtrasyonu membran filtrasyonların en çok kullanım alanları oluşturan sıvı arıtma prosesleridir. Su arıtma filtrasyonların, yer altı sularının filtre edilerek içme suyuna dönüştürülmesine, atık suların yeniden kullanılabilir hale getirilerek yiyecek ve içecek sularında kullanılabilir hale getirilmesine katkı sağlar. Bu filtre mekanizması için, gözeneklerin boyut dağılımı, en büyük ve ortalama gözenek boyutu filtrasyon işlemi için önemli bir faktördür (Sutherland, 2008).

Son zamanlarda nanolifler, elektrospinning yöntemi ve bu yöntemle membran üretimi konuları çok popüler olmuş ve bu konuda çok sayıda çalışma yapılarak bu çalışmaların sonuçları bilimsel makaleler şeklinde yayınlanmıştır. 2010-2019 yılları arasında nanolif üretimi, elektrospinning yöntemiyle nanolif üretimi ve atık su arıtma amacıyla elektro çekilmiş nanoliflerle ilgili yapılan ve Web of Science tarafından taranan bilimsel makalelerin istatistiği aşağıdaki Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca 2010-2020 yılları arasında elektrospinning yöntemiyle üretilen membranlar konusunda Web of Science’da taranan yayınların (Şekil 2-a) ve atıfların (Şekil 2-b) ‘de istatistikleri verilmiştir.



Şekil 1. Web Of Science'ı Takip Eden Son Atık Su İşlemleri Üzerine Elektrospinning Nanolif Yayınlar.



Şekil 2. Elektrospinning Membran Konusunda (a) Yayın ve (b) Alıntı Sayısının Şematik Gösterimi.

Elektrospinning yöntemi ile elde edilen nano boyutlarında ve çok farklı doğrultularda yönlendirilmiş uzun lifler filtre üretimi için onu avantajlı kılmaktadır. Bunun yanı sıra üretilen liflerin çapları, yönelişleri ve şekillerinin kontrol edilebiliyor olması da önemli avantajlarından. Elektrospinning yönteminin prensibi, kılcal uçtaki damlanın elektriksel kuvvetler vasıtasıyla çekilmesine dayanmaktadır. Damlacığı oluşturan kılcal uç pozitif yük görevi üstlenirken birikme yapılacak toplayıcı levha ise negatif yüklü bir yüzey görevi üstlenmektedir (Bilek & Hruza, 2014).

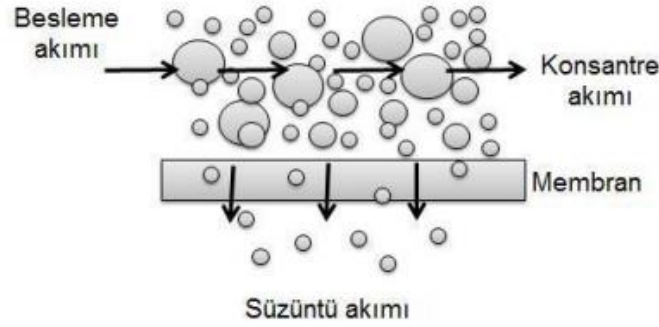
Elektrospinning nano fiber membranlar, yüksek gözenekliliğe, yüksek spesifik yüzey alanına ve benzersiz birbirine bağlı yapıya sahiptir. Atık suların arıtılması ve geri dönüştürülmesinde büyük avantaj ve potansiyele sahiptir (Chen et al. 2020).

Yükselen enerji maliyetlerin üstesinden gelebilmek için, ortaya çıkan kirleticilere karşı etkili, daha katı çevre düzenlemeleri ve endüstriyel taleplere karşılayabilen, daha seçici ve sağlam filtrasyon membranların üretimini zorunlu kılmaktadır. Buna ek olarak daha düşük kimyasal ve enerji girdilerine sahip olması gerekmektedir.

MEMBRAN VE MEMBRAN TEKNOLOJİSİ

Membran, birbirinden farklı iki fazı veya ortamı ayırabilen ve bir ortamdan diğer ortama taşınacak maddelerin seçilebilmesine imkân sağlayabilen geçirgenli bir malzemedir. Besleme akımı ve konsantre akışının membran

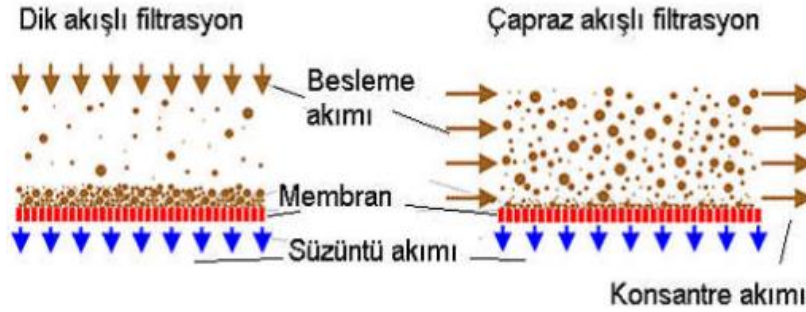
üzerindeki görseli Şekil 3’de verilmiştir. Bütün membran sistemlerinde, membran üzerinden maddelerin geçme rotasında akışın sağlanması için destekleyici bir kuvvet ve amacına uygun olarak belirli maddelerin geçişini sınırlayan ayırma faktörü, en temel prensipleri oluşturmaktadır (Çevik, 2006).



Şekil 3. Membran Ayırma Prosesi Görseli.

Özet olarak membran teknik ve teknoloji ilerleyişindeki tarihsel ilerlemeyi üç döneme odaklandırmak daha uygun olmaktadır. İlk dönem 1950 yılları olarak; membran tekniğinin bilinen manada ilk kez ortaya çıktığı, 1960 yılları olarak; daha çok bilimsel araştırmaların yoğunluk kazandığı ve son dönemi ise 1980 yıllar ve sonrası olarak; membran teknolojilerinin genel manada endüstriyel uygulama alanlarında çokça kullanılmaya başlandığı dönem olarak belirtilmektedir (Koyuncu, 2013).

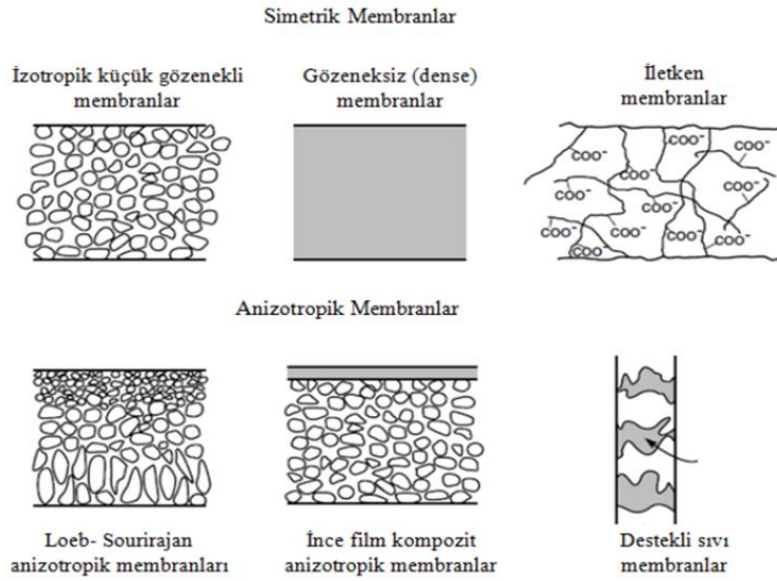
Bilinen manada membran filtrasyonu, kolloidlerin, partikül maddelerin, askıda katı maddelerin, büyük moleküllerin ve çözünmüş maddelerin ayrıştırılması amacıyla kullanılan bir tekniktir. Membran proseslerindeki besleme akımı, basınç, sıcaklık ve konsantrasyon farklılıklarının etkisi ile oluşmuş sürücü kuvvetler yardımıyla membrandan geçmesi esnasında süzüntü ve konsantre (Şekil 4) diye tabir edilen iki akıma ayrılmaktadırlar (Arı, 2009).



Şekil 4. Membran Filtrasyonu Görseli.

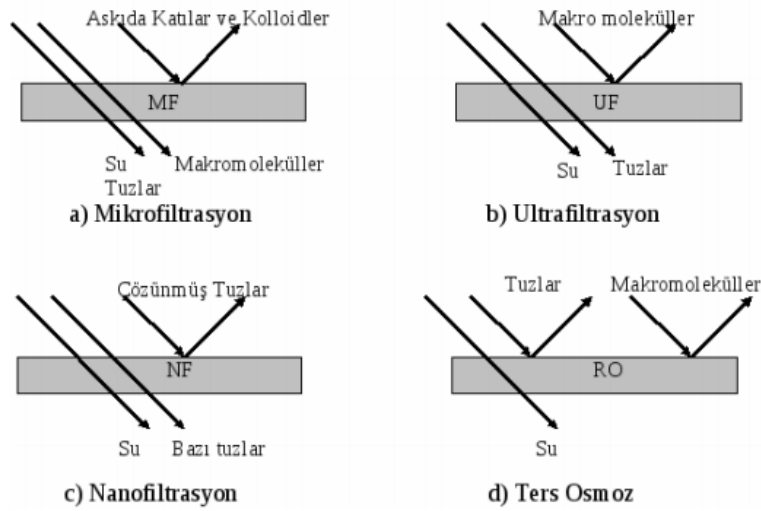
MEMBRAN TİPLERİ

Membranlar çok farklı yönlerinin dikkate alınması ile de sınıflandırılması yapılabilir. İlk sınıflandırma yöntemi, biyolojik veya sentetik zar yapıları ilgilidir. Bu iki tür zar yapısındaki membranlar, işlevsellik açısından birbirinden tamamen farklı olabilirler. Membran tabakası, ince ya da kalın olabilir. Morfolojik yapısı homojen ya da heterojenlik içerebilir. Madde taşınımı aktif ya da pasif olduğu gibi pasif taşınımı ise basınç, konsantrasyon ya da sıcaklık farklarına göre, bunlara ilave olarak doğal ya da sentetik; nötr ya da yüklü olmasına göre de sınıflandırılabilir (Mulder, 1996). Buna ek olarak Şekil 5’de gösterildiği gibi simetrik ve anizotropik olarak da sınıflandırılabilir.



Şekil 5. Genel Membran Tipleri.

Membranlarda geçirgenlik (seçicilik) oranı, membran içerisinde oluşan boşlukların boyutlarıyla ilişkilendirilebilmektedir. Boşluk yapılarının çapları revize edilerek Mikrofiltrasyon (MF), Ultrafiltrasyon (UF), Nanofiltrasyon (NF) ve Ters ozmoz (RO) işlemleri gerçekleştirilmesi sağlanabilir. Membranların ilk olarak geniş ölçekte kullanılması ise Mikrofiltrasyon (MF) ve Ultrafiltrasyon (UF) teknolojileriyle (Şekil 6) birlikte gerçekleşmiştir. Membranlar, homojen ya da heterojen yapılarda ve çeşitli kalınlıklarda oluşabilir. Membranlar, nötr yüklü olabileceği gibi elektrik yüklenmek suretiyle aktif veya pasif özellikleri kullanılarak da parçacıkları ayrıştırabilir. Basınç ve konsantrasyon farklılıkları, kimyasal ve elektriksel etkiler membranların verimini doğrudan etkiler (Yalçın, 2014).



Şekil 6. Genel Membran Geçirgenlik Tipleri.

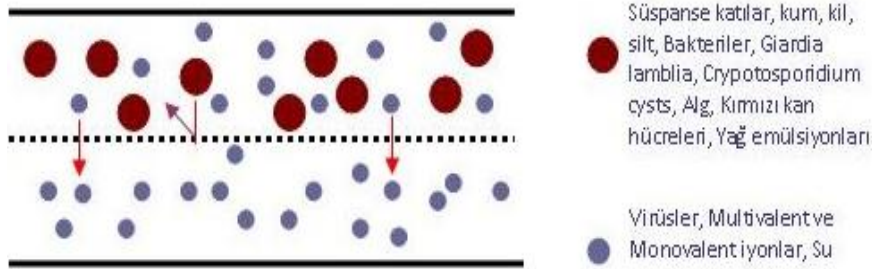
Sürücü Tiplerine Göre Membranlar

Mikrofiltrasyon (MF) Membran

Mikro yapıdaki filtrasyon tekniği, en çok tercih edilen basınç farklılığından kaynaklı sürücü özelliğine sahip membran prosesine sahiptir. Mikrofiltrasyon gaz veya sıvılarda mikron veya daha küçük seviyelerdeki molekülleri ayırtma amacıyla kullanılmaktadır. Membranların gözeneklik ölçümleri yaklaşık 0.1 ile 1.4 μm aralıklarındadır. MF, yüz bin daltondan daha büyük bir molekülleri ağırlık engelleme sınırında (MWCO), yaklaşık olarak 100 - 400kPa (15-

60 Psi) aralığında nispeten düşük basınç uygulamalı bir membran ayırma prosesi olarak tarif edilmektedir (Aslan, 2016).

Bu bahsi geçen ve Şekil 7’de temsili verilen membranlar, seçici karakteristikte geçirgen özelliğe sahiptir. Bunun yanı sıra büyük molekül yapılarındaki organik maddelerin yüksek konstrasyonlarda saflaştırmasına imkan sağlayan dinamik bir mekanik filtrasyon prosesi sağlar. Özellikle metal kaplama proseslerinde üretilen mikron ebatlarındaki partiküller ayrıştırılabilmektedir. Bu proseslerde seçici geçirgenlik için gerekli olan basıncın düşük olması (ki bu yaklaşık 0.2 - 0.5 bar), filtreleme için gerekli olan enerji ihtiyacının da düşük olmasını sağlamaktadır (Aslan, 2016).



Şekil 7. Mikrofiltrasyon.

MF tekniğinin kullanımı, membran kullanım süreçlerinde diğer membran ayırma tekniklerinden kayda değer oranda fark oluşturduğu belirtilmiştir. Kullanımda en fazla talep gören tipi tek kullanımlık modüller şeklinde olmaktadır. MF ile artırılabilen hacmi doğrudan su içindeki partikül seviyesi ile ilişkilidir. Bilinen bir gerçek olarak kritik olmayan bir kullanımda kartuş filtrenin partikül yakalama kapasitesi membran alanının 100 - 300 g/m² arasındadır. Bundan dolayı sıvı hacmi artırılabilenler için, MF bir elektronik atık su kullanımı için nihai ve verimli bir filtredir (Aslan, 2016).

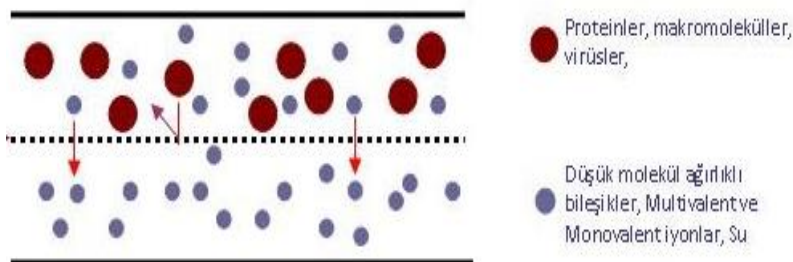
Meşrubat, gıda, ilaç ve alkol sanayisi MF membranların işleme alındığı sanayiler arasında yer almaktadır. MF membranları daha çok; su ve atık suların arıtılma işlemlerinde, doğal ve sentetik organik partikül giderimi, yağ karışımı suların ayrılması, saf su elde etmek için partikül giderimi, diğer membran proseslerden koloidal maddelerin ve bulanıklığın giderilmesi amacıyla ön arıtma için kullanılmaktadır (Zaidi et al., 1999).

Ultrafiltrasyon (UF) Membran

Ultrafiltrasyon (UF); gözenek boyutu 1-100 nm aralığında olan, 1-10 bar basınç aralığında (Şekil 8) işletilen, moleküler ağırlıkları 1000 Da’dan büyük partiküllerin sudan ayrıştırılmasında kullanılan membran prosedir (Fane et al. 2011).

UF membranlarında, partiküllerin tutulma oranlarını ifade etmek için moleküler ağırlık engelleme sınırı (MWCO) kullanılmaktadır ve moleküler ağırlıkları 1000-100.000 Da aralığındaki olan partiküller membranda tutulmaktadır. UF membranlarda ayrıştırmada temel etkili molekül büyüklüğü olmakla beraber bileşenlerin oluşturduğu yüzey yükü ve şekli, membranın özellikleri ve hidrodinamik özellikleri de rol oynamaktadır (Aslan, 2016).

UF membranlar asimetric forma sahiptirler ve üst bölümleri daha yoğun bir katmandan oluşmaktadır. Bu yoğun katmana, ultrafiltrasyon membranlara oldukça yüksek hidrodinamik dayanıklılık sağlamaktadır. Ayırma işleminin esas işlemi, UF membranının üst katmanında gerçekleşmekte olup, alt katmanda sadece üst katmana mesnet oluşturmaktadır (Acarer, 2020).



Şekil 8. Ultrafiltrasyon.

Genel manada faz inversiyon işlemiyle üretilen UF membranlarında, kloro karşı dayanım, yüksek sıcaklık ve geniş pH aralığında kullanım gibi standartlara sahip olduklarından aromatik yapıdaki poliamidler (PA), poliviniliden florür (PVDF), polisülfon (PS), polietersülfon (PES) gibi polimerler en sık kullanılan polimerlerden oluşturulmaktadır (Koyuncu, 2018).

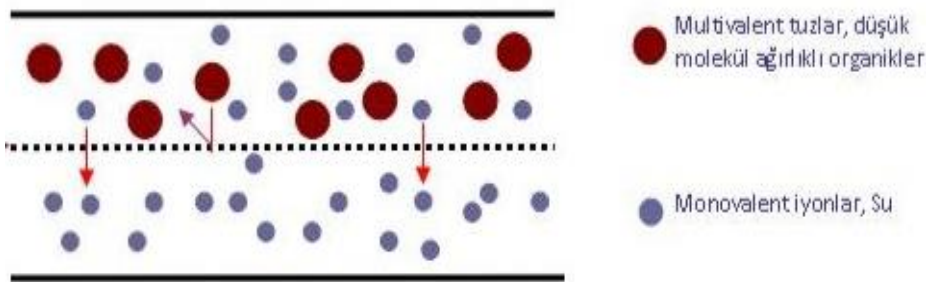
UF membranları genel manada; ev ve endüstriyel atık suların ayrıştırılmasında, makro yapıdaki moleküllerin ve kolloidal parçaların giderilmesinde, yağlı yapı içeren atık suların ayrıştırılmasında, virüs ve bakterilerin giderilmesinde, trihalometanların (THM) giderilmesinde, endüstriyel protein saflaştırmada, belli başlı moleküler ağırlığa sahip değerli maddelerin geri kazanımında ve NF ve TO işlemleri öncesinde ön ayırma amaçlı kullanılmaktadır. UF membranlarının yaygın olarak kullanıldığı endüstrilere örnek olarak gıda, süt, ilaç, tekstil, kimya, kâğıt, deri endüstrileri verilebilir (Çakmakçı, 2012).

UF membranları, yüzey suların ve atık suların ayrıştırılmasında doğrudan kullanılabilirler gibi, yüzeysel suların ayrıştırılmasında koagülasyon flokülasyon sistemleri ile entegre olabilmekte; atık su ayrışımında ise membran bioreaktör sistemleri içerisinde de kullanılabilirler (Koyuncu, 2018).

Nanofiltrasyon (NF) Membran

Nanofiltrasyon (NF); UF ve TO membran boyutları arasında yer alan basınç tabanlı sürücülü membran prosesidir. "Nanofiltrasyon" terimi, besleme fazındaki bazı iyonların isteyerek süzünü kısmına geçmesine sağlayan "ayırıştırıcı bir ters ozmoz prosesi" olarak ifade edilmesiyle ortaya çıkmıştır (Acarer, 2020).

Değerli yüksek tuzların ayrımı sağladıklarından, NF membranlar aynı zamanda kısmi demineralizasyon prosesi olarak da ifade edilebilir. NF membranlar, (Şekil 9'da verilmiştir) yaklaşık olarak 1-10 nm'lik MWCO'ya uygun olacak şekilde üretilmektedir. Genellikle MWCO değerleri çözülmüş organik yapılar için 200-1000 Dalton arasındadır ve çeşitli tuzları moleküler ağırlık uyarınca tutan NF membranlarında tuzlarda farklı tutunma oranları ($\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$ gibi) bilinmektedir. Birçok NF membranının yüzeyi yüklü olduklarından, NF membranlarının taşıma ve seçicilik özelliklerine elektriksel etkileşimleri de ilave katkı sağlamaktadır. NF membranlarının gözeneksiz yapıya sahip olan ve çözelti-difüzyon transfer sistemiyle çalışan TO membranlarından farkı, gözenekli ve gözeneksiz membran ara yüzünde eleme-difüzyon taşıma mekanizmasıyla çalışmasıdır. Ayrıca, NF membranlarında TO'ya nazaran daha az basınçta çalışılıp fazla su akışı elde edildiğinden NF membranlarında son derece önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Acarer, 2020).



Şekil 9. Nanofiltrasyon.

NF membranları genel olarak; çok değerlilik anyonların tutulması (sertlik giderimi), düşük molekül ağırlıklı organik maddelerin ve organik boyanın tutulması, bulanıklığın giderilmesi, mikroorganizmaların giderilmesi, düşük ve yüksek molekül ağırlıklı maddelerin ayrılması, pestisitlerin giderilmesi, mikro kirleticilerin giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Hilal et al. 2004).

Nanofiltrasyon membranları yer altı suyu, yüzey suyu ve atık su arıtımında kullanıldığı gibi deniz suyunun arıtımı için ters ozmozdan önce ön arıtma amacıyla da kullanılabilir (Çakmakçı vd. 2009).

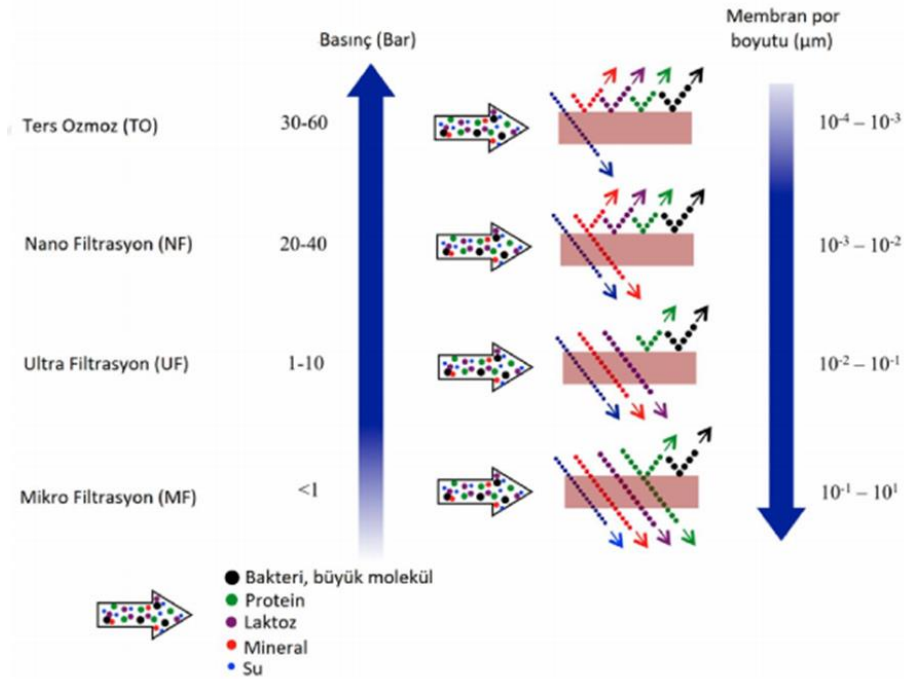
Ters Osmoz (RO) Membran

Ters osmoz membranları tek bir proseste iyonik haldeki bileşiklerin, hidrolize edilmiş boyaların ve buna ek olarak yardımcı kimyasalların ayrıştırılmasını %90 oranında sağlamaktadır (Ramesh et al. 2007).

Ters osmoz yapıdaki membranlar klorür, sodyum, kalsiyum ve sülfat gibi iyonik boyutundaki partikülleri giderebilmektedir. Ters osmoz membranları çoğunlukla NaCl ayrıştırma verimi ile sınıflandırılmaktadır. RO membranları da NF membranlarında olduğu gibi tıkanma konusunda daha hassastır. Genel manada RO membranları selüloz asetat ve aromatik poliamidlerden(PA) üretilir. Bu özellikteki membranların basıncı yüksek ozmotik basınç farklılığından kaynaklandığı için kullanımları sınırlıdır (Naveed et. al. 2006).

Ters Osmoz, endüstriyel atıksu arıtılmasında kullanılan çözülmüş anorganik ve organik maddelerin sudan uzaklaştırılması veya geri kazanılması amacıyla yüksek basınç uygulanan bir tekniktir. Nitrat konsantrasyonunu azaltmak için kullanılabilir başka bir yöntemdir. Su bir zardan yüksek basınç altında hareket eder. Membran, sadece su moleküllerinin geçmesine izin veren birçok mikroskobik gözenek içerir ve bu nedenle nitrat, kalsiyum ve magnezyum gibi diğer inorganik kimyasalları durduracaktır. Membran, gelen nitrata yaklaşık %83-92'sini tahmin eden nitrata giderebilir. Ters osmoz etkili bir nitrat giderici olabilir de bu yöntem nispeten pahalıdır ve faydalı kimyasalları uzaklaştırır (Garner & Mahler, 1978).

Ters Osmoz teknolojisi ile (Şekil 10'da verilmiştir) su, tuz içeriğinden tamamen temizlenmez ve bu yüzden içme suyu olarak kullanılamaz. Ancak ters osmoz sayesinde tarımsal su kullanımı için uygun kalitede su üretilebilir (Schoeman & Steyn, 2003)

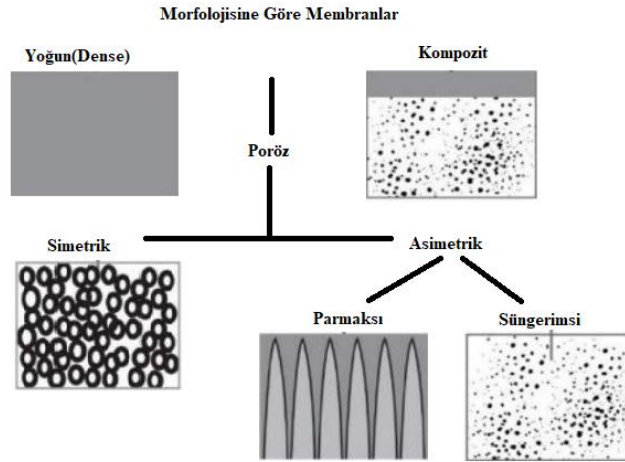


Şekil 10. Gözenek Boyutuna Göre Membran Çeşitleri.

Morfolojilerine Göre Membranlar

Membranlar morfoloji yapılarına göre sınıflandırıldığında; yoğun (dense) membranlar, gözenekli (poröz) membranlar ve kompozit membranlar olarak temel olarak üç grupta ayrılmaktadır. Membranların morfoloji yapılarına göre sınıflandırılması Şekil 11'da ifade edilmektedir. Genellikle ters osmoz ve gaz ayırma membranlarında kullanılan yoğun tipli membranlar, oldukça düşük su akısına sahip özelliktedir. Membran yapılarının içinde veya yüzeylerinde gözenekler içeren porlu yapıdaki membranların polimer yapısı, yoğun membranların polimer yapısı

gibi çok sıkı değildir. Porlu yapıdaki membranların içerisinde bulunan porlar, asimetrik boyut dağılımında veya simetrik boyut dağılımında olmaktadır. (Koyuncu, 2018).



Şekil 11. Morfolojisine Göre Membranların Sınıflandırılması.

Asimetrik yapıdaki membranlar, membran duvarı üzerinde gözenek boyutu değişen katmanlı bir yapıdadırlar. Bu yapıdaki membranlar genellikle, kalın bir mikro gözenekli alt katman ile desteklenen çok ince bir yüzey katmana sahiptir. Mikro gözenekli alt katman esas olarak mekanik dayanım oluştururken ince yüzey katmanı, ayırmayı gerçekleştiren seçici katman olarak rol oynamaktadır. İnce, seçici yüzey katmanından dolayı membran akıları oldukça yüksektir (Cansız, 2017).

Simetrik yapıdaki porlu membranın hemen hemen her yerindeki porlar eşit büyüklükte olmakla birlikte membranın yanal tarafı boyunca büyük miktarda tüm porların çapı eşittir. Asimetrik yapıdaki porlu membranların gözenek çapları, alt tabakadan yüzey tabakasına doğru ilerledikçe azaldığı görülmektedir. Membranların yüzeyindeki gözenekler hemen hemen aynı boyutta olduğunda, su küçük gözeneklerden filtre edilirken oldukça zorlanmaktadır. Bu durumda, membranın akışa karşı direncinin fazla olduğu kanıtı olarak gösterilebilir. Asimetrik yapıdaki membranlarda su, yüzeyde bulunan mevcut küçük porlardan geçtikten sonra alt tabakalardaki daha geniş porlardan geçtiğinden dolayı genel olarak daha az direnç ile karşılaşır. Asimetrik yapıdaki membranlar simetrik olanlara nazaran daha fazla geçirgenlik değerleri sağlamakla beraber daha iyi ayırma performansı da göstermektedir (Acarer, 2020).

Asimetrik yapıdaki membranların ara kesit morfolojileri süngerimsi ya da parmaklı yapıda olabilir. İç yapılarında yüzeye doğru gidildikçe ince kanal yapıları bulunduran membranlar parmaklı membranlar olarak nitelendirilmektedir. Parmaklı boşluk içermeyip birbiriyle bağlantısı olan gözenekleri bulunan yoğun ve küçük boşluk yapısı gösteren membranlar süngerimsi membranlar olarak nitelendirilmektedir. Parmaklı membranlar mikroyltrasyon veya ultrafiltrasyon gibi daha az basınç gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Membrandaki parmaklı boşluklar, besleme fazının daha rahat geçebileceği kanallar oluşturduğundan dolayı membran tarafından suyun geçişine gösterilen direnç daha az olmaktadır. Süngerimsi yapıda olan membranlarda ise, suyun geçişine karşı hidrolik direnç parmaklı yapıdaki membranlardan fazladır. Süngerimsi yapıdaki membranlar daha fazla mekanik dayanım gösterdiklerinden, membran imalatında destek tabakası olarak kullanım alanı bulmaktadırlar. Süngerimsi yapıdaki membranlar; ticari ters ozmoz membranlarda ve bazı membran biyoreaktörlerde destek tabakası olarak kullanılmaktadır (Acarer, 2020).

Morfolojik bakımdan kompozit sınıfta yer alan membranların suyla temas eden üst yüzeyleri yoğun yapıya sahipken, alt kısımları gözenekli yapıya sahiptir. Kompozit membranların en başarılı uygulamasına örnek ince film kompozit kaplı (İFK) membranlardır. İnce film kompozit membranlarda; biri porlu yapıya sahip destek tabakası, diğeri porsuz üst tabaka olmak üzere iki farklı katman yer almaktadır. Porsuz üst katman yüksek seçiciliğe sahipken, yüksek

gözenekliliğe sahip destek tabakası genellikle seçici değildir. İFK membranlar, mikroporlu yapının üzerine 50-500 nm kalınlıkta yoğun yapıya sahip polimerin kaplanmasıyla üretilmektedir. Hem yoğun yapıya sahip olan hem de ince olan aktif tabaka sayesinde yüksek giderme verimleri elde edilmektedir. Membran teknolojilerinin deniz suyu desalinasyonunda geleneksel hale gelmesini sağlayan önemli faktörlerden biri İFK membranlardır (Acarer, 2020).

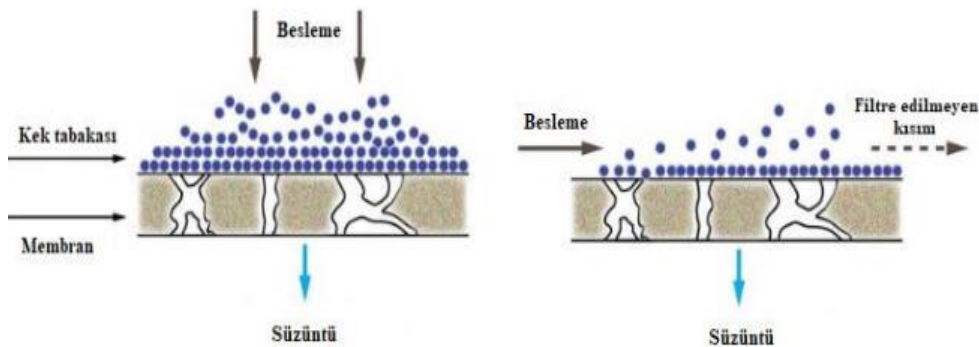
Akım Türlerine Göre Membranlar

Membran yapılarının işletilmesinde klasik filtrasyon olarak da tabir edilen dikey yönlü membran filtrasyonu ve çapraz akış filtrasyonu olarak da tabir edilen teğetsel akış filtrasyonu olmak üzere iki farklı filtrasyon tekniği uygulanmaktadır (Aslan, 2016).

Basınç sürücülü klasik filtrasyon proseslerinde, besleme yapılacak akım, membrana dikey yönde hareket eder ve partiküller membran sayesinde tutularak yüzeyde biriktirilmesi esasına dayanır. Membran yüzeylerinden geçen partikül içermeyen akım permeatı meydana getirir. Tutulan partiküller ise membranın yüzeyinde toplanarak kek katmanı oluşturur (Ramesh, 2014).

Klasik filtrasyon sisteminden farklı olarak, besleme akımı ve süzütünün aynı tarafta olmadığı çapraz akış filtrasyonunda çapraz akış ifadesi membran yüzeyine paralel olarak akan sıvıyı ifade etmektedir. Çapraz akış filtrasyonunda besleme çözeltisi, filtrelenmemiş kısım ve permeat olmak üzere iki akıma ayrılır. Bu filtrasyon sisteminde, filtre edilmemiş olan kısım sisteme geri devredilmesi mümkündür. Bu sistemde, yüksek geri devir hızları membranın yüzeyindeki türbülansı artırdığından besleme çözeltisindeki katıların membran yüzeyinde toplanmaları azalır. Fakat filtrasyon devam ettikçe membran yüzeyinde toplanma artar. Bunun sonucunda da filtrasyon hızında düşme meydana gelir. Akı limit veya basınç değerlere eriştiğinde kullanılan membranın temizlenmesi veya başka bir membran yüzeyi ile değiştirilmesi gerekmektedir (Ramesh, 2014). Membranın yapısının yüzeyinde sürekli bir akış olduğundan dolayı ayrıışan partiküller membran yüzeyinde toplanmamaktadır (Sert, 2015).

En nihayetinde iki filtrasyon sistemi karşılaştırıldığında; besleme akımı ve süzütünün aynı yönde olduğu klasik filtrasyon sistemi, zamanla süzütü akış hızında azalma meydana gelmesi ve direnç gösteren parçacıkların meydana gelmesi gibi nedenlerden dolayı bazı olumsuzluklara sahiptir. Membrandaki kek katmanı kalınlığının kontrol edilebilir bir noktada tutulabilmesi ve göreceli olarak daha fazla akı değerlerinin sağlanabilmesi açısından çapraz akış filtrasyonunun kullanılması membranın çabuk tıkanmasını engellemektedir. Bununla birlikte, daha uzun ömürlü olmasını da ortaya koymaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda membranların akım türlerine göre şematik gösterimi Şekil 12’de açıkça gösterilmektedir.



Şekil 12. Membran Akı Türleri.

Geometrik Şekillerine Göre Membranlar

Membranlar; düz plaka, içi boşluklu fiber, tübüler ve çoklu delikli olmak üzere dört farklı şekilde üretilmektedir. Levha şeklinde olan düz plaka membranların bir yüzeyi aktif ayırmayı gerçekleştirirken diğer yüzeyinden süzütü

elde edilmektedir. Genellikle plaka membranların üretimi, destek malzemesine üzerine polimerin kaplanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu membranlarda; ayırma polimer ile gerçekleştirilir, mekanik mukavemet ise dokuma olmayan kumaş ile sağlanır.

Silindir şeklinde olan içi boşluklu fiber membranlarda ayırma işleminin gerçekleştiği tabaka yüzeyin iç bölümünde ya da yüzeyin dış bölümünde olabilmektedir. Bu tip membranlar içten dışa veya dıştan içe doğru çalışabilirler. Mekanik mukavemetlerinin artırılması amacıyla içi boşluklu membranların üretiminde, içi boş olan örgü ip kullanılmakta ve bu ip üzerine polimer kaplaması yapılmaktadır. Bu yöntemle, güçlendirilmiş içi boşluklu fiber membranlar elde edilmektedir.

Silindir şeklinde olan tübüler membranlar biraz daha geniş çapa sahiptirler. Bu tür membranların üretiminde silindirik dokuma olmayan kumaş kullanılmaktadır. Kullanılan kumaşın iç yüzeyleri polimer ile kaplanmaktadır. Tübüler membranlarda aktif tabaka iç yüzeyde yer almaktadır. Özellikle askıda katı madde içeriği fazla olan sularda tercih edilmektedirler.

Malzemelerine Göre Membranlar

Membranlar, birçok değişik materyalden üretilmektedirler. Daha çok üretildikleri malzemeye bağlı olarak biyolojik ve sentetik membranlar şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan sentetik olan membranlar, organik (polimerik) ve inorganik (seramik, metalik) olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Polimerik yapıdaki membranlar, yaygın olarak 10 - 3000 °C aralığında proses uygulanabilmesine imkan sağlamaktadır.

Organik (Polimerik) Membranlar

Organik yapıdaki membranların esas maddesi polimerdir. Endüstriyel olarak kullanılan membranların birçoğu sentetik veya doğal polimer ürünlerinden oluşmaktadır. Esas olarak bütün polimerler membran malzemesi olarak kullanılsa da membran malzemesi olarak kullanılacak polimerin belirlenmesinde polimerin fiziksel ve kimyasal nitelikleri ön plana çıkmaktadır. Fiziksel ve kimyasal farklılıklardan dolayı ancak kısmi sayıda polimer membran malzemesi olarak kullanılabilir (Çelik, 2019).

Hali hazırda olan uygulamalarda sınırlı sayıda polimer kullanılabilir. Membran yapısında kullanılma üzere yaygın olarak kullanılan polimerik membranlar;

Poliamit Membranlar: Selüloz diasetattan sonra en sık kullanılan ikinci polimer olan poliamitler, aromatik poliamitlerden üretilirler. Selüloz asetatlarla kıyaslandığında daha iyi kimyasal yapıya ve termal özelliklere sahiptirler ve daha geniş pH aralıklarında (2-10 aralığı) işletilirler. Kompozit membranlarda üst tabaka malzemesi olarak poliamitler kullanılmaktadır (Çelik, 2019).

Selüloz Asetat (CA) Membranlar: Selüloz ve türevlerinden üretilen selüloz asetat membranların üretimi kolaydır ve diğer membranlara kıyasla maliyetleri oldukça düşüktür. Aşındırıcı maddelere karşı dayanıklıdır. Adsorblayıcı özellikleri düşüktür. Yüksek sıcaklıkta işletmeye uygun olmayan selüloz asetat membranlar için uygun pH işletme aralığı 3-8 arasındadır (Çelik, 2019).

Polisülfan (PS) Membranlar: Polisülfon membranlar, poliamit ve selüloz asetat gibi bazı organik membranlara göre daha az hidrofilik özelliğe sahiptir. Polisülfon membranlar fiziksel ve kimyasal bakımdan stabil yapıya sahiptirler. Geniş pH aralığı (1-13) ve geniş sıcaklık aralığında (75°C'ye kadar dayanırlar) işletilebilirler. İmal edilmeleri kolaydır. Diğer membranlar ile karşılaştırıldıklarında, aşındırıcı kimyasallara karşı daha yüksek direnç gösterirler (Çelik, 2019).

Polieter Sülfan (PES) Membranlar: Polietersülfon (PES), yüksek performans, düşük maliyet ve modifikasyon çalışmalarında fazla kullanılması nedeniyle oldukça popüler membran üretim malzemelerinden biridir. PES'den üretilen membranların, yüksek sıcaklıkta ve geniş pH aralığında kullanılabilmesi (1-12) ve iyi kimyasal dayanım göstermesi gibi avantajlarına karşılık en büyük dezavantajı hidrofobik olmalarından dolayı tıkanmaya karşı

dirençlerinin düşük olmasıdır. PES membranların kimyasal olarak modifiye edilmeleri zordur ancak amaca göre hidrofilik özelliklerinin modifikasyonu kolaydır (Çelik, 2019). PES polimerinin nanokompozit membran üretiminde kullanılarak tıkanmaya karşı direncinin artırılması mümkündür.

Poliakrilonitril (PAN) Membranlar: En çok kullanılan polimer membranlardandır. Az hidrofobik özelliktedirler. İmalatında vinil asetat veya metil methakrilat gibi comonomer ilavesi sayesinde esneklik ve hidrofobik özellik kazanır.

Polivinildin Florid (PVDF) Membranlar: PES membranlar gibi hidrofobik özellik gösteren PVDF membranların mekanik özelliklerinin çok iyi olmasının yanı sıra yüksek gerilme kuvvetlerine sahiptirler. Yüksek gerilme kuvvetleri nedeniyle süper fiberler olarak da isimlendirilirler. PVDF polimerinden üretilmiş membranlar aşındırıcı kimyasallara karşı dirençlidirler. Yüksek termal kararlılığa sahip olan bu membranlar yüksek sıcaklıklarda (90 °C gibi) işletilebilirler (Çelik, 2019).

Polipropilen (PP) Membranlar: Fiberlerin birleşiminden meydana gelirler. Oldukça yüksek gerilme kuvvetine sahiptirler. Hidrofobik özelliktedirler. Çözücülere karşı dirençleri iyidir ancak oksidantlara karşı düşük toleranslıdır (Çelik, 2019).

Politetrafloroetilen (PTFE) (Teflon) Membranlar: Geniş pH aralığında ve yüksek sıcaklıklarda işletilmeye uygundur. Hidrofobik özelliktedirler. Aşındırıcılara ve asitlere karşı dirençleri iyidir (Çelik, 2019).

Polietilen (PE); Bütün analitik filtrasyon işlemlerinde kullanılan genel bir filtre malzemesidir. Aşındırıcı kimyasal maddelere karşı oldukça dirençli olan polietilen membranlar sıvı ve aşındırıcı özellikteki organik olan çözeltiler için kullanılırlar (Çelik, 2019).

Polivinilklorid (PVC) Membranlar; yüksek kimyasal ve mekanik karakteristik özelliklere sahip olan bu membranlar aşındırıcı kimyasal ve asitlere karşı oldukça direnç gösterebilirler. Buna ek olarak yüksek filtrasyon akısına sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı membran imalatında uygun bir malzeme olmuşlardır. Fiyatı ise diğer membran malzemelerine göre daha uygundur (Çelik, 2019).

Naylonlar ; Doğal olarak hidrofilik yapıdadırlar. Geniş kimyasal uyumluluk aralığına sahiptirler. Termal olarak kararlı değildirler. Yüksek sıcaklıklarda işletilmezler. Naylonlardan imal edilen membranlar kirlenme özellikleri azaltılırlar. Ancak buhar ile sterilize edilememeleri en büyük dezavantajlarıdır. Naylon 6, Naylon 4.6, Naylon 6.6 ve benzeri değişik türleri mevcuttur. Naylon 4.6 daha iyi termal direnç göstermesi nispeten onun buharla sterilizasyonu mümkün kılar. Genel olarak MF ve UF imalatlarında kullanılırlar. Gazların geçirgenliklerinin çok düşük olması nedeniyle, gaz ayırma uygulamaları için uygun değildirler (Aslan, 2016).

İnorganik Membranlar

İnorganik yapıdaki membranlar karbon, silika, zeolit, seramik, farklı oksitler (alüminyum, titanyum, zirkonyum) ve gümüş, palladyum ve alaşımları gibi pek çok metal malzemeden üretilmiş membran tipleridir. Oldukça zor şartlar altında çalışabilirler ve spesifik moleküller için oldukça seçici ve geçirgen olabilirler. İnorganik yapıdaki membranlar, oldukça geçirgen olmaları halinde bağımsız katmanlar ve tüpler olarak yapılmaktadır. Şayet durum aksi ise, çok tabakalı destek yapılarında ince film olarak yapılır. Bu durumda destekleyici tabakalar yeterince dayanıklı ve geçirgen olmalıdır. Membran için pürüzsüz yapıda bir yüzey oluşturmak için gözeneklikte yavaş yavaş veya kademeli değişikliklere ihtiyaç vardır. Örnek olarak;

- *Kömür kaynaklı gazdan H₂ ayrımının yapılması,
- *Doğalgaz ve kömür santrallerinde baca gazlarından CO₂ ayrımı yapılması,
- *Oldukça ekili yanma ve petrokimyasal proseslerde kullanmak için O₂'nin havadan ayrılması,
- *Kimyasal olarak reaksiyon karışımlarından H₂O'nun ayrıştırılmasında,
- *İyonize tuzların ve diğer kirletici maddelerin sudan ayrıştırılması verilebilir (Verweij, 2012).

Seramik Membranlar

Seramik yapıdaki membranlar titanyum, alüminyum ve silisyum oksitlerinden elde edilir. Seramik yapıdaki membranlar, çözücüye karşı dirençli ve ısı kararlılığın ihtiyaç olduğu UF ve MF proseslerinde kullanılmaktadırlar. Bunlar oldukça yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı dirençlidirler. Bu stabilite, seramik membran ile imal edilen MF ve UF proseslerinin gıda, biyo-teknoloji ve eczacılık vb. sektörlerde kullanımı daha uygun kılmaktadır. Seramik yapıdaki membranlar gaz ayırma ve üretme proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber bazı handikapları da barındırmaktadır. Şöyle;

- Yüksek sıcaklıklarda performansları aşırı hassasiyet
- Bazı tiplerinde kararlılık eksikliği göstermesi,
- Membran malzemesinde fiziksel kırılma ve çatlamların meydana gelmesi,
- Oldukça yüksek sıcaklıklarda son derece hassas geçirgenlik,
- Son derece düşük sızdırmazlık performansı göstermelerini sıralayabiliriz.

Metal Membranlar

Metal yapıdaki membranlar, özellikle paladyum membranlar, gaz karışımlarından hidrojenin ayrılmasında tercih edilirler. Palladyum ve alaşımları bu tür membranların hazırlanması ve imalatında yaygın olarak kullanılır. Kompozit paladyum membran bir katalizör yatağına bitişik yerleştirilir ve katalitik reaksiyon kaynağından hidrojenin ayrıştırmasını sağlar. Diğer bir uygulaması ise hidrojen ilavesi içindir (Aslan, 2016).

Metal membranlar ile ilgili temel sorun yüzeyin zarar görebilmesidir. Bu durumda metal aşınması ve bozunması meydana gelebilmektedir. Paladyum tabanlı membranlarda H₂S veya CO gibi toksik bileşenlerin etkisi ciddi sorun olmaktadır. Ayrıca palladyum oldukça pahalıdır. Ancak bu zararlı durum platinyum kullanılarak minimize edilebilmektedir. Bu nedenle son yıllarda bir seramik destek ile desteklenmiş metalik membranlar ince bir palladyum tabakası ile kaplanarak imal edilmekte ya da tek vanadyum, nikel, tantal ve titanyuma dayalı, sadece hidrojen geçişine veren, membranlar tercih edilmektedir. Bu durum nispeten yoğun paladyum ve alaşımlarına göre daha ucuz bir alternatif olmaktadır (Aslan, 2016).

Nanokompozit Membranlar

Polimerik membranlarda kullanılan polimer malzemeleri hidrofilik ve hidrofobik olmak üzere iki grupta toplanabilir. Hidrofilik membranlar tıkanmaya karşı dirençli olduklarından, hidrofilik membranlar ile iyi düzeyde stabil bir filtrasyon prosesi gerçekleştirilebilir. Hidrofobik membranlar ise uzun vadede yüksek kimyasal ve mekanik dayanım özelliği gösterdiğinden kimyasal temizleme ile stabil bir biçimde kullanılabilir. Hem hidrofilik hem de hidrofobik özelliklere sahip polimeri bulmak oldukça zor olduğundan dolayı iki grubun özelliklerine de sahip nanokompozit membranlar ilgi odağı olmaktadır (Chaharmahali, 2012). Çeşitli kimyasal işlemler kullanılarak yapılan kimyasal modifikasyonlarla malzemelere değişik ve yeni yapısal özellikler kazandırılabilir ve bu sayede malzemeler daha farklı uygulama alanlarında kullanılabilir hale gelmektedir (Acarer, 2020).

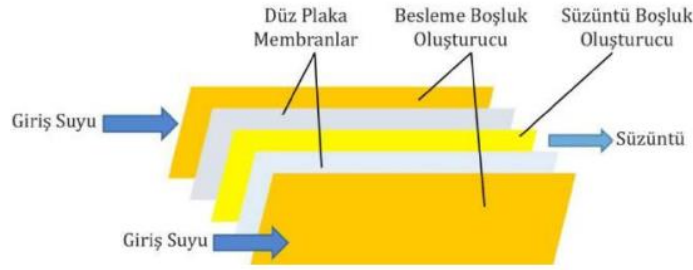
MEMBRAN MODÜLLERİ

Plak Çerçeve Modüller

Plak çerçeve modül membranlarında düz plaka membranlar kullanılmaktadır. Bu membranlar, her bir membran plakası arasında boşluk oluşturacak şekilde plastik malzemenin yerleştirilmesiyle meydana gelmektedir. Böylelikle plak çerçeve modül, hidrodinamik akış kanallarının oluşturulduğu sandviç benzeri modül yapıları elde edilmiş modül tipidir. Genellikle, laboratuvarlarda çokça kullanılan sıkıştırılabilir çelik gövde çerçeveye sahip düz plaka membran modüllerine anımsatmaktadır (Mulder, 1996).

Plak çerçeve yapıdaki modülleri, iki membranın besleme yüzlerinin birbirine yönelecek şekilde sandviç benzeri yerleştirilmesiyle oluşturulan modüllerdir (Drioli & Giorno, 2016). Besleme ve süzünü kısmı uygun boşluk oluşturucu malzeme ile desteklenmektedir. Plak çerçeve yapısındaki membran modülü, istenilen alanı oluşturabilecek membran plaka sayısı kullanılarak sızdırmazlık contaları ve boşluk oluşturucuların üst üste getirilip somun ve civatalar yardımıyla sıkıştırılması şeklinde hazırlanan modüllerdir.

Plaka çerçeve yapıdaki modüllere ilişkin çalışma esası Şekil 13'de açıkça gösterilmektedir. Bu yapıdaki modüller şekilde görüldüğü gibi düz plakaı membran, besleme suyu boşluk oluşturucusu veya destek yapısı ve üretim suyu boşluk oluşturucusunun üst üste montajı elde edilmektedir.



Şekil 13. Plak Çerçeve Modülün Çalışma Prensibi.

Düz plaka yapıdaki membranların kullanıldığı alanlardan olan membran biyoreaktör (MBR) modüllerinde, membranlar aralarında büyük hava kabarcıkları dolaşabilecek şekilde dizayn edilmektedir. Membranlardan süzülen su, merkezi bir toplama tüpte biriktirilmekte ve ana süzünü suyu toplama hattına bağlanmaktadır. Bu tip plak çerçeve batık MBR modüllerinin uygulamanın kapasitesine göre ihtiyaç duyulan toplam yüzey alanları, modüllerin yan yana ve üst üste konumlandırılmasıyla artırılabilir sağlanmaktadır.

İçi Boşluklu Fiber Membran Modülleri

İçi boşluklu yapıdaki fiber modülleri, çoğunlukla MF veya UF membranları olarak üretilmektedir. Daha çok küçük partiküllerin giderimi için kullanılmaktadır. Çok değişik polimer malzemelerinden elde edilmiş içi boşluklu fiber membranlar uzun, ince ve dar bir boru şeklinde olup değişik tiplerde demet halinde toplanarak modül haline getirilmesi ile elde edilir. En fazla kullanılan içi boşluklu fiber modül tarzı, membranların bir demet halinde toplanarak üst ve alt kısımlarından bir epoksi reçine içerisine yerleştirilerek oluşturulmaktadır. Bu şekilde birleştirilmiş içi boşluklu fiber membranlar, basınç kabı içerisine yerleştirilmektedir. Bu modül dikey veya yatay olarak kullanılabilir. İçi boşluklu fiber modüllerin bir diğer kullanım yöntemi de membran demetini etrafıca saran basınç kabı olmadan bir havuz içerisine daldırılarak kullanılma yöntemidir. Normal bir ticari içi boşluklu fiber modülü birkaç yüz fiberden birkaç bin fiyere kadar membran içerebilmesi ile oluşturabilmektedir .

Pek çok uygulamada içi boşluklu fiber membran modülleri düz plaka ve benzeri diğer membran modüllerine göre daha çok tercih edilirler. Diğer modüllere göre daha fazla tercih edilmesini sağlayan bu belli başlı özellikler aşağıda verilmiştir. Bunlar ;

- Membran yüzey alanı ya da modülün kapladığı hacim oranının yüksek olması,
- Mükemmel bir tasarıma sahip olmaları ve bunun da geri kazanım oranını artırıp enerji tüketimini azaltılma imkanının olması,
- Çok fonksiyonlu özelliklere sahip olmaları (her iki yönlü de çalıştırılabilir, dıştan-içe, içten-dışa),
- Oldukça yüksek geri kazanım verimliliğine sahip olmalarıdır (Pabby, 2008).

İçi boşluklu yapıdaki fiber membranların genellikle çapları, yaklaşık 1 - 2 mm arasındadır. İçi boşluklu membranların birçoğu güçlendirilmiş yapıdadır. Bu yapıda olanların iç kısmında bir destek tabakası bulunmaktadır. Bundan dolayı, çekme ve kopmalara karşı daha dirençli bir yapı kazandırılmıştır (Koyuncu, 2018).

İçi boşluklu yapıdaki fiber modülleri dik veya çapraz akışlı olarak uygulanabilir. Şekil 14’de çapraz akışlı içi boşluklu yapıdaki fiber membran modülü görülmektedir. Proses dıştan içe doğru çalışmaktadır. Buna prosese göre konsantre kısım, membran fiberlerinin dış kısmından toplanırken, süzüntü kısmı ise iç çeperlerin ucunun açık olduğu yerden toplanmaktadır (Koyuncu, 2018).

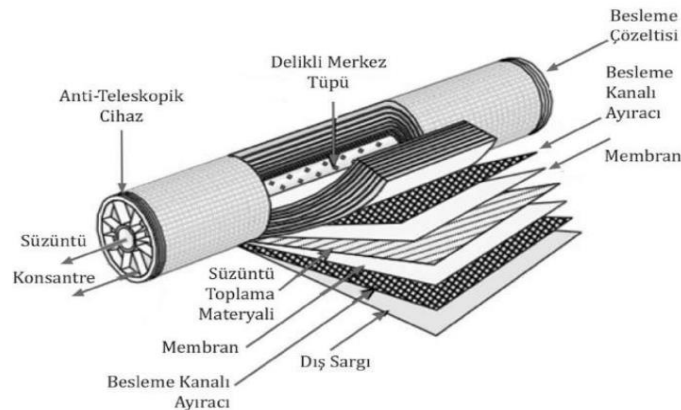


Şekil 14. Çapraz Akışlı Çalışan Bir İçi Boşluklu Fiber Membran Modülü.

Spiral Sargılı Modüller

Spiral sargılı yapıdaki membran modülleri, membran uygulamalarında çok önemli bir yere sahiptir. En başında ters osmoz uygulamaları için geliştirilmiş olsa da şimdilerde ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, gaz ayırımı gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılabilir (Blackmer et al., 1978)

Spiral sargılı yapıdaki modüller (Şekil 15), plak çerçeve modüllerin daha da geliştirilmesi ile elde edilmiş bir halidir. Ayrıca en yaygın kullanılan modül türüdür. Bu modül tipinin en büyük üstün özelliği oldukça yüksek paketleme yoğunluk kapasitesine sahip olmasıdır. Spiral sargılı yapıdaki modülde, paketleme yoğunluğu yaklaşık 14-35 m²/m³ aralığındadır. Bu değer, plak çerçeve tip ya da tübüler modüllere nazaran daha yüksek bir değerdir (Kucera, 2015).

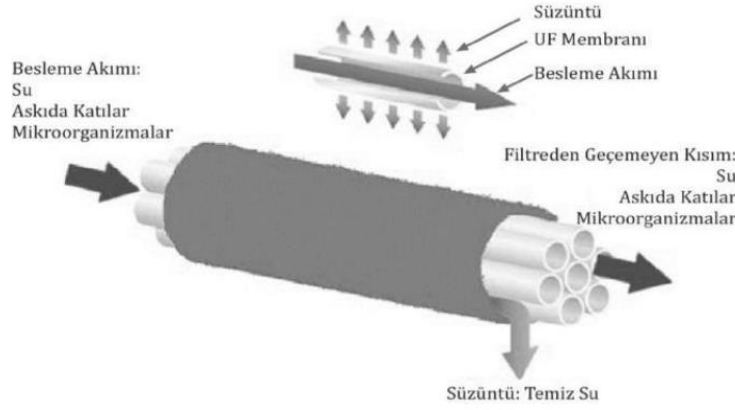


Şekil 15. Spiral Sargılı Modülü İçerisinde Bulunan Malzeme Katmanları.

Tübüler Membran Modülleri

1965 'li yıllarda geliştirilen bu modül tipi, genellikle ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon uygulamaları ile sınırlıdır. İçi boşluklu fiber membranlar ile aynı geometriye sahip olup sadece boyutları daha büyüktür. Gözenekli paslanmaz çelik, seramik ya da polimerik malzemelerden üretilebilmektedirler. Tübüler yapıdaki membranların (Şekil 16) çapları yaklaşık 0,5 - 3 cm aralığında değişebilmektedir.

A. Gül, İ. Tiyek



Şekil 16. Tübüler Membran Çalışma Prensibi.

MEMBRAN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Sentetik yapıdaki polimerik membranların üretilmesinde birçok farklı yöntem uygulanabilmektedir. Bu metotlardan hangisinin kullanılacağı hususu büyük ölçüde polimerin cinsine ve üretim sonucunda elde edilmesi planlanan morfolojiye bağlıdır (Howel et al. 2012). Organik ve organik yapıda olmayan membranların nasıl üretilbileceği ve üretilen membranın tipi Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Membran Hazırlama Teknikleri.

Membran Hazırlama Prosesi	Hazırlanan Membranların Cinsi
Faz inversiyonu	Ters ozmos, UF, MF ve diyaliz membranları
Faz Ayrımı/Ayrıştırma	Na ₂ O-B ₂ O ₃ -zengin faz SiO ₂ -zengin faz (cam ve seramik
Sol/Gel Teknikleri	Metal alkoksitleri, polimerize olmuş (alümina, titanya)
Sinterleme	0,1-20 µ por büyüklüğü (PTFE, PE, PP)
Kontrollü Germe	0,1-5 mikron por büyüklüğü (Goretex ve Celgard)
Ekstrüzyon/Aktivasyon	Silikon kauçuk, Nafion
Kontrollü Piroliz	Temel organik membranlar, silika ve karbon moleküler elek membranları hazırlamak için pirolizlenir.
Boşluk oluşturma	Önce radyoaktiviteye sonra aside maruz bırakılır.
İnce-Film Kaplama	Püskürtme kaplama, buhar depozisyonu (geçiş metal alaşımları örneğin; Al/Ag, Cu/Zr, Ni/Pd)
Anodik Oksidasyon/Aşındırma	Kuvvetli metal asidiyle aşındırma
Kaplama	Kompozit membranlar
Elektrospinning	Nanofiber membranlar

Elektrospinnig Lif Çekim Teknolojisi

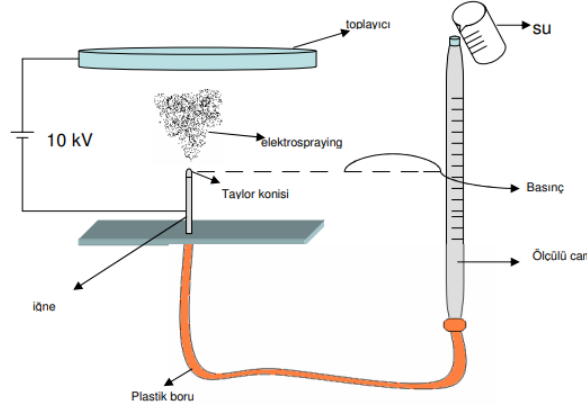
Elektrospinning Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Aslında elektrospinning prosesi yeni bir teknoloji değildir. Elektrospinning prosesi, 1600 ’lü yılların başında William Gilbert’in çalışmalarında ilk görülmüştür (Kataphinan, 2004). Manyetizma üzerine yaptığı bu çalışmalarda, elektromanyetizmanın sıvılar üzerindeki etkisini tesadüfi olarak gözlemlemiştir. Gözlem neticesinde su damlasının uygulanan elektriksel alan içerisinde bir yüzeyden başka bir yüzeye koni formunda yönlendiğini açıklamıştır. Bu açıklamaları, elektrospinning yönteminin tarihsel noktadaki başlangıcı olmuştur (Kataphinan, 2004; Lam, 2004).

Lord Rayleigh 1882 yılında elektrik alan içerisindeki çözeltilerin elektrospinning prosesi sırasında meydana gelen düzensiz yönlendirmeler hakkında çalışmalar gerçekleştirmiştir (Chun, 2005). Bu çalışmalar sonucunda elektrik alan içerisindeki çözelti damlacığının yüzey gerilimini aşan bir seviyeye ulaşması durumunda elektrik alan içerisinde kararsızlık düzeyine ulaşarak yönlendirmenin ardından kopmaların yaşandığını savunmuştur (Yarin et al. 2001). Buna

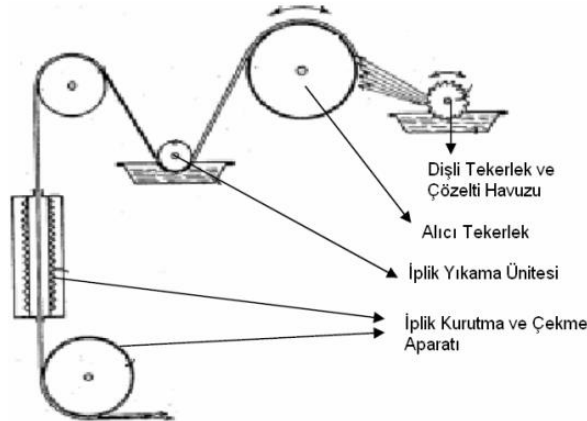
ek olarak; çözelti damlacığı üzerine etki eden iki kuvvet olduğunu ve bunlardan birinin elektrik kuvveti, diğerinin ise elektrik kuvvet yönünün tersine yönde etki eden yüzey gerilim kuvveti olduğunu açıklamıştır. Elektrospraying prosesi, elektrik alan içerisindeki damlacığın kuvvetinin, yüzey gerilim kaynaklı olan kuvveti aştığı noktada düz ucunda ince jet çıkışlara ayrılarak yönlenebilir hale gelmesiyle gerçekleşmektedir (Chun, 2005; Sanders, 2005; Reneker, 2000).

İlk olarak elektrik verilmiş sıvıların hızlı elektrodinamik çarpılmasını gözlemleyen Zeleny bu çalışmasını 1917'de gerçekleştirmiştir (Şekil 17). Gerçekleştirdiği bu çalışma neticesinde meydana gelen spreynin; sıvının yapısının, uygulanan yüksek voltajın ve borunun uç bölgesindeki sıvı basıncının fonksiyonu olduğunu ifade etmiştir (Margean, 2004).



Şekil 17. Zeleny'nin Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

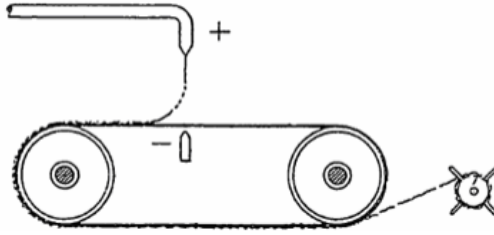
Elektrospraying yöntemine dayalı lif üretimi konusundaki ilk patenti, 1934'de Anton Formhals almıştır. Anton'un icadı, sıvı yapılar konusunda elektrik alana dayalı suni ve sentetik filament elde edilmesini sağlamıştır (Desai, 2004). Anton bu çalışmasıyla polimerik yapıda filamentlerin elde edilmesini üzerine elektrostatik kuvvetlerin kullanılmasının esaslarını açıklamıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Anton'un Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

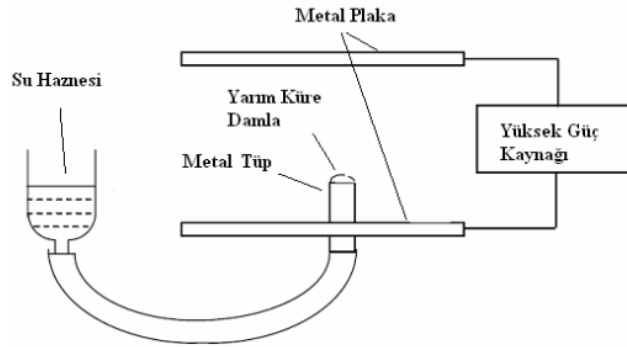
Daha istikrarlı bir elektrospraying üretimi yapabilmek için Gladding tarafından yeni bir teknoloji geliştirildi. Bu teknolojiye liflerin bir arada toplanabilmesi amacıyla süreklilik arz eden bir konveyör bant sisteminden yardım aldı. Bu konveyör sistemi (Şekil 19) elektrik alan içerinden geçip, meydana gelen lifleri bir arada toplayabilmesi ile farkındalık oluşturmuştur (Chun, 2005).

A. Gül, İ. Tiyek



Şekil 19. Gladding'in Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

Taylor tarafından 1960'lı yıllarda ortaya konulan birçok çalışmada, elektrik yükü ile yüklenmiş sıvıların, esas olan teorik ilkeler ifade edilmiştir (Hohman, 2001). Bir çalışmasında, iki sıvı seviyeleri arasında bulunan koni ara yüzeyin uygulanan elektrik alan içerisinde (Şekil 20) dengeli bir seviyede olduğunu ifade etmiştir (Kataphinan, 2004). Sıvı yüzeyleri elektrik alan içerisinde yüklenir ve zıt yüklerin itme kuvvetleri ile bir kuvvet meydana gelir. Denge değerini aştıktan sonra elektro-statik kuvvet yardımıyla, sıvı damlacık yüzeyleri bir koni formunu alır. Bu koni formu sayesinde fazladan olan yükler, koni formunun ucunda meydana gelen yüklenmiş jetten dışa doğru yönlendirilir. Yaptığı çalışmada elektrik alan kuvvetinin, yüzey gerilimi ile aynı olduğu eşik noktada koni formunun oluştuğunu ifade eden Taylor, meydana gelen bu koninin yarım pozisyon açıl değerinin 49.3° olarak açıklamıştır (Rangkupan, 2002).



Şekil 20. Taylor'un Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

Taylor'un açıkladığı teoride, elektriksel alan içerisindeki viskoz damlacıktan ince liflerin meydana gelmesi, elektriksel kuvvet yardımıyla yüklü olan sıvı yüzeyinde meydana gelen kararsız yapıdan kaynaklandığını ifade etmiştir (Mohan, 2002). Uygulanana büyük voltaj değerlerinde dairesel damlacık meydana gelmektedir. Eşik noktada viskoz damlacığının yarı dairesel formu yıkılarak jet meydana gelmesinden önce koni Şekil 21-(a)'da ifade edilen formunu almaktadır. Koni şeklini alan damla yapısının ucu ile taban seviyesi arasında Şekil 21-(b)'de ifade edildiği gibi yaklaşık 50° 'de bir açı oluşur. Elektrik alan kuvvetinin etkisi altındaki, viskoz formundaki akışkanın yüzey kıvrımlı yapısı farklı bir al alır. Bu esnada elektriksel kuvvete karşı meydana gelen tek kuvvet yüzey geriliminin oluşturduğu kuvvettir.

Taylor tarafından geliştirilen damlacık yapının maksimum kararsızlık seviyesindeki eşik değer voltaj (V_c) değerinin denklemi denklem 1'de şu şekilde açıklanmıştır;

$$V_c = 4 \left(\frac{H}{L} \right) * \left(\ln \left(\frac{2L}{R} \right) + 1.5 \right) * \left(1.3\pi RT \right) * (0.09) \quad (1)$$

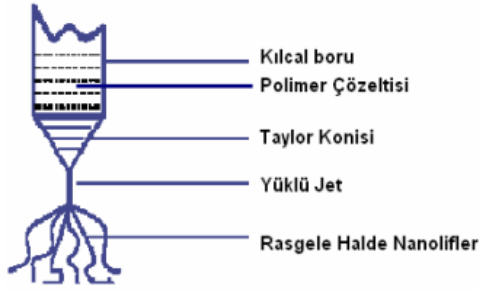
Burada;

H: elektrik alan mesafesi (cm),

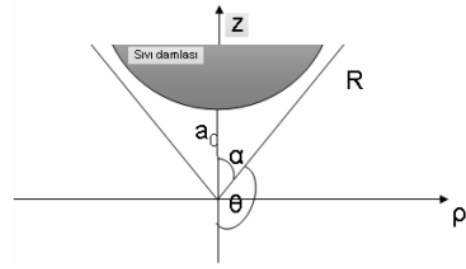
L: kılcal boru uzunluk değeri (cm),

R: kılcal boru yarı çap değeri (cm),

T: damlacıkta meydana gelen yüzey gerilimi (dyne/cm) olarak dikkate alınmaktadır.

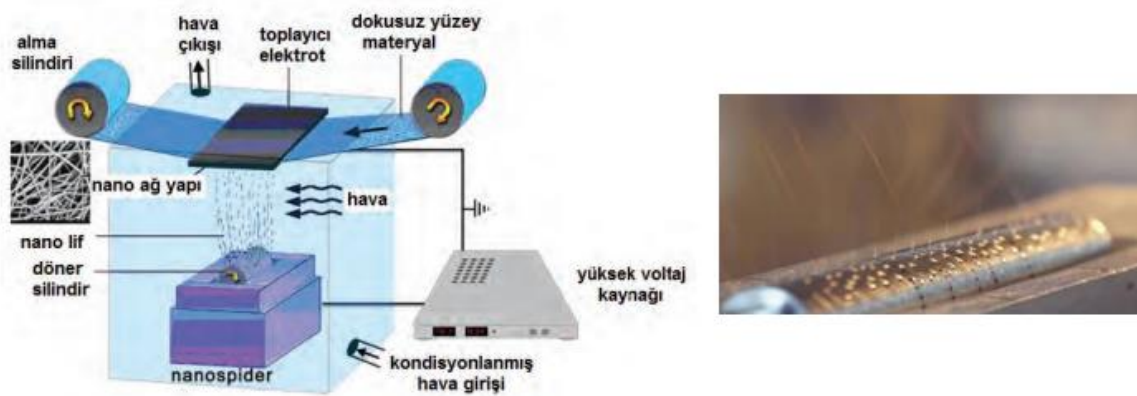


Şekil 21 (a). Damlacığın Taylor Konisi ve Lif Dağılımı



(b) Taylor Konisi Yarı-Konik Açısı

Günümüzde oldukça fazla tercih edilen elektrospinning lif çekim yönteminin gelinen noktadaki şematik gösterimi Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. Elektrospinning Lif Çekim Yönteminin Şematik Gösterimi.

Elektrospinning Sürecini Etkileyen Faktörler

Düzenli ve sorunsuz bir elektrospinning prosesi için Tablo 2’de belirtilen parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu parametreler sadece prosenin sorunsuz bir şekilde uygulama konmasında değil aynı zamanda elde dillecek olan nanolif karakteristik yapılarına doğrudan etki edebilecek parametrelerdir.

Tablo 2. Elektrospinning İşlemine Etki Eden Parametreler.

Polimer Özellikleri	Çözelti Özellikleri	Diğer Özellikler
*Moleküler Ağırlık	*Viskozite	*Substrat Özellikleri
*Moleküler Ağırlık Dağılımı	*Viskoelastisite	*Çözelti Akış Hızı
*Camsı Geçiş Sıcaklığı	*Konsantrasyon	*Elektrik Alan Şiddeti
*Çözünürlük	*Yüzey Gerilimi	*Elektrot Geometrisi
	*Elektriksel İletkenlik	*Çözücü Buhar Basıncı
		*Bağıl Nem

Elektrospinning sürecinin temel amaçları genel olarak;

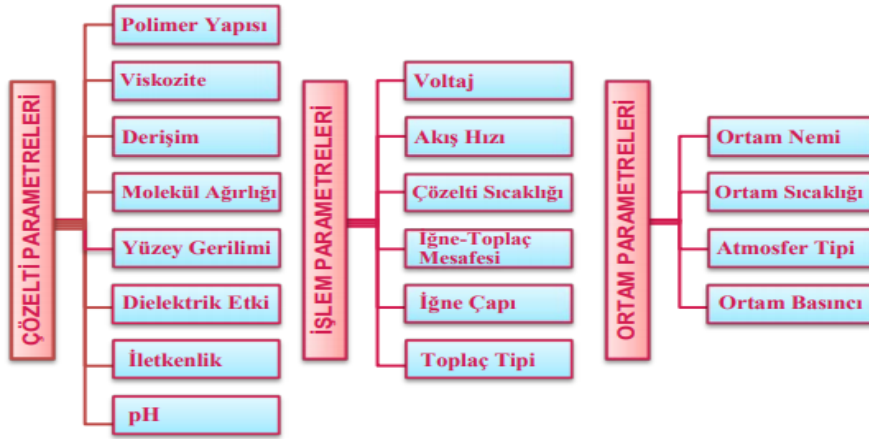
- * Mono filament şeklinde nanolifler toplanması,
- * Birbirleriyle uyumlu ve kontrol edilebilir lif çapları,
- * Lif yüzeyinde oluşacak hatasız yapı ya da kontrol edilebilir durumlar, şeklinde özetlenebilir (Kozanaoğlu, 2006).

Kontrollü bir elektrospinning süreci ile belirtilen genel hedeflere ulaşmak mümkün olabilmektedir. Elektrospinning yöntemi, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir nanolif üretim tekniği olarak avantajlı

olmasına karşın, sürece etki eden pek çok parametre bulunduğundan kontrol edilebilirliği oldukça güç bir süreçtir (Cengiz et al. 2006).

Parametrelerin iyi anlaşılması ve doğru analiz edilmesi sayesinde kontrollü bir elektrospinning süreci gerçekleştirmek ve farklı yapılarda düzgün, ultra ince lifler elde etmek mümkün olacaktır. Parametreleri çeşitlendirerek farklı morfolojilerde nanolifli yüzeylerin elde edilebilmesi de mümkün olabilmektedir (Ramakrishna et al. 2005).

Elektrospinning sürecini etkileyen faktörlerin, nanolif çapı ve yüzey morfolojisine etkilerinin incelenmesi, süreçle ilgili literatürde en çok ilgi çeken konulardan biri olmuş, bu konuda oldukça fazla sayıda çalışmalar yapılmış ve bu faktörlerin farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmüştür. Genel olarak, elektrospinning sürecini etkileyen faktörler Şekil 23 gibi sınıflandırılabilir:

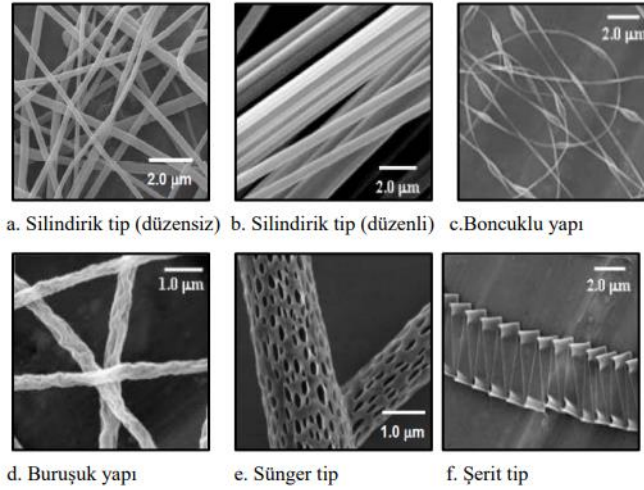


Şekil 23. Elektrospinning Yöntemini Etkileyen Faktörler Tablosu.

Çözelti Parametreleri:

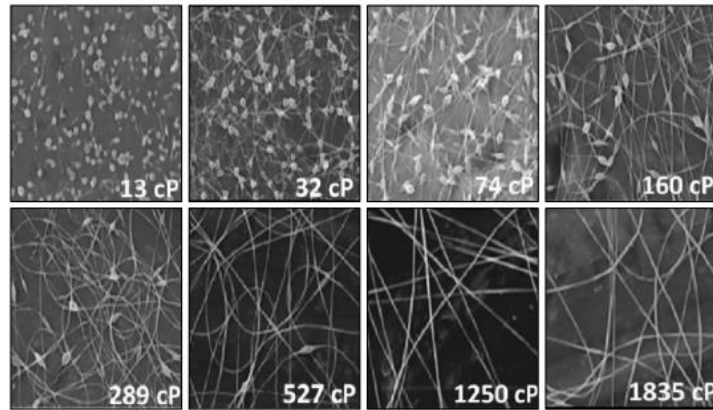
Elektrospinning sürecini ve elde edilen nanolif yüzey morfolojisini doğrudan etkileyen faktörlerin en başında polimer çözeltisinin özellikleri gelmektedir. Polimer çözeltinin yüzey gerilimi, viskozitesi ve elektriksel özellikleri gibi genel özellikleri nanolif yüzeyde karşılaşılabilecek yaygın sorunlardan biri olan boncuk oluşumunun ve lif formasyonu ve çaplarının kontrol edilmesinde önemli bir etkiye sahiptir (Üstündağ, 2009).

a- Polimer Yapısı: Farklı polimer çözeltileri kullanılarak birbirlerinden oldukça farklı niteliklere sahip nanolif yüzeyler elde edilebilmektedir. Farklı polimerler kullanılarak elde edilmiş nanolifler, dallanmış, düz veya eğik şeritler halinde, gözenekli veya buruşuk tiplerde (Şekil 24) olabilmektedir.



Şekil 24. Elektrosinning Yöntemiyle Elde Edilmiş Polimer Yapısına Bağlı Farklı Lifler

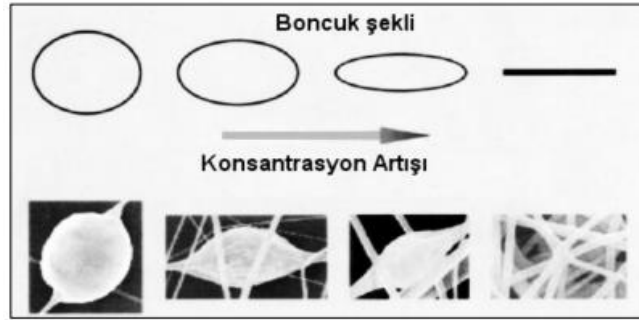
b- Viskozite: Elde edilen polimer çözeltisinin akışkanlığa karşı gösterdiği direnç polimerin viskozitesini oluşturmaktadır. Elektrosinning işleminde kullanılan çözeltinin nanolif meydana getirmesi için belli değerler arasında olması gerekmektedir. Polimer çözelti viskozitesinin çok yüksek olması, damlacık üzerindeki elektrostatik kuvvetlerin yüzey gerilimini yenememesine ve polimer jetin oluşamamasına neden olur. Çünkü viskozite yüksekliği, polimerin şırıngadan pompalanmasını güçleştirir ve şırınga ucunda damla oluşabildiğinde ise çözücü buharlaşır. Bu durum şırınga ucunda kurumalara ve tıkanmalara neden olmaya başlar. Viskozite değişimine bağlı olarak elde edilen liflere ait SEM görüntüleri Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. Viskozite Değişiminin Nanofiber Morfolojisine Etkisini Gösteren SEM Görüntüleri.

Polimer çözelti viskozitesinin düşük olması halinde, elektrosinning prosesinde polimer jet üzerinde yüzey gerilimi kuvvetlerinin baskın etkisi olur ve zincir karmaşıklığı düşük düzeyde kalır. Bu nedenle sürekli bir jetin oluşumu gerçekleşemez veya sık boncuk oluşumları görülebilir. Viskozitedeki artışla birlikte polimer jetin zincir karmaşıklığı artarak, elektrosinning sürecinde sürekli jet oluşumu gerçekleşmiş olur.

c- Derişim: Elektrosinning işleminde, nanolif yapısının oluşumu için en optimum çözelti derişiminin sağlanması gerekmektedir. Çözelti derişiminin düşük olduğu hallerde liflerin boncuklarla birlikte oluşabilmektedir. Çözelti derişiminin artırılması ile beraber boncukların şekli küresel formdan uzaklaşarak lif formuna dönüşmesi sağlanır. Bununla beraber derişim artışı, yüksek viskoziteye neden olacağından lif çaplarında da artışlar Şekil 26'de gösterildiği gibi oluşması beklenmektedir (Bhardwaj et al., 2011).



Şekil 26. Çözelti Derişimindeki Artışla Boncuk Şekli Arasındaki ilişki.

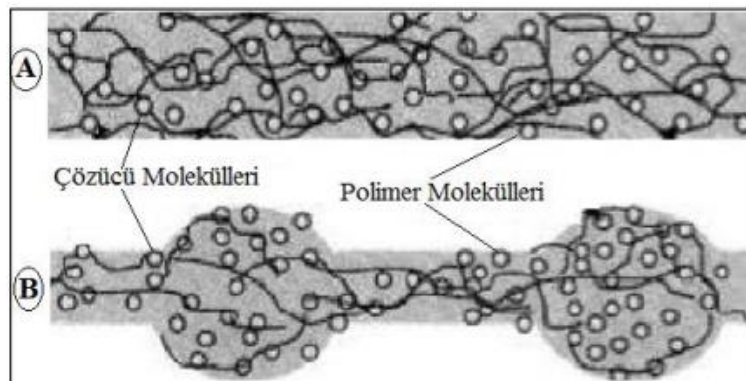
Daha yüksek derişimlerde ise, iğne ucundaki çözelti akış sağlanamayarak uçta kurumalar ve tıkanmalara neden olur ki bu durumda lifler oluşmaz veya oluşabilecek liflerde devamlılık sağlayamazlar (Bhardwaj et al., 2011).

d- Molekül Ağırlığı: Moleküler ağırlık değeri, çözeltinin viskozitesini etkileyen temel parametrelerden biridir. Aynı polimerin farklı molekül ağırlıklarına sahip iki farklı numunesi alınarak, aynı çözücüde çözeltisi hazırlandığında genellikle molekül ağırlığı büyük olan numunenin oluşturduğu çözeltinin viskozitesi daha yüksek olur. Elektrosinning işleminin geręekleşmesi için çözeltinin uygun viskoziteye ve molekül ağırlığına sahip olması gerekmektedir (Gürcan, 2016).

Polimerin yapısının molekül ağırlığı, oluşacak polimer zincir uzunluğunun göstergesidir. Polimer çözeltisinin şınga ucundan toplayıcı plakaya yönlenme süresince, jetin dağılmasını engelleyen ve devamlılığı sağlayan, molekül zincirlerinin birbirine dolanmasından kaynaklıdır. Bundan dolayı küçük polimer zincirleri elektrolif oluşurmaya yatkın değillerdir. Genelde düşük molekül ağırlığına sahip polimer çözeltilerinin boncuklu lif yapılarına, yüksek molekül ağırlıktaki polimerler çözeltilerinin ise büyük lif çaplarına sebep oldukları söylenebilmektedir (Özkoç, 2010).

e- Yüzey Gerilimi: Elektrosinning sürecinin başlayabilmesi, polimer çözeltisi üzerindeki elektriksel yüklerin, çözeltinin yüzey gerilimini aşması ile meydana gelmektedir. Yüzey gerilimi, bir sıvının birim kütlesindeki yüzey alanını azaltma etkisine sahiptir. Ayrıca yüzey gerilimi, elektrosinning işlemini oldukça zorlaştran bir etmendir.

Yüzey gerilimi kaynaklı olarak çözelti içerisindeki çözücü moleküllerinin oranı arttığında, çözücü moleküllerinin toplanarak küresel bir form alma eğilimi daha da artacaktır. Bundan dolayı, polimer jeti metal toplaca doğru ilerlerken yüzey gerilimi etkisiyle çözücü molekülleri boncukların oluşmasına neden olabilecektir. Polimer çözeltisinde çözücü oranının azalması yüksek viskoziteyle birlikte, çözücü ve polimer molekülleri arasında daha fazla etkileşim anlamına gelmektedir. Böylece yüklerin etkisi ile çözelti gerildiğinde çözücü molekülleri, karmaşık polimer moleküllerine yayılmaya yönelecek (Şekil 27) ve bu şekilde yüzey geriliminin etkisi altında çözücü moleküllerinin bir araya toplanma eğilimi azalacaktır (Ramakrishna et al., 2005).



Şekil 27. Yüksek (A) ve Düşük (B) Viskozitede Yüzey Geriliminin Çözücü Molekülü.

f- Dielektrik Etki: Çözücünün dielektrik sabiti elektrospinningi işleminde önemli bir etkiyi sahiptir. Genel manada dielektrik özelliği yüksek olan bir polimer çözeltilisinden elde edilen liflerin, boncuklu yapısı daha az ve çapı küçüktür. Dielektrik özelliğini artırmak ve lif morfolojisini geliştirmek için bir polimer çözelti içerisine N,N-dimetilformamid (DMF) gibi çözücüler ilave edilebilir. Polimer, jetin yüksek dielektrik değerine sahip olmasıyla birlikte, jetin esneklik kararsızlığı da artarak, liflerin birikme alanının artmasını sağlar. Buna bağlı olarak jetin izlediği yol artmış olacağından bu durum lif çapını azaltmaya yönelik bir imkân da sağlayabilir (Yener, 2010).

g- Çözelti İletkenliği: Elektrospinningi yönteminde lif çapını etkileyen önemli polimer çözeltisi özelliklerinden birisi de çözelti iletkenliktir. İletkenlik olarak çözelti, elektrik akımı taşıma kabiliyeti olarak da tanımlanabilir. Polimer çözeltisinin elektrolif olarak çekilebilmesi için belli bir iletkenlik değerine sahip olması gerekmektedir. Polimer jetin oluşması için yüzeyde yüklerin akması ile beraber çözeltinin uzaması gerçekleşmelidir. Çözeltiye bir miktar tuz veya iyon ilave edilerek çözeltinin iletkenliği artırılmaktadır. Böylelikle jet üzerinde daha fazla yük taşınabileceğinden, artan yükler sayesinde çözelti daha fazla uzayacaktır. Böylelikle boncuklu yapı oluşumu önlenerek, daha düzgün lif yapısı elde edilmiş olunur. Polimer jetinin uzaması aynı zamanda da daha küçük çaplarda liflerin oluşmasına neden olur (Kozanaoğlu, 2006).

h- pH: Elektrospinning sisteminde kullanılan polimer çözeltisinin pH'ı, bir anlamda elektrik iletkenliği hakkında da bilgi verir. Ph değerinin değişmesiyle iletkenliğin de değişmektedir. Ph artışı sonucu çözeltinin bazik duruma gelmesiyle liflerin daha homojen ve ince bir hal aldıkları ancak asidik ortamda boncuklu yapıların oluştuğu hakkında bazı araştırmalar mevcut değildir (Üstündağ, 2009). Bu durumun, asidik ortamda polimerin proton fazlalığından kaynaklandığı açıklanmıştır (Kozanaoğlu, 2006).

İşlem parametreleri:

a-Voltaj: Elektrospinning sürecinin en temel parametresi, polimer çözeltilisine yüksek voltaj uygulanmasından oluşmaktadır. Uygulanan yüksek gerilim ile çözelti üzerinde toplaman elektriksel yük miktarını artırarak, çözeltinin topraklanmış bir toplayıcıya doğru ince bir jet şeklinde ilerlemesini sağlayan elektrostatik kuvvetleri meydana getirmektedir. Çözeltideki elektromanyetik kuvvetlerin, çözeltinin yüzey gerilimi kuvvetlerini yenmesi ile birlikte de elektrospinning işlem süreci başlatılır (Üstündağ, 2009).

Meydana gelen elektrik alanının yoğunluğu artırıldığında, iğne ucundaki yarı küresel sıvı yüzeyi toplayıcıya doğru esnemeye başlar. Böylece Taylor konisi oluşmuş olur. Koni üzerindeki elektromanyetik itme kuvvetleri yüzey alanını aştığında polimer jeti iğne ucundan toplaca doğru yönelmeye devam eder. Uç ve toplayıcı mesafesi boyunca esner, içerisindeki çözücü buharlaşır ve metal toplayıcı üzerinde bir nonwoven (dokuma ve örgü olmayan) kumaş yüzeyi oluşumu gerçekleştirilmiş olunur. Uygulanan voltaj elektrospinning jet üzerinde birikmelerin oluşmasını sağlar (Sirin, 2013).

Bazı hallerde çok yüksek voltajla beraber, jetin ilgili yapıdan küresel yapıya dönerek liflerde boncuk yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Uygulanan voltaj, liflerin düzenli bir şekilde dizilebilmelerini, fiziksel görünüşlerini ve kristal yapılarını da etkilemektedir. Ancak polimer moleküllerinin düzenli bir şekilde dizilebilmeleri için uç ve toplayıcı arasındaki mesafede belirli bir süreye ihtiyaç vardır. Gerilim arttırılırsa bu süre kısılacağı için kristalleşme için gerekli süre olmayacak ve boncuk yapılar meydana gelecektir. Bundan dolayı uygulanacak voltaj en uygun kritik değerler arasında olmalı, çok yüksek ya da çok düşük uygulanmamalıdır (Ramakrishna et al., 2005).

b- Çözelti Akış Hızı: Çözelti akış hızı, elektrospinning işlemi için kullanılacak polimer çözeltisinin miktarı olarak ifade edilir. Çözelti akış hızı arttırıldığında şırınga ucundan transfer edilen çözelti miktarı artacağından boncuk büyüklüklerinde ve lif çaplarında artışlar beklenmektedir. Elektrospinning için en uygun kritik çözelti

akış hızı Taylor konisinin kararlı olduğu akış hızı olarak tarif edilir. Akış hızı bu kritik değeri geçtiğinde lif çapı ve boncuk oluşumu da mümkün mertebe artmaktadır.

Şırınga ucundan çekilen çözelti miktarının fazlalığına bağlı olarak jetin kuruması için gerekli olan zaman da artar. Böylece aynı transfer süresinde toplayıcıda biriken lifler içindeki çözücü buharlaşmak için gerekli süreyi bulamaz. Biriken lifler içerisinde buharlaşmadan kalan çözücü, toplaç üzerinde toplandıktan sonra buharlaşacağından liflerin birbirlerine değdiği bölgelerde kaynaşmalar ve yapışmalar meydana getirir. Bundan dolayı çözelti akış hızı, jet içerisindeki çözücünün buharlaşmak için ihtiyaç duyduğu zamanı sağlayabilecek derecede düşük olması gerekmektedir (Üstündağ, 2009).

c- Çözelti Sıcaklığı: Çözelti yüksek sıcaklığı, viskozitenin azalmasını sağlarken, elektrospinning işlemi esnasında da buharlaşma hızını arttırmasına neden olur. Çözelti sıcaklığının artmasıyla beraber viskozitesi düşeceğinden, jet üzerindeki coulomb kuvvetleri daha fazla gerilmeye neden olarak daha homojen ve ince yapıda liflerin oluşması sağlanmış olunur. Yükselen sıcaklık, polimer moleküllerinin hareketliliğinin artmasına ve sonuçta coulomb kuvvetlerinin etkisi ile çözeltinin gerilimini arttırmasına sebep verir. Buna ek olarak, çözelti sıcaklığının artması ile polimer moleküllerinin hareketliliği arttığından coulomb kuvvetlerinin çözelti jetine etkisi fazla olmaktadır (Ramakrishna et al., 2005).

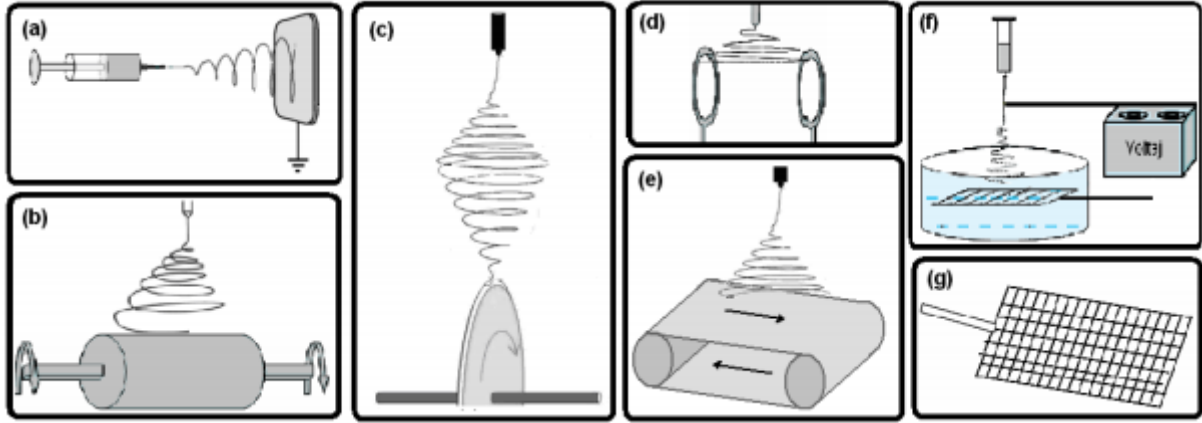
d- İğne-Toplayıcı Arası Mesafe: Elektrospinning işleminde elektriksel alan kuvveti kadar etkili olan başka bir faktör çözeltinin uçuş süresidir. Şırınga ucu ve toplayıcı arasındaki mesafe değişiminin, elektriksel alan kuvvetinin değerini ve polimer jetin uçuş süresi üzerinde doğrudan etkisi oluşmaktadır. Birbirinden bağımsız lifler oluşturmak için elektrospinning yönteminde çözücünün uçarak ayrılması için zamana ihtiyaç vardır. İğne ucuyla toplayıcı arasındaki mesafe yaklaştıkça, artacak elektriksel alan kuvveti ile birlikte jetin toplayıcıya doğru ivmelenmesi sağlanmış olunur. Ancak jetin uçuş yolu kısaldığından jet lif oluşumu için içerisindeki çözücünün buharlaşması için gereken yeterli zamanı olmayacaktır. Böylece toplaç üzerinde biriken liflerin birbirleriyle kaynaşmaları veya boncuklu lif yapısı gözlemlenecektir (Aytan, 2016).

Boncuklu iğne ucu ve toplaç arasındaki elektriksel alan kuvvetinin yükseltilmesi sonucu da oluşabilir. Mesafeyi daraltmak uygulanan voltajı arttırmakla aynı etkiyi gösterir. Başka bir durumda mesafeyi arttırmak, ortalama lif çapının düşmesine neden olmaktadır. Uç ve toplayıcı arası mesafenin yükselmesi, çözeltinin uzayarak toplaca ulaşmadan önce çözücünün uçmak için daha uzun bir zamana sahip olmasını ifade eder. Ancak bazı durumlarda mesafenin artmasıyla birlikte lif çapı artışları da gözlemlenebilir. Bu, elektrik alan kuvvetinin azalmasının lifin daha az uzamasına neden olmasından kaynaklandığının göstergesi olabilmektedir. Mesafe çok fazla olduğu zaman toplayıcıda lif oluşumu gerçekleşmez (Kozanaoğlu, 2006).

e- İğne Çapı: Nanolif yüzeyin toplandığı alanın beslediği iğne veya kılcal borunun iç çapı elektrospinning işleminde nanolif niteliği açısından son derece önemlidir. Çaptaki küçülme arttıkça üretilen nanoliflerin çapında da azalmalar gözlenmektedir. İğnenin ucunda oluşan damlacığın boyutu küçüldükçe damlacıktaki yüzey gerilimi de artmaktadır. Uygulanan voltaj miktarı aynı düzeyde tutulduğunda jetin başlayabilmesi için daha fazla elektrostatik itme kuvveti gerekmektedir. Nihayetinde jetin hızlanması azalır ve nanoliflerin toplayıcı üzerinde birikmesinden önce gerilmesi ve uzaması için daha fazla zaman sağlanmış olur. Sistemde iğne ve kılcal boru iç çapı daha fazla küçültüldüğü takdirde polimer çözeltisinin püskürtülmesi gittikçe zorlaşacağından uçta tıkanmalar ve boncuk oluşumları daha sık gözlemlenir (Ramakrishna et al., 2005).

f- Toplayıcı Tipi: Elektrospinning işleminin başlayabilmesi için öncelikle topraklanmış toplayıcı ve şırınga/pipet arasında elektriksel bir alan oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle toplayıcı olarak değişik iletken bir materyal kullanılır ve bu materyal de elektriksel olarak topraklanabilir. Toplayıcı olarak iletken olmayan bir malzemenin kullanılması durumunda, jet üzerindeki yükler, toplayıcı üzerinde çok hızlı birikir ve böylece daha az lif toplanmış olur.

Toplayıcı malzeme üzerine düşen lifler, toplayıcının şeklini almaktadır. Farklı düzeneklerden elde edilen nanoliflerin özellikleri de birbirinden farklıdır. Sabit plaka üzerinde toplanan nanolifler, birbiri üzerinde rastgele konumlanır. Rastgele konumlanma durumu, elektrospinning yöntemi ile elde edilen nanolifli yüzeyin kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Nanoliflerin potansiyel kullanım alanlarını artırmak için, nanoliflerin kontrollü konumlanması ve belirli bir düzende hizalanması, farklı toplayıcı tipleri kullanılarak oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu nedenle dönen tambur veya disk, taşıyıcı bant gibi hareketli toplayıcılar kullanılabilirken, paralel bilezik veya çerçeveler gibi sabit toplayıcı malzemeler de kullanılabilir (Şekil 28). Hareketli toplayıcıların dönüş hızları da oluşan liflerin hizalanmasında önemli etkiye sahip olacaktır (Ramakrishna et al., 2005).



Şekil 28. Elektrospinning Yönteminde Kullanılan Bazı Toplayıcı Tipleri (a) Sabit Plaka; (b) Dönen Tambur; (c) Dönen Disk; (d) Paralel Bilezikler; (e) Taşıyıcı Bant; (f) Sıvı Banyo; (g) Metal Izgara.

Çevre Parametreleri:

Sıcaklık seviyesi arttıkça çözücünün buharlaşma hızı da artmaktadır. Buna ek olarak viskozitenin azalmasına ve çözünürlüğün artması sağlanmış olur. Tüm bunlar, polimer jetinin esnemesine yardımcı olur ve daha düzgün dağılımlı nanolif yapıları elde edilir. Nem oranı yüksek bir ortamda elektrospinning işlemi gerçekleştirildiğinde, nanolifler üzerinde su molekülleri birikmiş olduğundan gözenekli yapıda nanolif yüzeyleri meydana gelmektedir. Nem miktarının artması, oluşan gözeneklerin boyutunun ve derinliğinin artmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak ortamın nemi, nanolifler üzerinden çözücünün buharlaşma hızını da yavaşlatmaktadır. Nem olmayan ortamlarda çözücünün buharlaşması, daha hızlı olmaktadır (Sevimli, 2011).

Elektrospinning işleminin gerçekleştiği ortamdaki havanın bileşimi de oldukça önemlidir. Çünkü birtakım gazlar yüksek elektrik alanı altında farklı davranışlar sergileyebilmektedirler. Helyum gazı buna bir örnektir. Elektrik alana maruz kaldığında bozulur ve elektro çekimi engellemektedir. Ortamdaki basınç miktarının azalması genellikle elektrospinning üzerinde olumlu bir etki oluşturmaz. Elektrospinning işlemi, atmosfer basıncından daha düşük bir basınç altında gerçekleştirildiğinde, iğne ucunda çözelti çabucak köpürür, şırıngadaki çözeltinin dışarı akma eğilimi daha fazla olur ve bu durum dengesiz bir jet başlangıcına neden olur. Çok düşük basınçta, elektriksel yüklerin direkt boşalmasına bağlı olarak elektrospinning oluşması gözlenmez (Üstündağ, 2009).

SONUÇ

Nanofiber üretiminde en fazla tercih edilen “Elektrospinning” tekniği, fiber çaplarının nano boyutta olmasında en etkili, basit ve çok yönlü bir tekniktir. Elektrospinning yöntemi ile elde edilen membranlar enerji, çevre, sanayi alanlarında önemli bir gelişme göstererek oldukça geniş kullanım yerleri edinmiştir. Bu membran teknolojileri uygulamalarındaki hedef, membran yapısı üzerinde bir çözelti karışımı halinde bulunan bazı bileşen yapıların ayrışmasına izin verilirken, bazılarının ise yakalanmasını sağlamaktır.

Membran yapıları genel olarak süzme yapabilecek şekilde seçme olayının ve taşınımın meydana geldiği yarı geçirgen zarımsı tabaka da ifade edilebilir. Arıtma ve ayırıştırma prosesi, membran yapısının hem fiziksel hem de kimyasal karakteristiklerine bağlı olmakla beraber uygulanan elektriksel potansiyel, basınç ve sıcaklık farkı gibi birçok sürücü kuvvet yardımı ile gerçekleşir. Membran yapılarında ayırma prosesi gözenek yapıya sahip membranlar için boyut, şekil ve yük ayırışımına göre kontrol edilirken gözenek olmayan membranlar için ise difüzyon ve sorpsiyon şekline göre kontrol edilmektedir. Buna ek olarak membranlarda performans özellikleri, akı ve seçicilik karakteristiklerine göre sınıflandırılır.

Elektrospinning membran üretimindeki temel hedef, yeterli seviyede mekanik kuvvet barındıran ve yüksek seçicilik kapasitesi sergileyerek süzme yapabilen bir malzeme ortaya koymaktır. Membran yapılarında geçirgenlik kavramı, yapıdaki gözenekli yoğun bölgelerin atması ile doğru orantılıdır. Böyle özellikteki membran malzemesi için Porozite terimi kullanılmaktadır. Üretilen membran malzemelerinde direnç, membran malzemesinin kalınlığıyla doğrudan bağlantılıdır. Membran malzemesinde seçici olma özelliği, yapıda bulunan yüksek çap değerine sahip gözenekli boyutların yoğunluğu ile ters orantılıdır. Sıradan özellikte bir membran malzemesi için kabul edilebilir seviyedeki fiziksel yapı, son derece küçük gözenekli boyutlu ve oldukça yüksek seviyelerde porozite değerine malzeme kalınlığı barındırmalıdır.

Açıklama:

Yapılan bu çalışma, 2019 /1-21 D proje numarası ile Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından ve 100/2000 YÖK DOKTORA araştırmacı bursu ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Acarer, S. (2020). Polimerik Nanokompozit Membran Üretimi ve Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi. Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul 10s.
- Arı, H. (2009). Türkiye’de İçme Suyu Amaçlı Büyük Kapasiteli Membran Sistemlerinin Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 24s.
- Aslan, M. (2016). Membran Teknolojileri. ISBN: 978-605-9351-02-7: Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayınları. Ankara. 69s.
- Bhardwaj N., Kundu, S. C. (2011). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances Sci.* 28(1): 325-347s. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
- Bilek, P., & Hruza, J. (2014). Influence of structure uniformity of nanofibrous filters on their homogeneity of filtration efficiency. *Nanocon*, 5, 1-10s.
- Blackmer, H. R., & Hendman, J. E. (1978). Membrane Oxygen Enricher Apparatus. USA:Patent. No:US4174955A.
- Can, A. O. (2019). Manyatik Nano Parçacık Katkılı Kompozit Membranların Eldesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi: Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi. Fen bilimleri Enstitüsü. Konya. 5s.
- Cansız, S. (2017). Karbonnanotüp Katkılı Polimerik Membranların İçmesuyu Arıtımında Kullanılması. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 24s.
- Chaharmahali, A. (2012). The Effect of TiO₂ Nanoparticles On The Surface Chemistry Structure and Fouling Performance of Polymeric Membranes. Phd Thesis: The University of New South Wales. School of Chemical Engineering.Sydney, Australia. 44.
- Chen, H., Huang, M., Liu, Y., Meng, L., & Ma, M. (2020). Functionalized electrospun nanofiber membranes for water treatment:Review, *Science of the Total Environment*, 739(2020), 139944. <https://doi.org/10.3390/ma14030558>
- Chun, I. (2005). Finer Fibers Spun By Electrospinning Process From Polymer Solutions and Polymer Melts in Air and Vacuum: Characterization of Structure and Morphology on Electrospun Fibers and Developing a New Process Model, PhD Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron.

- Cui, J., Li, F., Wang, Y., Zhang, Q., Ma, W., & Huang, C. (2020). Electrospun nanofiber membranes for wastewater treatment applications. *Separation and Purification Technology*, 250, 117116. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117116>
- Çakmakçı, M. (2012). Membran Uygulamaları Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul. 7s.
- Çakmakçı, M., Başpınar, A. B., Balaban, U., Uyak, V., Koyuncu, İ., & Kınacı, C. (2009). Comparison of Nanofiltration And Adsorption Techniques to Remove Arsenic From Drinking Water. , *Desalination*, 9(1): 149-154s. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.765>
- Çallıoğlu, F. C., Jirsak, O., & Dayık, M. (2013), Investigation into the relationships between independent and dependent parameters in roller electrospinning of polyurethane, *Textile Research Journal*, 83(7), 718-729 s. <https://doi.org/10.1177/0040517512447587>
- Çevik, N. (2006). Tekstil Boyar Maddelerinin Membran Filtre Uygulaması İle Giderimi. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bursa. 31s..
- Desai, K. (2004). Electrospinning and Phase Characterization of Polyaniline/Poly Methymethacrylate Blends, MSc Thesis, The Faculty Of The Department Of Chemical and Nuclear Engineering University Of Massachusetts Lowell ISBN978-0-496-26418-6.
- Dhaouadi, H., & Marrot, B. (2008). “Olive Mill Wastewater Treatment in a Membrane Bioreactor: Process Feasibility and Performances”. *Chemical Engineering Journal*, 145(2), 225-231s. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.04.017>
- Drioli, E., & Giorno, L. (2016). Encyclopedia of Membranes. *Springer*. 47(2): 556-567s. .
- Fane, A. T., Wang, R., & Jia, Y. (2011). Membrane Technology: Past, Present and Future. *Membrane and Desalination Technologies*.(13) 1-45s. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6_1
- Garner, B. D., & Mahler, J. (1978). Relation of Specific Conductance in Ground Water to Intersection of Flow Paths by Wells, and Associated Major Ion and Nitrate Geochemistry. Barton Springs Segment of the Edwards Aquifer, 5002: 39s. https://digitalcommons.usf.edu/kip_data/113
- Güçlü, S. (2012). İki Farklı Polimerden Simultane Olarak Elektrospinning Yöntemi ile Nanolif ve Membran Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 7s.
- Gürcan, Ş. (2016). Elektro-Eğrilmiş BNNS/PMMA Nanolif Katkılı Vinilester Reçinenin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi: Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.31s.
- Hilal, N., Al-Zoubi, H., Darwish, N. A., Mohamma, A. W., & Arabi, M. A. (2004). A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. *Desalination*, 170(3), 281-308 s. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.01.007>
- Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G., & Brenner, M. P. (2001). Electrospinning and Electrically Forced Jets. I. Stability Theory, *Physics Of Fluids*,13-8, 2201- 2220 s. <https://doi.org/10.1063/1.1383791>
- Howell, J. A., Sanchez, V., & Field, R. W. (2012). Membranes in Bioprocessing: Theory and Applications. ISBN: 9789401121569: *Springer Science & Business Media*.
- Jia, Y. T., Gong, J., Gu, X. H., Kim, H. Y., Dong, J., & Shen, X. Y. (2007). Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/chitosan blend nanowbers produced by electrospinning method. *Carbohydrate Polymers* 67, 403–409 s. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.010>
- Juang, R., & Wany, Y. Y. (2002). Amino Acid Separation with D2EHPA by Solvent Extraction and Liquid Surfactant Membranes. *Journal of Membrane Science* 207(2), 241-252 s. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00254-5](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00254-5)
- Kataphinan, W., (2004). Electrospinning and Potential Applications, PhD Thesis, The Graduate Faculty Of The University Of Akron. ISBN978-0-496-17531-4.
- Koyuncu, İ. (2013). Nanofiltration For Water And Wastewater. ISBN:9781904455660 : Horizon Press New York. 623-645 s.

- Koyuncu, İ. (2018). Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları. ISBN:978-605-9351-22-5: Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayınları. 1. Cilt. 67s.
- Kozanoğlu, G. (2006). Elektrospinleme Tekniğiyle Nanofiber Üretim Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi,: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kucera, J. (2015). Reverse Osmosis: Industrial Processes and Applications. ISBN: 9781119145769: Scrivener Publishing LLC. Canada. 144s.
- Kulkarni P. S, & Mahajani V. V. (2002). "Application of Liquid Emulsion Membrane (LEM) Process for Enrichment of Molybdenum from Aqueous Solutions". *Journal of Membrane Science*, 201, 123-135 s. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(01\)00720-7](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(01)00720-7)
- Lam, H. (2004). Electrospinning of Single Wall Carbon Nanotube Reinforced Aligned Fibrils and Yarns, PhD Thesis, The Faculty Of Drexel University.
- Li, K. (2008). Membrane Science and Membrane Separation Processes. South Kensington, (Lecture Notes). Imperial College London.
- Lyu, C., Zhao, P., Xie, J., Dong S., Liu J., Rao C., & Fu, J. (2021). Electrospinning of Nanofibrous Membrane and Its Applications in Air Filtration: A Review, *Nanomaterials*, 11, 1501. <https://doi.org/10.3390/nano11061501>.
- Marginean, I., Parvin, L., Heffernan, L., & Vertes, A. (2004). Flexing the Electrified Meniscus: The Birth of a Jet in Electrosprays, *Analytical Chemistry*, 76, 14, 4202-4207 s. <https://doi.org/10.1021/ac049817r>
- Mohan, A. (2002). Formation and characterization of electrospun nonwoven webs. Yüksek Lisans Tezi.: North Carolina State University, Textile Management Department. Raleigh.ABD. 47s. .
- Mohan, A., (2002). Formation and Characterization of Electrospun Nonwoven Webs, MSc Thesis, The Graduate Faculty of North Carolina State University.
- Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. 9780792342472: *Springer Science & Business Media*. The Netherlands. 623-647s.
- Naveed, S., Bhatti, I., & Ali, K. (2006). Membrane technology and its suitability for treatment of textile waste water in Pakistan. *Journal of Research (Science)*, 17(3), 155-164 s. ISSN 1021-1012
- Özkoç, Ü. (2010). Experimental Investigation of Optimal Spinning Parameters for Nanofibers. Yüksek Lisans Tezi: Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.Gaziantep.28s.
- Pabby, A. K. (2008). Handbook of Membrane Separations. Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological Applications. ISBN:9780429128066: CRC Press. Boca Raton. 667s.
- Ramakrishna S. (2005). An Introduction to Electrospinning And Nanofibers. ISBN: 9789812564153: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore, 381 s.
- Babu B. R., Parande, A.K., Raghu S., & Prem Kumar T. P. (2007). Cotton Textile Processing: Waste Generation and Effluent Treatment. *The Journal of Cotton Science*, 11(1). 141-153 s. ISSN : 1524-3303
- Ramesh, R. (2014). Fermentation And Biochemical Engineering Handbook: Principles, . ISSN: 9781455730469: Noyes/William Andrew Publication. 3.Cilt. USA. 271-279 s.
- Rangkupan, R. (2002). Electrospinning Process of Polymer Melts, PhD Thesis, The Graduate Faculty Of The University Of Akron.
- Reneker, D. H., Yarin, A. L., Koombhongse, S., & Fong, H. (2000). Bending instability of electrical charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning., *Journal of Applied Physics*, 87-9 ,4531-4547 s. <https://doi.org/10.1063/1.373532>
- Sanders E. H. (2005). Electrostatic Processing of Polymers and Polymer Composites, PhD Thesis, Virginia Commonwealth University.
- Schoeman, J., & Steyn, A. (2003). Nitrate Removal with Reverse Osmosis in a Rural Area in South Africa. *Desalination*, 155: 15-26 s. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00235-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00235-2)

- Sert, G. (2015). Membran Biyoreaktör (MBR) Prosesi ile Arıtılan Endüstriyel Atık Suların Yeniden Kullanımı İçin Membran Teknolojilerin Uygulanması. Doktora Tezi: Ege Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir. 22s.
- Sevimli, E. (2011). Elektrosinleme Yöntemiyle Alümina Destekli Nikel Borosilikat Nanofiberlerin Üretimi. Yüksek Lisans Tezi: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 37s.
- Sirin, Ş., Çetiner S., & Saraç A.S. (2013). Elektro Çekim Yoluyla Polimer Nanolifler: Nanolif Kalitesini Etkileyen Faktörler, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 1-12.
- Sutherland, K. (2008). *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier. Oxford. p. 523. ISBN 978-1-8561-7464-0
- Üstündağ, G. (2009). Elektrosinleme Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi Ve Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi: Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 1 (14) :159-172s.
- Verweij, H. (2012). *Inorganic Membranes*. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 1(2):156-162s.
- Wagner, J. (2001). *Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints*. ISBN: 9785462579: Chem. Eng Second Edition.USA. 244s.
- Yalçın, H. (2014). Santrifüj Eğirme Sistemi ile Üretilen Liflerle Yapılan Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 20s.
- Yarin, A.L., Koombhongse, S., & Reneker, D. H. (2001). Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers , *Journal of Applied Physics*, 90-9, 4837-4846 s. <https://doi.org/10.1063/1.1408260>
- Yener, F. (2010). Klasik ve İğnesiz Elektrosinleme Yöntemleriyle Elde Edilen Nano Liflerin Kıyaslanması ve Bu Yöntemlerdeki Sistem Parametrelerinin Lif Üzerindeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi: Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. , Kahramanmaraş.
- Yuan, L. M., Zhang, C. Y., Zhang, Y. Q., Ding, Y., & Xi, D. L. (2007). “Biological Nutrient Removal using an Alternating of Anoxic and Anaerobic Membrane Bioreactor (AAAM) Process”. *Desalination*, 221(1-3), 566-575, 2008 s. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.118>
- Zaidi, A., Simms, K. & Kok, S. (1992). The use of micro/ultrafiltration for the removal of oil and suspended solids from oilfield brines. *Water Science and Technology*, 25(10), 163-176 s. <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0245>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.03.2022
Kabul Tarihi : 14.07.2022

Received Date : 23.03.2022
Accepted Date : 14.07.2022

FARKLI RENK KARABİBER ESANSİYEL YAĞLARIN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ: ÖN İŞLEM MİKRODALGA UYGULAMASININ ETKİSİ

CHARACTERISTICS OF DIFFERENT COLORED BLACK PEPPER ESSENTIAL OILS: EFFECT OF PRETREATMENT MICROWAVE TREATMENT

Tuğba DEDEBAŞ¹ (ORCID: 0000-0003-1663-0165)

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksekokulu Gıda Teknolojisi Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tuğba DEDEBAŞ, tugbadedebas@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, siyah ve yeşil renkli karabiber tohumlarından uçucu yağların ekstraksiyonunda mikrodalga ekstraksiyonu ile hidrodistilasyon yöntemi birlikte uygulanmış ve mikrodalga enerjisinin uçucu yağ verimi ve uçucu yağların biyoaktif bileşimi üzerine etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla hidrodistilasyon işlemi öncesi siyah ve yeşil renkli karabiber çeşitlerine 350 ve 500 W'lık farklı mikrodalga gücü uygulanmıştır. Mikrodalga gücünün siyah ve yeşil renkli karabiber uçucu yağ oranı ve bileşenleri üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen karabiber yağlarının verimi 350 W'da sırasıyla %1,63 ve %2,56 olarak bulunurken 500W'da %2,59 ve %3,32 olduğu ve mikrodalga gücü arttıkça verimde artış olduğu tespit edilmiştir. Esansiyel yağların uçucu bileşenlerinin tanımlanması amacıyla gaz kromatografisi kütle spektrometresi (GC-MS) kullanılmıştır. Siyah ve yeşil renkli karabiber yağında baskın bileşenler trans-karyofilen, delta-3-karen, d- limonen, α - fellandren, β -pinen, α -pinen, α -kopaen, elemen, mirsen, α -karyofilen, α -humulen ve karyofilen oksit olarak tespit edilmiştir. Uygulanan mikrodalga gücü 350 W'dan 500 W çıkarıldığında monoterpen miktarında artış meydana gelirken seskiterpen miktarında azalma olduğu belirlenmiştir. Tüm bu bulgular değerlendirildiğinde, yenilikçi bir teknoloji olan mikrodalga tekniğinin ekstraksiyon sürecini hızlandırabilmesi ve artan yağ verimleri gibi olumlu sonuçları nedeniyle uçucu yağların eldesinde hidrodistilasyon öncesinde kullanım için uygun ve etkili bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Piper nigrum* L., mikrodalga gücü, GC-MS, esansiyel yağ

ABSTRACT

In the present study, microwave extraction was implemented together with hidrodistillation method in extracting volatile oil from pepper seeds and the effect of microwave energy on volatile oil yield and bioactive composition of volatile oils was determined. Pepper seeds were subjected to 350 and 500W microwave energies before the hidrodistillation. It was found that microwave energy has significant effects on the volatile oil ratio and composition of black and green peppers. The yields of black and green peppers obtained at 350 W were found to be 1.63% and 2.56%, respectively, whereas they were found to be 2.59% and 3.32% at 500W; it was revealed that yield increased with increasing microwave energy. The dominant volatile components of oils were determined to trans-caryophyllene, delta-3-carene, d- limonene, phellandrene, β -pinene, α -pinene, α -copaen, elemene, myrcene, α -caryophyllene and α -humulene by using GC-MS. When increasing the microwave energy from 350 to 500W, the monoterpene content increased but sesquiterpene content decreased. Given all these findings, since microwave method that is an innovative technology offer various advantages such as accelerating the extraction process and increasing the oil yield, it is thought to be a suitable and effective method to be used before the hidrodistillation while producing volatile oils.

Keywords: *Piper nigrum* L., microwave , GC-MS, essential oil, hidrodistillation

ToCite: DEDEBAŞ, T., (2022). FARKLI RENK KARABİBER ESANSİYEL YAĞLARIN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ: ÖN İŞLEM MİKRODALGA UYGULAMASININ ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 212-221.

GİRİŞ

Baharatlar, yiyecek ve içeceklere farklı tat, koku ve aroma kazandırmalarının yanı sıra tıbbi ve farmakolojik özelliklere de sahip olduğu bilinmektedir (Md. Abukawsar vd., 2018). Dünyada yaygın ve önemli bir baharat olan karabiber (*Piper nigrum* L.), Piper cinsine aittir ve özellikle Güney Hindistan, Malezya, Brezilya ve Endonezya gibi tropikal ve subtropikal bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilmektedir (Jelen ve Gracka, 2015; Alagawany vd., 2020; Bastos vd., 2020). Karabiber tohumlarının hasat edildikleri olgunluk düzeyine ve meyvelerin işleme yöntemine göre yeşil, siyah, kırmızı ve beyaz olarak dört farklı çeşidi bulunmaktadır (Liu vd., 2018; Md. Abukawsar vd., 2018; Favre vd., 2020). Karabiber, olgunlaşmamış yeşil meyvelerin buruşuk bir kabuk oluşana kadar kurutulmasıyla üretilirken olgun meyvelerden posanın ayrılmasıyla acılık düzeyi diğer çeşitlere göre daha az olan ‘beyaz biber’ elde edilmektedir. Yeşil biber ise ham meyvelerin, kimyasal yollarla enzimlerinin durdurularak, kurutulması sonucunda üretilen ve kendine özgü bir meyve aromasına sahip tohumlardır. (Perakis, Louli ve Magoulas 2005; Agbor vd., 2006; Baser 2018; Favre vd. 2020; Zhang vd., 2021).

Karabiber meyvelerinde %1,0-2.5 oranında uçucu yağ ve %5-9 oranında karabiberin keskin aromasından sorumlu alkaloid bileşikler bulunmaktadır; bunlar arasında piperin, chavisin, piperidin ve piperetin başlıca biyoaktif bileşiklerdir (Wang vd., 2018; Prabhu vd., 2015; Rakmai vd., 2017). Karabiber tohumlarından farklı yöntemlerle elde edilen karabiber yağında ayrıca; α - ve β -pinen, sabinen, mirsen, para-simen, β -seskifellandren, α -fellandren, dihidrokarvon, β -karyofilen, karyofilen oksit, limonen ve delta-3-karen gibi terpenoidler, fenoller, alifatik ve aromatik ester bileşenleri bulunmaktadır ve ana bileşeni β -karyofilen’dir. Karabiber yağının yapısında bulunan uçucu bileşenler antibakteriyel, antifungal, antioksidan ve antimikrobiyal aktivitelere sahip olduğundan dolayı karabiber yağı gıda, kozmetik ve farmakoloji gibi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Liu vd., 2018; Tran vd., 2019. Dima vd., 2014; Gasparetto vd., 2017; Amalraj vd., 2021).

Bitkisel dokulardan uçucu yağların ekstraksiyonunda buharla damıtma, hidrodistilasyon, presleme, vakum distilasyonu ve çözücü ekstraksiyonu gibi geleneksel yöntemler kullanılmaktadır (Bakkali vd., 2008). Fakat geleneksel yöntemler düşük ekstraksiyon verimi ve uzun işlem süresi gerekliliği gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle son yıllarda süperkritik akışkan ekstraksiyonu, yüksek basınç çözücü ekstraksiyonu, mikrodalga destekli ekstraksiyon ve ultrasonik destekli ekstraksiyon gibi gelişmekte olan yenilikçi yöntemler hızlı, ekstraksiyon süresi daha kısa, daha az solvent ve enerji gerektiren, güvenli ve “yeşil ve çevre dostu” oldukları için tercih edilmektedir. (Martinelli vd., 2017; Dursun Çapar vd., 2021). Bu yöntemler arasından, mikrodalga destekli ekstraksiyon yöntemi, mikrodalga enerjisi yardımıyla ekstraksiyon sağlayarak çözücü etkinliğini ve ekstraksiyon verimini arttırdığı için en çok uygulanan yöntemlerinden birisidir (Dursun Çapar vd., 2021). Mikrodalga destekli ekstraksiyon yönteminde bitki hücresi içindeki su gibi polar moleküller iyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik dalgalar yardımıyla buharlaştırılarak bitki hücre duvarlarında bir basınç oluşturmaktadır. Bu durum sonucunda hücre duvarı zarar görmesi nedeniyle hedeflenen bileşiklerin adsorpsiyonu ve desorpsiyonu sağlanarak ekstraksiyon verim süreci hızlandırılmaktadır (Dursun Çapar vd., 2021; Daud vd., 2022). Bu nedenle, bu çalışmada, siyah ve yeşil renkli karabiber tohumlarından uçucu yağların ekstraksiyonunda mikrodalga ekstraksiyonu ile hidrodistilasyon yöntemi uygulanmış ve uçucu yağ verimi üzerine mikrodalga gücünün etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda ekstrakte edilen yeşil ve siyah renkli karabiber yağların biyoaktif bileşikleri üzerine mikrodalga enerjisinin etkisi gaz GC-MS yöntemiyle belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Siyah ve yeşil renkli karabiberlerin (*P. nigrum*) taze ve sağlıklı meyveleri Kayseri’deki yerel bir aktardan satın alınmıştır (Şekil 1.) Meyveler laboratuvar öğütücüsü (IKA A10 laboratuvar öğütücüsü, Almanya) ile öğütülmüş ve kullanımdan önce karanlıkta oda sıcaklığında saklanmıştır.



Şekil 1. Siyah ve Yeşil Renkli Karabiber Tohumları

Karabiber Çeşitlerinden Esansiyel Yağ Üretimi

Yeşil ve siyah renkli karabiber uçucu yağlarının eldesin de ön ekstraksiyon işlemi olarak sıcaklığı 10°C'nin altında tutmayı sağlayan sıcaklık sensörü ile donatılmış bir mikrodalga ekstraksiyon sistemi (Mars 6 Extraction, CEM, ABD) kullanılmıştır. Öğütülmüş tohumlar ve çözücü 35 mL'lik bir mikrodalga kabına yerleştirilerek 350 ve 500W gücünde mikrodalga enerjisi (mikrodalga sadece ısıtma içindi) uygulanarak clevenger düzeneğine iletilmiştir. Mikrodalga uygulanmış örnekler clevenger düzeneğinin cam ekstraksiyon haznesine konularak 1:10 (w/w) oranında su ilave edilip 6 saat süreyle damıtma ile esansiyel yağ elde edilmiştir. Ekstrakte edilen karabiber uçucu yağları kahverengi şişelere konularak analiz edilinceye kadar -80 °C'de saklanmıştır. Denklem 1, Yeşil biber ve karabiber uçucu yağlarının veriminin hesaplanmasını göstermektedir (Dinh vd., 2020).

Yeşil ve karabiber uçucu yağlarının verimleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\text{Verim (V)\%} = \frac{\text{We (Ekstrakte edilen yağın ağırlığı)}}{\text{Öğütülen tohumların kuru ağırlığı}} \times 100 \quad (1)$$

Uçucu Bileşenlerin Belirlenmesi

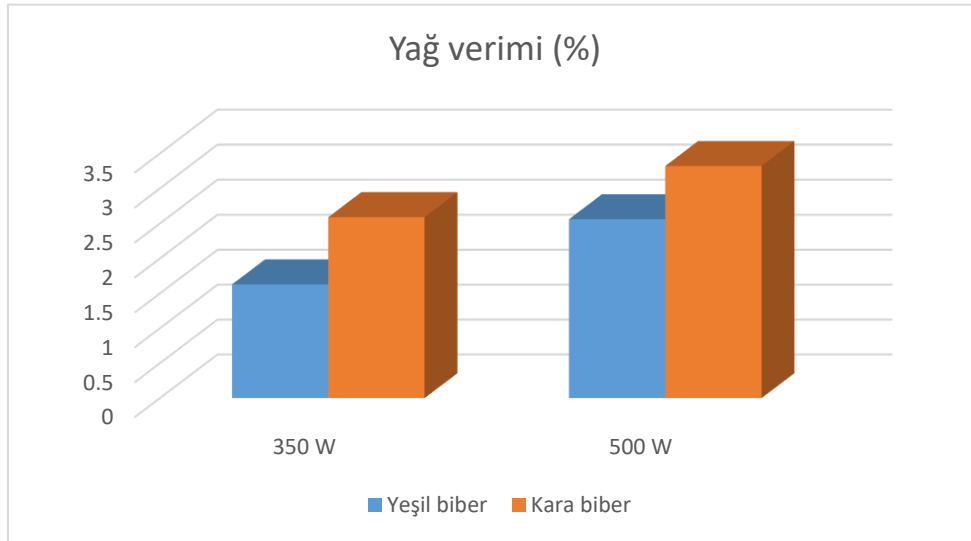
Yeşil ve siyah renkli karabiber yağı numunelerinde uçucu bileşenlerin miktar analizi Triplus HS Autosampler, Thermo Scientific Trace 1300 GC, Thermo Scientific- ISQ7000 single Quadrupole Mass Spectrometer (Thermo Fisher Scientific Inc. Waltham, Massachusetts, USA) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yönteme göre, homojenize edilmiş minimum 1 g numune üzerine 10 mL n-hekzan eklenip karıştırılarak autosampler ile GC-MS cihazına enjekte edilmiştir. Kromatografik ayırım için analitik kolon olarak Trace GOLD TG-624SilMS GC (Thermo Fisher Scientific Inc. Waltham, Massachusetts, USA, UHPLC kolonu, 30 m x 0.25 mm x 1.4 µm) kullanılmıştır. Helyum taşıyıcı gazın akış hızı 1.5 mL/dakika ve enjeksiyon sıcaklığı 180 °C olarak belirlenmiştir. Cihazın fırın sıcaklık programı 35°C' de 2 dakika bekledikten sonra 220°C' ye dakikada 5°C' lik artışla ve 220°C' de 1 dakika bekleme şeklinde ayarlanmıştır. Cihazın dedektör sıcaklığı 280°C olarak ayarlanmıştır. İyonlaşma enerjisi 70 eV' dur. Kromatografik değerlendirmeler Xcalibur yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bileşikler, Willey 1n.1 ve NIST 0.5 (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) veri tabanında bildirilen Satürn spektrumlarına dayalı olarak karşılaştırma yoluyla tanımlanmıştır. Tanımlanan her bileşik için ana, moleküler ve niteleyici iyonlar seçilmiştir (Wang vd., 2018).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Ekstraksiyon Verimi

Tohum ve bitkisel dokulardan yağın elde edilmesinde yağ verimi en önemli parametrelerden bir tanesidir. Siyah ve yeşil renkli karabiber tohumlarından hidrodistilasyon yöntemiyle uçucu yağların elde edilmesinde ısıtma ve kısmi ekstraksiyon amaçlı farklı oranlarda (350 ve 500 W) mikrodalga güçleri uygulanmış ve farklı renkteki karabiber uçucu yağlarının verimi üzerine mikrodalga gücünün etkisi belirlenmiştir. Mikrodalga hidrodistilasyon gücü ile ekstraksiyon yönteminde mikrodalğanın ekstraksiyon materyali ile etkileşimi nedeniyle verimliliği etkileyen önemli bir unsurdur (Mande ve Sekar, 2021). Yapılan çalışma sonucunda yeşil renkli karabiber uçucu yağının verimi uygulanan mikrodalga gücü 350 W'dan 500 W'a yükseltildiğinde %1,63'den %2,59'a; siyah renkli karabiber uçucu yağında ise %2,56'dan %3,32'ye çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 2). Benzer şekilde Mande ve Sekar (2021) tarafından

yapılan bir çalışma da mikrodalga destekli hidrodistilasyon yöntemiyle yağ ekstraksiyon yönteminde uygulanan mikrodalga gücünün 160'tan 800 W'a yükselttiğimizde çıkarılan uçucu yağın ekstraksiyon yüzdesinde mikrodalga enerjisinin absorpsiyonu ile numune arasında daha yüksek ısı oluşumuna neden olduğundan yağ veriminde %2.1'den %3.3'e bir artış olduğunu belirtilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada ise agarwood bitkisinden yağ eldesinde 300, 450 ve 600 W'lık mikrodalga gücünün uygulanması sonucunda 300 ve 450 W'lık mikrodalga güçlerinde mikrodalga gücünün yağ bezlerine zarar vermeyecek kadar küçük olmasından dolayı 600 W'lık güce göre daha az bir verim elde edildiği bildirilmiştir (Kusuma vd., 2019). Wang vd. (2018) yapmış olduğu çalışmada; beyaz ve siyah renkli karabiber uçucu yağlarının verimleri, ultrason ve mikrodalga enerjisinin birlikte uygulandığı mikrodalga destekli çözücüsüz yapılan ekstraksiyon yönteminde yağ veriminin arttığı tespit edilmiştir. Amarni ve Kadi (2010) tarafından yapılan çalışmada zeytin küspesinden yağın eldesinde mikrodalga gücünün artmasıyla sıcaklığın yükseldiği böylece ekstraksiyon veriminin arttığı bildirilmiştir. Panjaitan vd. (2021) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, 300 W–400 W mikrodalga güç aralığında yağa uygulanan yüksek mikrodalga gücünde yüksek bir verim elde edilirken sıcaklığın artması sonucunda ise ekstraksiyon veriminde önemli bir düşüşe neden olduğunu belirtilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, mikrodalga ısıtma ve hidrodistilasyon ekstraksiyon yöntemi birlikte uygulandığında karabiber tohumlarının doku hücrelerinde bulunan suyun mikrodalga enerjisiyle ani ısınması sonucunda dokularda bulunan uçucu yağ hızlı ve tamamen ekstrakte edildiği için uçucu yağ veriminde önemli bir artışın olduğu belirlenmiştir (Wang vd., 2009; Elyemni vd., 2021). Ayrıca yağ ekstraksiyonu öncesi ısıtma amacıyla uygulanan mikrodalga işlemi, yağın kütle transferinin yoğunlaşmasına, mükemmel termal etki ile hücre yapısının bozularak ekstraksiyon sürecini hızlandırılmasına ve yüksek bir mikrodalga gücünün etkisiyle damıtma sıcaklığında meydana gelen sıcaklığın etkisiyle yağ veriminin artması gibi olumlu sonuçlar oluşturmaktadır (Chen vd., 2010; Chen vd., 2016; Wang vd., 2018; Boudraa vd., 2021).



Şekil 2. 350 ve 500 W Mikrodalga Gücünde Uçucu Yağ Verimleri

Uçucu Yağ Bileşenleri

Farklı mikrodalga gücü uygulanarak hidrodistilasyon yöntemiyle siyah ve yeşil renkli karabiber tohumlarından elde edilen uçucu yağların kimyasal bileşim profilleri GC–MS yöntemiyle belirlenmiştir ve yağların uçucu bileşen miktarları % konsantrasyon olarak Tablo 1 ve 2 'de gösterilmiştir. Elde edilen yeşil renkli ve siyah renkli karabiber yağlarında >% 0,1 alan konsantrasyonuna sahip monoterpenler ve seskiterpenlerden oluşan toplam 37 bileşene sahip olduğu belirlenmiştir ve uçucu yağların sırasıyla %99'unu temsil etmektedir. Hem yeşil hem de siyah renkli karabiber yağının majör uçucu bileşeni trans-karyofilenidir. Bununla birlikte karabiber yağında trans-karyofilenin yanısıra delta-3-karen, d- limonen, α - fellandren, β -pinen, α -pinen, α -kopaen, elemen, mirsen, α -karyofilen, α -humulen ve karyofilen oxide olmak üzere 11 ana bileşen belirlenmiştir. Md. Abukawsar vd., (2018), Wang vd., (2018) ve Chandran vd., (2017) tarafından yapılan çalışmalarda karabiber uçucu yağının kimyasal bileşiminin elde ettiğimiz sonuçlar ile benzer nitelikte sahip olduğu belirlenirken trans- karyofilen içeriğinin (sırasıyla %18.39; %13.0 ve %15.65) farklı olduğu tespit edilmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlar ile yapılan çalışmalar arasındaki bu farklılığın, tanımlanan örneklerin kökenine, iklimine, kültür ve ekstraksiyon tipine bağlı olduğu düşünülmektedir (García-Díez vd., 2016; Chandran vd., 2017; Orchard vd., 2017).

Farklı oranlarda (350W ve 500W) mikrodalga gücü uygulanarak elde edilen siyah renkli karabiber uçucu yağının Delta-3-karen (21,51 >17,14), limonen (%15,59 > %13,12), β -pinen (%8,52 > %7,50), ve α -pinen (%3,90 > %3,66) gibi monoterpenleri yeşil renkli karabiber uçucu yağına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan ise yeşil renkli karabiber uçucu yağında ise daha yüksek miktarlarda seskiterpen (trans-karyofilen, α -elemen, α -humulene ve α -kopaen) belirlenmiştir. Bununla birlikte her iki yağ örneğinde de uygulanan mikrodalga gücü 350 W`dan 500 W çıkarıldığında monoterpen miktarında artış meydana gelirken seskiterpen miktarında azalma olduğu belirlenmiştir (Tablo 1,2). Wang vd. (2018) tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise beyaz ve siyah renkli karabiber tohumlarından uçucu yağ eldesinde ultrason ve mikrodalga enerjisinin birlikte uygulandığı ultrason-mikrodalga destekli ekstraksiyon yönteminde genel olarak elde edilen karabiber yağlarında limonen dışında monoterpen ve seskiterpen içeriklerinin diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Wang vd., 2018). Yapılan diğer bir çalışmada mikrodalga destekli hidrodistilasyon yöntemiyle *O. vulgare* L. spp. *hirtum* bitkisinden farklı mikrodalga gücü uygulanarak elde edilen uçucu yağ örneklerde mikrodalga gücü arttıkça hidrokarbon monoterpenlerin termal parçalanma ürünleri olan oksijenli monoterpen içeriğinde artış olduğu belirlenmiştir (Drinić vd., 2020). Bunun nedeni mikrodalga uygulamasının bazı terpenlerin yapısında bulunan çift bağların pozisyon konfigürasyonunda değişikliklere neden olduğundan dolayı mikrodalga gücü arttıkça seskiterpen miktarlarında bir azalma meydana geldiği düşünülmektedir (Plessi vd., 2002). Bununla birlikte mikrodalga radyasyonu, oksijen içeren polar moleküllerin yağdan kolayca ayrılmasını sağlamaktadır (Tran vd., 2018).

SONUÇ

Çalışmada farklı mikrodalga gücü uygulanarak mikrodalga destekli hidrodistilasyon yöntemi ile elde edilen siyah ve yeşil renkli karabiber esansiyel yağlarının karakteristik bazı özellikleri ve mikrodalga gücünün yağ verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda, hem siyah hem de yeşil renkli karabiberlerden elde edilen uçucu yağların verimleri mikrodalga gücünün 350W`dan 500 W`a yükseltilmesi ile bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Ön işlem olarak uygulanan mikrodalga işlemi sonucunda yeşil ve siyah renkli karabiber yağında bulunan uçucu aroma bileşenlerinden monoterpenlerin miktarında mikrodalga gücünün yükseltilmesiyle birlikte % konsantrasyonunda artış meydana gelirken seskiterpen miktarında ise özellikle karabiber uçucu yağlarının baskın bileşeni olan trans karyofilenin miktarında düşüş olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında son yıllarda çevre dostu yenilikçi bir teknoloji olan mikrodalga tekniği ekstraksiyon sürecini hızlandırabilmesi ve artan yağ verimleri gibi olumlu sonuçlar oluşturması nedeniyle uçucu yağların eldesinde hidrodistilasyon öncesinde ısıtma amaçlı kullanım için uygun ve etkili bir yöntemdir. Bununla birlikte uygulanan mikrodalga işlemi sonrası yağ numuneleri iyi bir kaliteye sahiptir. Bu nedenle mikrodalga işlemi diğer bitki materyallerinin ekstraksiyonu için uygulanabilir bir yöntemdir. Bu aşamadan sonra uçucu yağların bitkisel dokularda az miktarda bulunması nedeniyle mikrodalga enerjisi ile hidrodistilasyon yöntemi birlikte kullanılarak ısı etkisiyle uçucu bileşenlerin zarar görmesi engellenebilir. Öte yandan yüksek dalga boyunda mikrodalga enerjisi yağlarda ısınmaya neden olduğu için bu konu geliştirilerek endüstriyel alanda kullanılabilir.

Tablo 1. Farklı Mikrodalga Gücü Kullanılarak Elde Edilen Siyah Renkli Esansiyel Yağında Bulunan Uçucu Bileşenler

Tespit edilen bileşenler	Konsantrasyon (%)	
	350 W	500 W
α -Thujen	0.03	0.04
α -Pinen	3.90	4.74
β -Pinen	8.52	9.85
α -Mirsen	1.43	1.49
I-Fellandren	2.12	2.31
Delta-3-Carene	21.51	22.07
o-Simen	0.78	0.75
dI-Limonen	15.59	16.25
ζ -Terpinen	0.15	0.14
α -Terpinolen	0.71	0.72
α -Linalol	0.36	0.37
p-Mentha-1,5-dien-8-ol	0.09	0.10
4-Terpineol	0.13	0.16
α -Fenchyl alcohol	0.11	0.14
Sabinol	0.11	0.12
n-Dodecane	0.08	0.16
Piperitone	0.03	0.04
n-Tetradecane	0.07	0.12
α -Elemen	2.93	2.53
α -Kububen	0.11	0.09
α -Kopaen	2.16	1.84
Germacrene-D	0.12	0.09
α -Gurjunene	0.06	0.08
trans-Karyofilen	31.81	28.76
α -Humulene	1.52	1.36
α -Selinene	0.86	0.91
α -Bisabolene	0.19	0.20
α -Kadinen	1.06	1.03
Karyofilen oksit	1.10	1.07
Isospathulenol	0.13	0.13
n-Hexadecane	0.08	0.13
Spathulenol	1.02	0.88
n-Heptadecane	0.08	0.22
n-Nonadecane	0.03	0.12
n-Docosane	0.09	0.10
n-Heptacosane	0.12	0.06
Diğer Bileşikler	0.81	0.84
Toplam		100

Tablo 2. Farklı Mikrodalga Gücü Kullanılarak Elde Edilen Yeşil Renkli Esansiyel Yağında Bulunan Uçucu Bileşenler

Tespit edilen bileşenler	Konsantrasyon (%)	
	350 W	500 W
α -Thujen	0.02	0.02
α -Pinen	3.66	4.03
β -Pinen	7.50	8.16
α -Mirsen	1.33	1.36
I-Fellandren	2.33	2.40
Delta-3-Carene	17.14	17.29
o-Simen	0.34	0.36
dI-Limonen	13.12	13.55
ζ -Terpinen	0.12	0.12
α -Terpinolen	0.69	0.68
α -Linalol	0.27	0.33
p-Mentha-1,5-dien-8-ol	0.04	0.03
4-Terpineol	0.06	0.06
α -Fenchyl alcohol	0.09	0.05
Sabinol	0.04	0.03
n-Dodecane	0.08	0.07
Piperitone	0.03	0.03
n-Tetradecane	0.05	0.04
α -Elemen	4.69	4.42
α -Kububen	0.09	0.09
α -Kopaen	1.81	1.81
Germacrene-D	0.12	0.13
α -Gurjunene	0.05	0.05
trans-Karyofilen	39.90	38.23
α -Humulene	1.90	1.81
α -Selinene	0.57	0.59
α -Bisabolene	0.09	0.10
α -Kadinen	1.04	0.91
Karyofilen oksit	1.06	0.96
Isospathulenol	0.14	0.16
n-Hexadecane	0.06	0.07
Spathulenol	0.65	0.77
n-Heptadecane	0.08	0.09
n-Nonadecane	0.04	0.04
n-Docosane	0.06	0.05
n-Heptacosane	0.03	0.04
Diğer Bileşikler	0.91	0.89
Toplam		100

KAYNAKLAR

- Alagawany, M., Salah, A.S., Mahmoud, M.A. & Reda, F.M. (2020). Dietary cold-pressed red and black pepper oil mixture enhances growth, carcass, blood chemistry, antioxidant, immunity and caecal pathogens of quails. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 104, 1712–1718.
- Agbor, G.A., Vinson, J.A., Oben, J.E. & Ngogang, J.Y. (2010). Comparative analysis of the in vitro antioxidant activity of white and black pepper. *Nutrition Research*, 26(12):659-663. 10.1016/j.nutres.2006.09.019.
- Amalraj, A., Raj, K.K.J., Haponiuk, J.T., Sabu Thomas, S. & Gopi, S. (2020). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of chitosan/gum arabic/polyethylene glycol composite films incorporated with black pepper essential oil and ginger essential oil as potential packaging and wound dressing materials. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3, 485–497.

- Amarni, F. & Kadi H. (2010). Kinetics study of microwave-assisted solvent extraction of oil from olive cake using hexane Comparison with the conventional extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11 (2), 322–327. <http://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.002>.
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D. & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils- A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46 (2), 446-475. <http://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106>.
- Baser, K.H.C. (2019). Bb 78 karabiber. <https://www.researchgate.net/publication/331398810>.
- Bastos, L.P.H., Vicente, J., dos Santos, C.H.C., de Carvalho, M.G. & Garcia-Rojas, E.E. (2020). Encapsulation of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil with gelatin and sodium alginate by complex coacervation. *Food Hydrocolloids*, 102, 105605.
- Boudraa H., Kadri N., Mouni L. & Madani K. (2021) Microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from fennel seeds: Optimization using Plackett–Burman design and response surface methodology. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 23,100307.
- Chandran, J., Nayana, N., Roshini, N. & Nisha, P. (2017). Oxidative stability, thermal stability and acceptability of coconut oil flavored with essential oils from black pepper and ginger. *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 144-152.
- Chen, F., Zhang, X., Zhang, Q., Du, X., Yang, L., Zu, Y. & Yang, F. (2016). Simultaneous synergistic microwave–ultrasonic extraction and hydrolysis for preparation of trans-resveratrol in tree peony seed oil-extracted residues using imidazolium-based ionic liquid. *Industrial Crops and Products*, 94, 266-280.
- Chen, Y., Gu, X., Huang, S-Q., Li, J., Wang, X. & Tang, J. (2010). Optimization of ultrasonic/microwave assisted extraction (UMAE) of polysaccharides from *Inonotus obliquus* and evaluation of its anti-tumor activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 46, 429–435.
- Daud, N.M., Putra, N.R., Jamaludin, R., Md Norodin, N.S., Sarkawi, N.S., Hamzah, M.H.S., Nasir, H.M., Zaidel, D.N.A. & Yunus, M.A.C. (2022). Valorisation of plant seed as natural bioactive compounds by various extraction methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.010>.
- Dima, C., Cotarlet, M., Tiberius, B., Bahrim, G., Alexe, P. & Dima, S. (2014). Encapsulation of coriander essential oil in beta-cyclodextrin: Antioxidant and antimicrobial properties evaluation. *Romanian Biotechnological Letters*, 19, 9128-9140.
- Dinh, P.N., Cam, H.D.T. & Quoc, T.P. (2020). Comparison of essential oil extracted from black pepper by using various distillation methods in laboratory scale. *Materials Science and Engineering*, 991, 012050 doi:10.1088/1757-899X/991/1/012050
- Drinić, Z., Pljevljakusić, D., Zivković, J., Bigović, D. & Šavikin, K. (2020). Microwave-assisted extraction of *O. vulgare* L. spp. *hirtum* essential oil: Comparison with conventional hydro-distillation. *Food and Bioprocess Technology*, 120, 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.011>.
- Dursun Capar T., Dedebaş, T., Yalçın, H. & Ekici, L. (2021). Extraction method affects seed oil yield, composition, and antioxidant properties of European cranberrybush (*Viburnum opulus*). *Industrial Crops and Products*, 168, 113632. Doi:10.1016/j.indcrop.2021.
- Elyemni M., Louaste B., El Ouadrhiri F., Bouia, A. & Eloutassi N. (2021). Application of response surface methodology to optimize the extraction of essential oil from *Rosmarinus officinalis* using microwave-assisted hydrodistillation. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 11(01), 129-136. Doi: 10.7324/JAPS.2021.110115.
- Favre, L.C., Rolandelli, G., Mshicileli, N., Vhangani, L.N., Ferreira, C dos S., Wyk, J. & Buera M del P. (2020). Antioxidant and anti-glycation potential of green pepper (*Piper nigrum*): Optimization of β -cyclodextrin-based extraction by response surface methodology. *Food Chemistry*, 316, 126280.
- García-Díez, J., Alheiro, J., A.L. Pinto, A.L., Soares, L., V.Falco, V., Fraqueza, M.C. & Patarata, L. (2016). Behaviour of food-borne pathogens on dry cured sausage manufactured with herbs and spices essential oils and their sensorial acceptability. *Food Control*, 59, 262-270.
- Gasparetto, A., Cruz, A.B., Wagner, T.M., Bonomini, T.J., Correa, R. & Malheiros, A. (2017). Seasonal variation in the chemical composition, antimicrobial and mutagenic potential of essential oils from *Piper cernuum*. *Industrial Crops & Products*, 95, 256–263.

- Hussain, A., Naz, S., Nazir, H. & Shinwari, Z. K. (2011). Tissue culture of black pepper (*Piper nigrum* L.) in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 43, 1069-1078.
- Jelen, H.H. & Gracka, A. (2015). Analysis of black pepper volatiles by solid phase microextraction–gas chromatography: A comparison of terpenes profiles with hydrodistillation. *Journal of Chromatography A*, 1418, 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.09.065>.
- Kusuma H.S., Putri D.K. Y., Triesty I. & Mahfud, M. (2019). Comparison of microwave hydrodistillation and solvent-free microwave extraction for extraction of agarwood oil. *Chiang Mai Journal of Science*, 46(4), 741-755
- Liu, H., Zheng, J., Liu, P. & Zeng, F. (2018). Pulverizing processes affect the chemical quality and thermal property of black, white, and green pepper (*Piper nigrum* L.). *Journal of Food Science Technology*, 55 (6), 2130-2142. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3128-8>.
- Martinelli, L., Rosa, J.M., Ferreira, C.dos S.B., da Luz Nascimento, G.M., Freitas, M.S., Pizato, L.C., Santos, W. de O., Pires, R.F., Okura, M.H., Malpass, G.R.P. & Granato, A.C. (2017). Antimicrobial activity and chemical constituents of essential oils and oleoresins extracted from eight pepper species. *Ciência Rural*, 47 (5), e20160899. [10.1590/0103-8478cr20160899](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160899).
- Mande, P. & Sekar, N. (2021). Comparative study of chemical composition, antibacterial and antioxidant activity of essential oils isolated from the seeds of *Amomum subulatum* by using microwave extraction and hydro-distillation methods. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98, 100201. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100201>.
- Md. Abukawsar, M., Saleh-e-In, M.M., Ahsan, M.A., Rahim, M.M., Bhuiyan, M.N.H., Roy, S.K., Ghosh, A. & Naher, S. (2018). Chemical, pharmacological and nutritional quality assessment of black pepper (*Piper nigrum* L.) seed cultivars. *Food Biochemistry*, 42, e12590.
- Orchard, A., Sandasi, M., Kamatou, G., Viljoen, A. & Vuuren, S. (2017). The in vitro antimicrobial activity and chemometric modelling of 59 commercial essential oils against pathogens of dermatological relevance. *Chemistry & Biodiversity*, 14 (1), e1600218.
- Panjaitan, R., Mahfud, M., Cahyati, E. & Pujaningtyas, L. (2021). The study of parameters of essential oil extraction from black pepper seed using microwave hydrodistillation by modeling. *Earth and Environmental Science*, 749, 012032. [doi:10.1088/1755-1315/749/1/012032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012032).
- Plessi, M., Bertelli, D. & Miglietta, F. (2002). Effect of microwaves on volatile compounds in white and black pepper. *LWT - Food Science and Technology*, 35 (3), 260-264.
- Perakis, C., Louli, V. & Magoulas, K. (2005). Supercritical fluid extraction of black pepper oil. *Journal of Food Engineering*, 71, 86–393.
- Prabhu, R.G.D., Kiran, C.R., Sundaresan, A., Mony, R.S. & Venugopalan, V.V. (2015). Process development studies for recovery of bio active isolates from spent black pepper generated from ayurvedic industry. *Industrial Crops and Products*, 66,144-149.
- Rakmai, J., Cheirsilp, B., Mejuto, J.C., Torrado-Agrasar, A. & Simal-Gàndara, J. (2017). Physico-chemical characterization and evaluation of bio-efficacies of black pepper essential oil encapsulated in hydroxypropyl-betacyclodextrin. *Food Hydrocolloids*, 65, 157-164.
- Tran, T.H., Ha, L.K., Nguyen,D.C., Dao, T.P., Nhan, L.T.H., Nguyen, D.H., Nguyen, T.D., Vo, D-V.N., Tran, Q.T. & Bach, L.G. (2019). The study on extraction process and analysis of components in essential oils of black pepper (*Piper nigrum* l.) seeds harvested in Gia Lai Province, Vietnam. *Processes*, 56,1-15.
- Tran, T.H., Nguyen, H.H.H., Nguyen, D.C., Nguyen, T.Q., Tan, H., Nhan, Le T.H., Nguyen, D.H., Tran, L.D., Do, S.T. & Nguyen, T.D. (2018). Optimization of microwave-assisted extraction of essential oil from vietnamese basil (*Ocimum basilicum* l.) using response surface methodology. *Processes*, 6, 206. [doi:10.3390/pr6110206](https://doi.org/10.3390/pr6110206)
- Zhang, C., Zhao, J., Famous, E., Pan, S., Peng, X. & Tian, J. (2021). Antioxidant, hepatoprotective and antifungal activities of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil. *Food Chemistry*, 346, 128845.
- Wang, Y., Li, R., Jiang, Z-T., Tan, J., Tang, S-H., Li,T-T., Liang, L-L., He, H-J., Liu, Y-M., Li, J-T. & Zhang, X-C. (2018). Green and solvent-free simultaneous ultrasonic-microwave assisted extraction of essential oil from white and black peppers. *Industrial Crops & Products*, 114, 164-172.

Wang, Y., Jiang, Z-T. & Li, R. (2009). Composition comparison of essential oils extracted by hydrodistillation and microwaveassisted hydrodistillation from black pepper (*Piper nigrum* L.) grown in China. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 12(3), 374-380.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.03.2022
Kabul Tarihi : 31.05.2022

Received Date : 28.03.2022
Accepted Date : 31.05.2022

TAŞKIN YAYILIM HARİTALARINDA ARAZİ KULLANIM TÜRÜ VE YÜZEYSEL AKIŞ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: MALATYA İLİ ÖRNEĞİ

EVALUATION OF LAND USE TYPE AND THE EFFECTS OF RUNOFF IN FLOOD INUNDATION MAPS: THE CASE OF MALATYA PROVINCE

Burak ÇIRAĞ¹ (ORCID: 0000-0002-7721-5128)
Mahmut FIRAT^{2*} (ORCID: 0000-0002-8010-9289)

¹Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye
²İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mahmut FIRAT, mahmut.firat@inonu.edu.tr

ÖZET

Dünya genelinde kentleşme artmaktadır ve buna bağlı olarak kentsel nüfus da artmaktadır. Hızlı kentsel nüfus artışının sonucu olarak yetersiz drenaj sistemleri nedeniyle taşkın yağışı durumunda, binaların bodrum katlarını su basması, ulaşım yollarının kapanması gibi can ve mal kaybına neden olabilecek hasarlar meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Malatya ili için arazi kullanım türü ve sızma durumlarına bağlı üç farklı senaryo kapsamında taşkın yayılım haritaları oluşturulmuştur. Bu senaryolar, modelde; arazi kullanım türünün olmadığı, arazi kullanım türünün olduğu ve arazi kullanım türü ile yüzeysel akış değerlerinin birlikte olduğu duruma dayanmaktadır. Çalışmanın, hidrolojik veya hidrodinamik modellerde arazi kullanımı ve yüzeysel akış verilerinin kullanımı hakkında detaylar sunması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, InfoWorks ICM yazılımı kullanılarak oluşturulan modeller, model doğruluğunu arttırması için sayısal yükseklik modeli, bina konum verileri, arazi kullanım türü ve gelecekte meydana gelebilecek yağış yükseklikleri verileriyle desteklenmiştir. Sonuçlar, arazi kullanım türü ile yüzeysel akış değerlerinin birlikte kullanıldığı modele dayalı senaryo da diğer iki senaryoya göre havza genelinde daha az akış kollarının oluştuğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Arazi kullanım türü, yüzeysel akış, taşkın modelleme, infoWorks ICM yazılımı, taşkın yayılım haritası

ABSTRACT

Urbanization is increasing worldwide, and the urban population is increasing accordingly. As a result of rapid urban population growth, in the event of flooding due to inadequate drainage systems, damages that may cause loss of life and property such as flooding of basements of buildings and closure of transportation roads occur. In this study, flood spreading maps were created for Malatya province within the scope of three different scenarios depending on the land use type and infiltration conditions. These scenarios, in the model; it is based on the situation where there is no land use type, there is a land use type, and the land use type and runoff values are together. The study is intended to provide details on the use of land use and runoff data in hydrological or hydrodynamic models. In this context, the models created using the InfoWorks ICM software are supported by the digital elevation model, building location data, land use type and future precipitation heights to increase the model accuracy. The results showed that in the scenario based on the model, in which land use type and runoff values are used together, less flow occurs throughout the basin compared to the other two scenarios.

Keywords: Land use type, runoff, flood modeling, infoWorks ICM software, flood spread map

To Cite: ÇIRAĞ, B., & FIRAT, M., (2022). TAŞKIN YAYILIM HARİTALARINDA ARAZİ KULLANIM TÜRÜ VE YÜZEYSEL AKIŞ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: MALATYA İLİ ÖRNEĞİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 222-236.

GİRİŞ

Kentsel nüfus ülkelerde kentleşme hızından dolayı son yıllarda hızla artmaktadır. Yapılan çalışmalarda, 21. yüzyılın sonunda dünya nüfusunun üçte ikisinin kentsel bölgelerde yaşayacağı tahmin edilmektedir (Pontius Jr ve Schneider, 2001; Bongaarts, 2006; Rahmati vd., 2019). Kentlerde, yetersiz ve kötü drenaj sistemleri, drenaj sistemlerinin yeterli bakımının yapılmaması ve kentsel bölgelerdeki kontrolsüz büyüme sonucunda şehir bölgelerinde meydana gelen kentsel taşkınlar gözlenmektedir (Naiji vd., 2021). Kentsel taşkınlar, kentsel bölgelerde geçirimsiz yüzeylerin yoğun olması ve drenaj ağlarının yetersiz olmasından kaynaklı meydana gelen ani su basmalarıdır (Kadioğlu, 2019; Çırağ, 2021). Kentsel bölgelerdeki büyüme süreci, doğal yapının değişmesine ve bitki örtüsüyle kaplı yüzeylerin geçirimsiz alanlarla değişmesine sebep olmaktadır (Yao vd., 2016; Cortés-Zambrano vd., 2021). Bunun sonucunda yağış sularının zemine sızmasında ciddi miktarda azalma görülmekte ve kentsel havzalardaki yüzeysel akışta artışa neden olmaktadır (Mejía ve Moglen, 2010; Cortés-Zambrano vd., 2021).

Son çalışmalar, değişen iklim koşulları nedeniyle aşırı yağış olaylarındaki artışı belirtmektedirler (Turkington vd., 2016; Steffen vd., 2017; Mukherjee vd., 2018; Rangari vd., 2019). Bu tür olayların meydana gelmesi kontrol edilemez, fakat modern taşkın modelleme teknikleriyle can ve mal kaybına sebebiyet verebilecek riskler ve hasarlar etkin bir şekilde azaltılabilir (Rangari vd., 2019). Hidrolojik sistemi ve birçok faktörün hidrolojik sistem üzerindeki etkisini daha iyi anlamaya yardımcı olan taşkın modellemeleri, son yıllarda ciddi gelişmeler sağlamıştır (Todini, 1978; Narasimhan vd., 2016; Natarajan ve Radhakrishnan, 2020). Ayrıntılı bir şekilde kentsel taşkın dağılımını ve zemin yüzeyindeki akışı doğru bir şekilde analiz etmek için birleştirilmiş 1 boyutlu (1B) ve 2 boyutlu (2B) hidrodinamik modeller kullanılmaktadır (Fan vd., 2017).

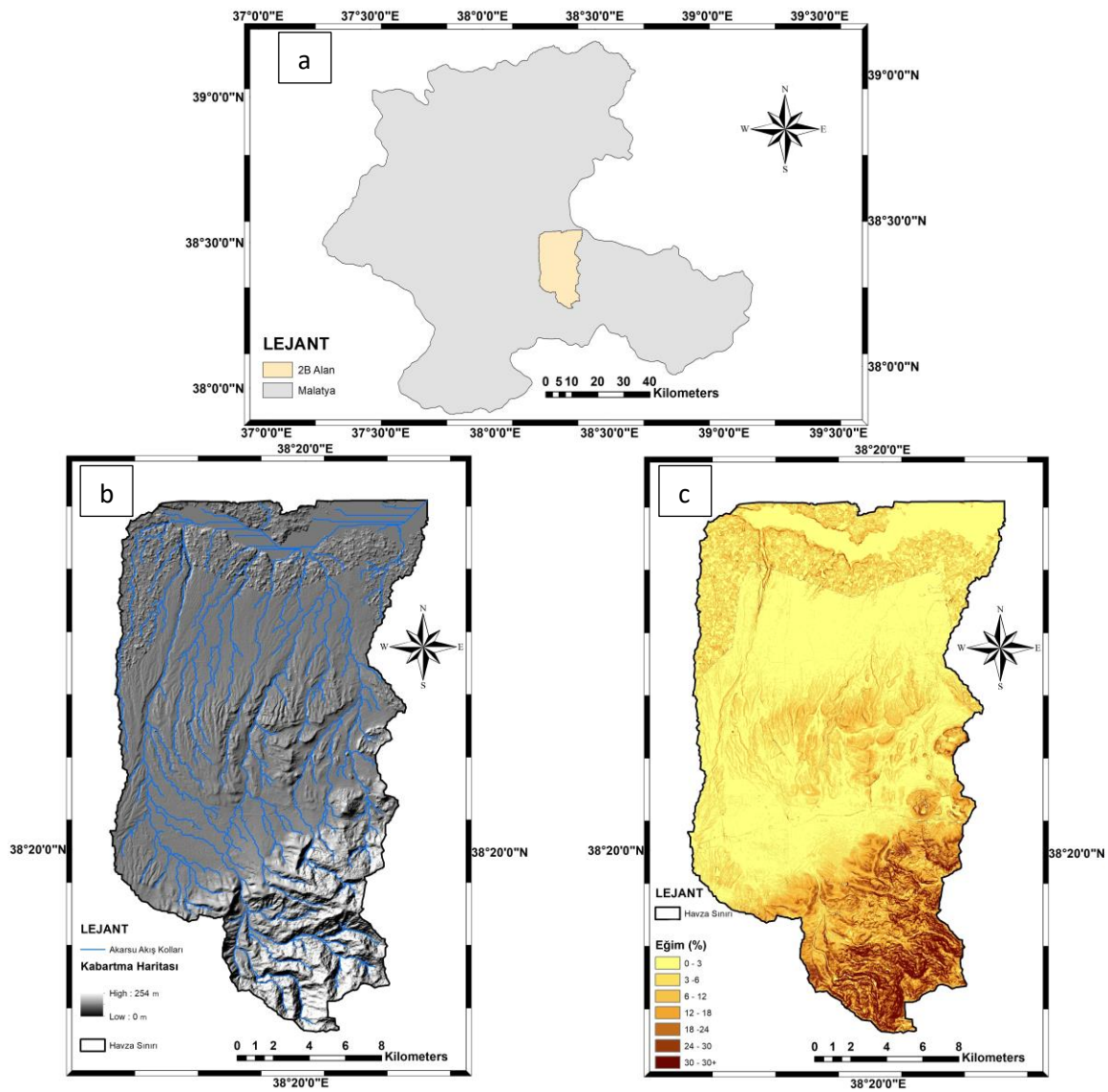
Rangari vd. (2019), Hindistan Haydarabad'ın bir bölümü için şiddet-süre-frekans (IDF) eğrileri temel alınmış, sentetik hiyetrograflar ve geçmiş kritik olaylar dikkate alınarak yağış olayları analiz edilmiştir. Taşkın derinliğini elde etmek ve farklı yağış senaryolarına dayalı taşkın risk haritalarını oluşturmak için 2 boyutlu hidrolik model olan HEC-RAS modelini kullanmıştır. Model sonuçları, toplam alanın %17'sinin sele eğilimli olduğunu ve bunun %9'unun yüksek risk, %52'sinin orta risk ve %35'inin de düşük sel riski altında olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar bölgenin risk durumuna göre mevcut yapıların gözden geçirilmesi ve gerekli tedbirlerin alınması için referans oluşturmaktadır. Jamali vd. (2018) taşkın kapsamını, derinliğini ve bununla ilişkili hasarı hızla tahmin edebilecek Hızlı Kentsel Taşkın ve Hasar Değerlendirme Modeli (RUFIDAM) geliştirmeyi ve doğrulamayı amaçlamıştır. Model çıktılarını, 1B-2B hidrodinamik kentsel taşkın model olan MIKE FLOOD ile karşılaştırmışlardır. RUFIDAM modelinin, mevcut hidrodinamik modellerden önemli ölçüde daha hızlı olduğunu, taşkın ve hasar maliyetlerini yeterli doğrulukta tahmin ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Jiang, Chen ve Wang (2015) Çin'deki Dongguan şehrinin kentsel taşkını analiz etmek için Yağmursuyu Yönetim Modelini (SWMM) kullanmışlardır. Bunun için önce sayısal yükseklik modeli (SYM), dijital harita ve drenaj sistemlerine dayalı model kurulmuştur. Daha sonra alt havza özelliklerine ve kanalizasyon borularına dayalı parametreler türetilip, bu parametrelere duyarlılık analizi yaparak parametrelerin sağlamlığını göstermişlerdir. Farklı geri dönüş periyotları için analizler yapılmış, 1 yıllık geri dönüş periyoduna sahip yağış için taşkın olmayacağı fakat 2, 5, 10 ve 20 yıllık geri dönüş periyotları için çalışılan alanın sular altında kalacağı sonucuna ulaşılmıştır. Darabi vd. (2019) makine öğrenimi tekniklerinin kentsel taşkın bölgelerine uygulanabileceğini doğrulamak için Genetik Algoritma Kural Kümesi Üretimi (GARP) ve Hızlı Tarafsız Verimli İstatistik Ağacı (QUEST) modellerini kullanmışlardır. Bu iki modeli kullanarak sınırlı hidrolojik ve hidrolik verilerle taşkın risk haritaları üretmişlerdir. Model performansını değerlendirmek için alıcı-operatör karakteristik eğrisi (AUC-ROC) ve Kappa istatistiğinin altındaki alan yöntemlerini kullanmışlardır. Sonuçlar, GARP modelinin (AUC-ROC = %93,5, Kappa = 0,86) QUEST modelinden (AUC-ROC = %89,2, Kappa = 0,79) daha yüksek performans doğruluğuna sahip olduğunu göstermiştir. Sidek vd. (2021), Malezya'da kentsel taşkın senaryolarını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Taşkın simülasyonu, 2015 yılında hizmet vermiş drenaj boyutu ile 2020 yılında mevcutta hizmet veren drenaj boyutları olmak üzere iki farklı senaryo kapsamında gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, mevcut drenaj koşullarının, 2015'deki drenaj koşullarına göre taşkın sonucu su basan alanları %78 oranında azalttığını göstermektedir. Buna göre mevcutta hizmet veren drenaj sistemlerinin farklı yağış koşullarına göre analiz edilmesi ve risk durumunun belirlenmesi sürdürülebilir alt yapı yönetimi için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, kentsel alanlarda taşkın yayılım haritalarının oluşturulmasında ve drenaj sistemlerinin performansının analiz edilmesinde, arazi kullanım türü ve sızma etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için beton zemin, asfalt yüzey, meyve bahçeleri, tarım arazisi gibi farklı arazi kullanım türlerinin geçirimsizliği ve bu türlerin yağışın ne kadarını yüzeysel akışa geçirdiği analiz edilmiştir. Yüzeysel akışın sızmaya geçme oranı da arazi kullanım türüne göre farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkların modele olan etkisini incelemek amacıyla, Arc-GIS 10.5

yardımla oluşturulan 2B alana InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modelling) yazılımı ile 3 farklı senaryoya göre taşkın analizi yapılarak taşkın yayılım haritaları oluşturulmuştur. Bu çalışma, hidrolojik veya hidrodinamik modellemeye dayalı taşkın modellemelerinde arazi kullanım türü ve sızma etkilerinin boyutunu göstermede temel oluşturabileceği düşünülmektedir.

ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

Türkiye’de Doğu Anadolu Bölgesi’nin Yukarı Fırat Havzasında 35 54' ve 39 03' kuzey enlemleri ile 38 45' ve 39 08' doğu boylamları arasında yer alan Malatya, 12.313 km² yüzölçümüne ve 808.692 kişilik nüfusa sahiptir. Yağışlar genellikle ilkbahar (%35) ve kış (%34) aylarında yoğun oluyorken, yaz (%7) aylarında en az seviyeye inmektedir. Malatya Ovası ve yakın çevrelerinde yıllık ortalama sıcaklık 13,6 °C ve yıllık yağış miktarı 350 mm’dir (T.C.Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2022). Malatya ilinde 1980-2020 yılları arasında Meteoroloji Genel Müdürlüğünden (MGM) temin edilen meteorolojik verilere göre, aylık en yüksek sıcaklık 42.7 °C (Ağustos 2019); aylık en düşük sıcaklık -19 °C (Aralık 2002); 2009-2020 yılları arasında temin edilen aylık toplam yağış verisine göre, maksimum aylık yağış 115 mm (Şubat 2015)’dir. Ayrıca, 1929-2021 yılları arasında günlük toplam en yüksek yağış miktarı 52,6 mm (05.04.1971) ve en yüksek kar yüksekliği 67 cm (20.12.1951) olarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Çalışma Alanına Ait; **a.** Malatya Haritası Üzerindeki Konumu, **b.** Kabartma Haritası ve Akarsu Kollarının Görünümü, **c.** Eğim Haritası

Taşkın analizine başlamadan önce InfoWorks ICM yazılımına uygun veriler temin edilmelidir ve analize uygun hale getirmek için düzenlenmelidir. Bu kapsamda SYM, bina verisi, yağmursuyu drenaj sistemleri verisi, arazi kullanım

türü verisi ve yağış verisi temin edilerek, InfoWorks ICM yazılımına uygun hale getirecek şekilde düzenlenmiştir. Uygulama alanında, 19,935 m ile 2555,820 m arasında değişen 2x2 m hücre boyutuna sahip SYM verisi, Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi (MASKİ)'den temin edilmiştir. Havzaların ve akarsuların uygun şekilde modellenenebilmesi için SYM haritalarındaki bozuk ve eksik kısımların doldurulması gerekmektedir (ArcMap, 2022). Bozuk ve eksik kısım gibi hataların giderilmesi için, temin edilen SYM verisi, Arc-GIS 10.5 'Hydrology' aracı ile uygun hale getirilmiştir. Ayrıca InfoWorks ICM aracılığıyla oluşturulacak modeli etkilemeyecek şekilde analiz hızı ve etkili bir şekilde yapılabilmesi için SYM çözünürlüğü 10x10 m hücre boyutuna çevrilmiştir. Son olarak SYM verisini InfoWorks ICM yazılımına uygun hale getirmek için nokta veri tipine çevrilmiştir. InfoWorks ICM yazılımı, SYM verisini üçgenlenmiş düzensiz ağı (TIN) çevirerek arazi yüzeyini temsil eder. InfoWorks ICM, nokta verisine çevrilen SYM haritalarına ait noktaları TIN verisi ile birleştirilmesini sağlar ve fazla dolu su hacimlerinin 2B yüzey akışlarını analiz etme fırsatı sağlar (Bertsch vd., 2017). Bu noktaların birleşmesiyle çalışma alanı arazi durumuna göre farklı boyutlarda üçgenlere ayrılır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma Alanına Ait TIN Verisi Sonucu Oluşturulan Üçgenlerin Havza Üzerindeki Görünümü

InfoWorks ICM'de taşkın analizinin yapılacağı ve verilerin ona göre düzenleneceği 2B alan olmalıdır (Innovyze, 2022). Bu kapsamda SYM haritası kullanılarak, yine 'Hydrology' aracının içinde bulunan sırasıyla 'Flow direction' ve tüm drenaj havzalarını tanımlayan bir raster oluşmasına imkân veren 'Basin' komutu kullanılmıştır. Komutlar sonucunda, temin edilen yağmursuyu drenaj sistemlerini ve Malatya ili merkezindeki kentsel bölgeleri içine alan uygun projeksiyonlara sahip, Şekil 1'de coğrafi konumu gösterilen 2B alan oluşturulmuştur. Çalışma alanı kapsamında oluşturulan 2B alan, çalışma kapsamında yağış verilerinin temin edildiği tek istasyon olan MGM'ye ait Malatya İstasyonunu kapsadığından Malatya ili ile aynı ortalama meteorolojik değerlere sahiptir. 382,53 km² yüzölçümüne sahip 2B alan, Malatya ilinin 337.049 nüfuslu Yeşilyurt ilçesi ile 304.750 nüfuslu Battalgazi ilçesinin büyük bir bölümünü içine almaktadır.

Uygulama alanında mevcutta hizmet veren yağmursuyu drenaj sistemleri verisi, MASKİ'den temin edilmiştir. Taşkın analiz modeli oluşturulurken drenaj sistemine ait öznitelik veri tabanı (boru çapı, arazi kotu, boru alt kotu, boruların başlangıç ve bitiş baca isimleri) tanımlanmıştır. Veriye ait öznitelik veri tabanındaki eksik veriler, MASKİ'deki yetkililerden talep edilerek Arc-GIS 10.5 yardımıyla manuel olarak eklenip düzenlenmiştir. Bu kapsamda temin edilen verilerden 8 yağmursuyu drenaj sistemine ait toplamda 183 adet kapalı kanal ve 191 adet düğüm nokta verisi analize dahil edilmiştir. Bina konum poligon verileri, yağış sırasında yüzeysel akışın yönünü ve şiddetini değiştirebileceğinden analize dahil edilmiştir. Bu kapsamda uygulama alanında 2.474 adet bina konum verisi MASKİ'den temin edilmiştir. Temin edilen bina konum verileri, InfoWorks ICM yazılımında model kurulurken hata vermemesi için, bina aralarındaki küçük boşlukların düzeltilmesi, üst üste binen hatalı verilerin giderilmesi gibi düzenlemelerle yazılıma uygun hale getirilmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden, çalışma alanı için 1958-2015

yılları arasındaki ‘Standart Zamanlardaki Maksimum Yağışlar ve Tekerrür Analizi’ verisi temin edilmiş ve yağış yüksekliği şeklinde alınan veriler modele uygun hale getirmek için $i=\Delta P/\Delta t$ formülü kullanılarak yağış şiddetine çevrilmiştir (Tablo 1). Burada i , yağış şiddeti (mm/dk); ΔP , yağış yüksekliği (mm); Δt , zaman aralığı (dk) olmak üzere mm cinsinde olan yağışlar mm/dk birimindeki yağış şiddetine dönüştürülmüştür.

Tablo 1. InfoWorks ICM Yazılımında Kullanılacak Olan Yağış Verileri

Yağış Süresi/Geri Dönüş Periyodu	15 dakika
2 yıl	29,6 mm/saat
5 yıl	43,2 mm/saat
10 yıl	53,2 mm/saat

Bir diğer girdi verisi ise arazi kullanım türü verisidir. Arazi kullanım türü verisi T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı’nın CORINE (Coordination of Information on the Environment) projesi kapsamında ürettiği CORINE verileri Malatya ili için temin edilmiştir (T.C.Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). CORINE arazi örtüsü verilerine göre Manning's n pürüzlülük katsayısının ortalama değerleri, klasik Manning pürüzlülük katsayı tablosu ile CORINE arazi örtüsü sınıflandırmasını birlikte kullandığı için Papaioannou vd. (2018)’nin yaptıkları çalışmadan alınmıştır. CORINE verisi Arc-GIS 10.5 yardımıyla çalışma alanına uygun boyutta kesilerek 9 farklı değere sahip ve toplamda 106 adet poligon verisi analize uygun hale getirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Çalışma Alanına Ait CORINE Arazi Kullanım Türlerine Ait Manning's n Değerleri

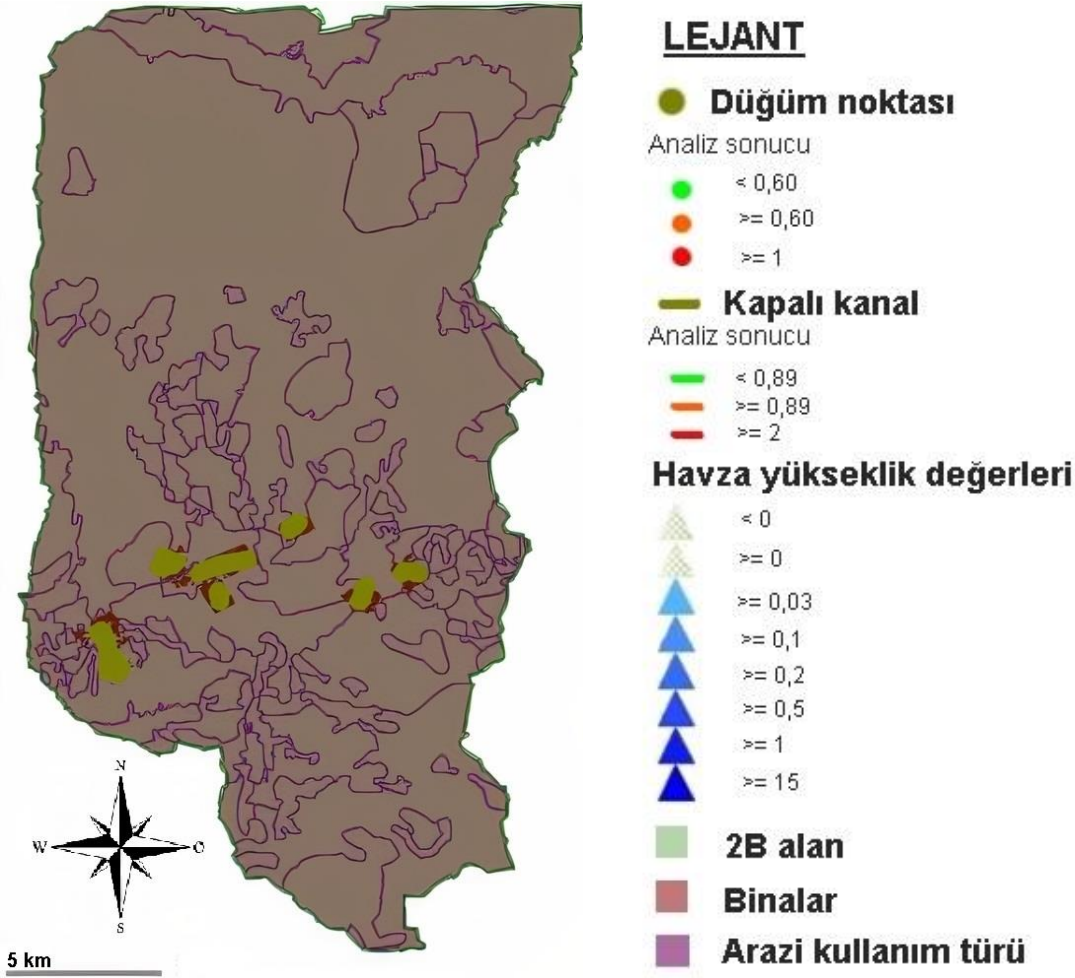
CORINE Sınıfı	Adet	Alan (ha)	Manning's n
Sürekli kentsel yapılar, karayolu ve demiryolu ağları, şantiyeler vb.	24	4.760,61	0,013
Tarım dışı yeşil alanlar, spor alanları	2	118,04	0,025
Seyrek bitki örtülü alanlar	6	2.929,5	0,027
Sulanmayan ekilebilir alanlar, sürekli sulanan arazi vb.	4	388,32	0,030
Çıplak kaya vb.	12	1.678,39	0,035
Doğal otlaklar vb.	38	6.962,36	0,040
Su kütleleri vb.	10	3.246,67	0,050
Bitki değişim alanları	2	78,39	0,060
Meyve ağaçları vb.	8	17.553,96	0,080
Toplam	106	37.716,24	

Analiz için son girdi verisi ise arazi kullanım türüne göre yüzeysel akış verisidir. Bu kapsamda, oluşturulan arazi kullanım türü verisine karşılık gelen yüzeysel akış değerleri Şimşek (2017) tarafından yapılan çalışmadan temin edilmiştir. Şimşek (2017) yaptığı çalışmada, 4 seviyeye ayrılmış CORINE sınıflarına karşılık türev kullanılarak elde edilen yüzeysel akış değerleri tablosu oluşturmuştur. Fakat T.C.Tarım ve Orman Bakanlığı’ndan temin edilen CORINE poligon verisinin öznel tablosu 3 seviyeye göre hazırlanmıştır. Bu nedenle birbirine uygun CORINE sınıfları ve bu değerlere karşılık gelen yüzeysel akış değerleri belirlenip Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. CORINE Sınıfına Karşılık Gelen Yüzeysel Akış Değerleri

Corine Sınıfı	Adet	Alan (ha)	Yüzeysel Akış
Sürekli şehir yapısı	1	521,79	0,90
Çıplak kayalar vb.	2	117,20	0,89
Karayolları ve ilgili alanlar vb.	2	322,06	0,79
Yapay su kütleleri vb.	2	2.482,35	0,72
İnşaat sahaları vb.	17	3.697,42	0,71
Seyrek bitki alanları vb.	6	2.929,5	0,68
Boşaltım (döküm) sahaları	1	67,53	0,66
Sürekli sulanan tarlalar vb.	2	217,15	0,58
Diğer bitki değişim alanları vb.	2	78,39	0,53
Çayır ve sürekli çimenlik alanlar	1	88,22	0,50
Spor alanları vb.	4	904,32	0,49
Karmaşık tarım alanları vb.	35	4.879,81	0,48
Sulanmayan ekilebilir alan vb.	2	171,16	0,43
Diğer meyve bahçeleri vb.	4	16.612,37	0,42
Yeşil şehir alanları	1	67,08	0,39
Ağaçlı ve çalılı doğal çayırliklar vb.	16	3.795,57	0,38
Doğal bitki örtüsü ile birlikte bulunan tarım alanları	8	764,32	0,35
Toplam	106	37.716,24	

Tüm veriler InfoWorks ICM programında içe aktarılarak taşkın yayılım haritaları için model oluşturulmuştur (Şekil 3).

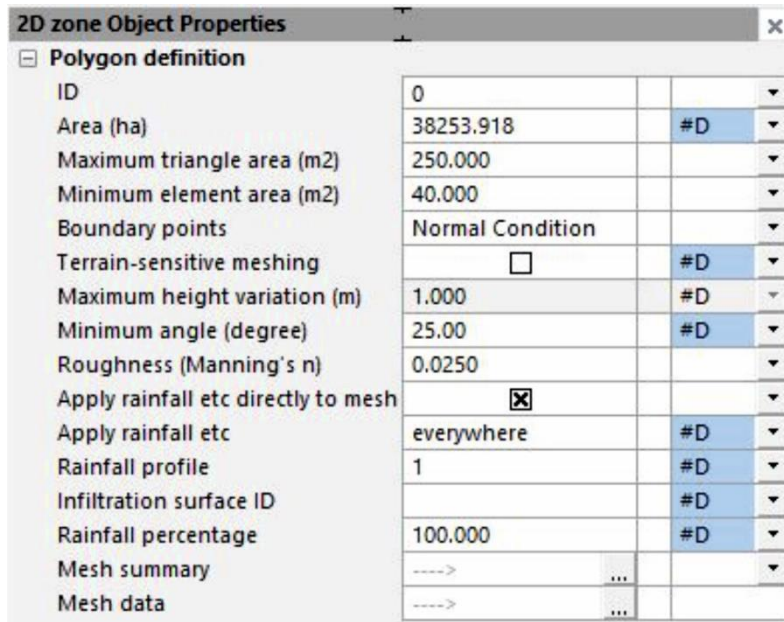


Şekil 3. Çalışma Alanının InfoWorks ICM'deki Görünümü ve Görünüme ve Analizlere Ait Lejant

MODELLEME VE ANALİZ

Hidrolojik modeller, su kaynakları, çevre yönetimi ve planlaması için kritik öneme sahiplerdir (Abdulkareem vd., 2018; Qi vd., 2021). Kentsel hidrolojik modeller ise kentleşmenin, iklim değişikliğinin etkisini değerlendirmek ve kentsel bölgelerde taşkın tahminleri yapmak için geliştirilmişlerdir (Qi vd., 2021). Bu çalışmada ise doğal su havzalarının ve insan yapımı ortamların hidrolojisini ve hidroligini tek bir entegre modelde birleştiren InfoWorks ICM yazılımı kullanılmıştır. Hidrolojik ve iki boyutlu hidrodinamik modellemeye sahip InfoWorks ICM, iki boyutlu hidrodinamik modellemenin çok zaman alma problemini de çözmektedir (Cheng vd., 2017). Çalışma kapsamında, arazi kullanım türü ve yüzeysel akış değerlerine dayalı sızma verilerinin InfoWorks ICM yazılımı kullanılarak oluşturulacak taşkın yayılım haritaları üzerindeki etkisini incelemek amaçlanmıştır. Bunun için 3 farklı senaryo dâhilinde modeller kurularak her senaryo için taşkın yayılım haritaları üretilmiştir.

Senaryo 1 (SN1): Model; yağmursuyu drenaj sistemleri, bina konum verileri ve 2B alan kullanılarak oluşturulmuştur. Modele arazi kullanım türü verisi tanımlanmadığından, 2B alan için arazinin genelindeki farklı kullanım türlerini yansıtmaları için Manning's n değeri ortalama 0,025 alınarak kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. 2B Alanın Özellikleri

Senaryo 2 (SN2): Model; yağmursuyu drenaj sistemleri, bina konum verileri, 2B alan ve arazi kullanım türü verisi kullanılarak oluşturulmuştur. Arazi kullanım türü, 9 farklı kullanım türüne göre toplamda 106 adet poligon verisini kapsamaktadır (Tablo 2).

Senaryo 3 (SN3): Model; yağmursuyu drenaj sistemleri, bina konum verileri, 2B alan, arazi kullanım türüne ek olarak arazi kullanım türüne göre yüzeyel akış değerlerine dayalı sızma verisi ile oluşturulmuştur. Sızma verisi, 17 farklı akış katsayısı değeri için toplamda 106 adet poligon verisini kapsamaktadır (Tablo 3).

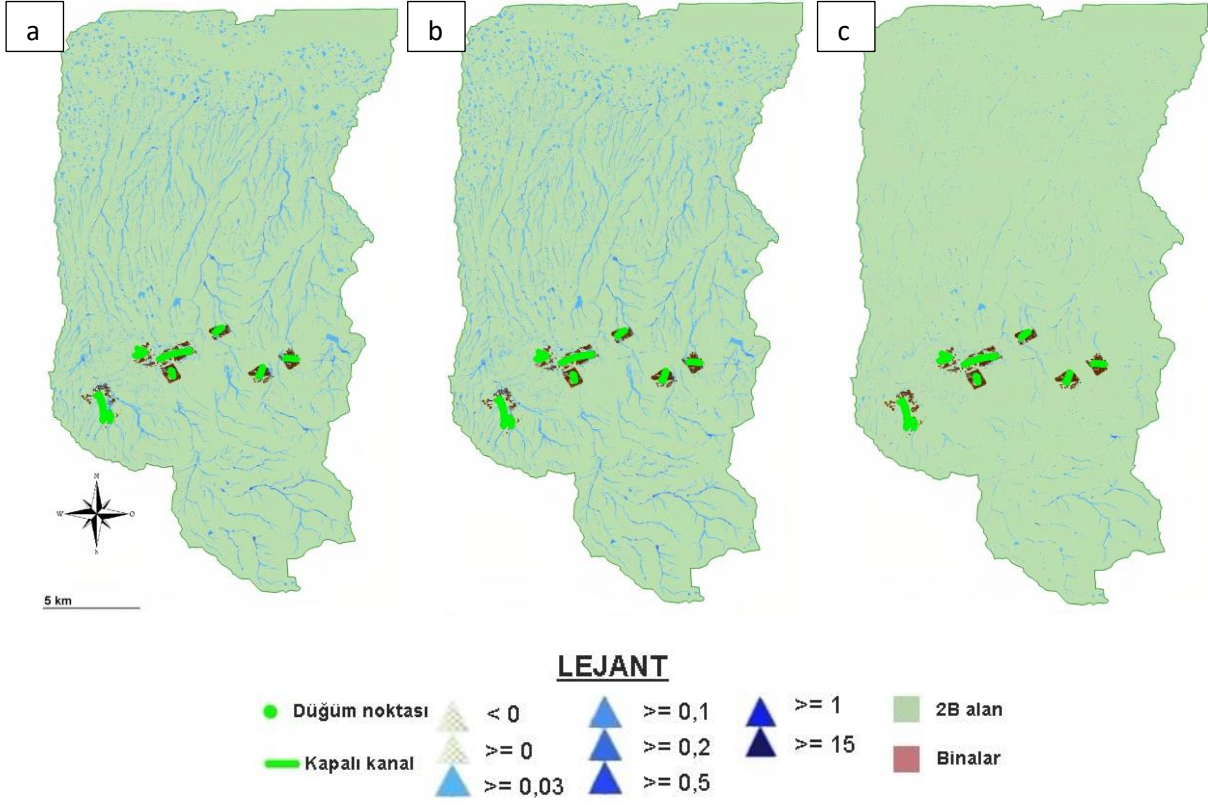
Meteorolojik yağış verileri incelendiğinde, yağışın geri dönüş periyotları ve süreleri arttıkça yağışın şiddeti azalmaktadır. Bu nedenle, kısa süreli geri dönüş periyotları ve kısa süreli yağışların model üzerindeki etkisini görmek amacıyla, her senaryo için 2, 5 ve 10 yıl geri dönüş periyotlarına sahip, 15 dakikalık yağışlar kullanılmıştır (Tablo 1).

T.C. Çevre ve Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİB)'nin 2017 yılında yayımlanmış 'Yağmursuyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik'te yağmursuyu sistemlerinin 35 yıllık tasarım ömrünü sağlamasını ve bu sistemlerin tasarım ömrü boyunca en fazla %90'a kadar dolu akmasını belirtmişlerdir (ÇŞİB, 2017). Bu nedenle InfoWorks ICM yazılımı ile yapılan analizlerde yağmursuyu drenaj sistemlerindeki boruların %90 doluluğu aşanların, görevlerini yerine getiremediği şeklinde yorumlanmıştır. InfoWorks ICM, tablo çıktılarını ve veri sonucunu işlemeyi kolaylaştıran SQL (Structured Query Language) sorgusuna sahiptir (Cheng vd., 2017). Çalışmada 3 farklı senaryo için ve 2, 5 ve 10 yıl geri dönüş periyotları için yapılan analizler sonucu %90 doluluk oranını aşan yağmursuyu drenaj sistemlerindeki borular SQL sorgusu ile belirlenip, yüzdesi Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. 15 Dakikalık Yağış İçin Farklı Senaryo ve Geri Dönüş Periyotları İçin Doluluk Oranını Aşan Boru Sayısı

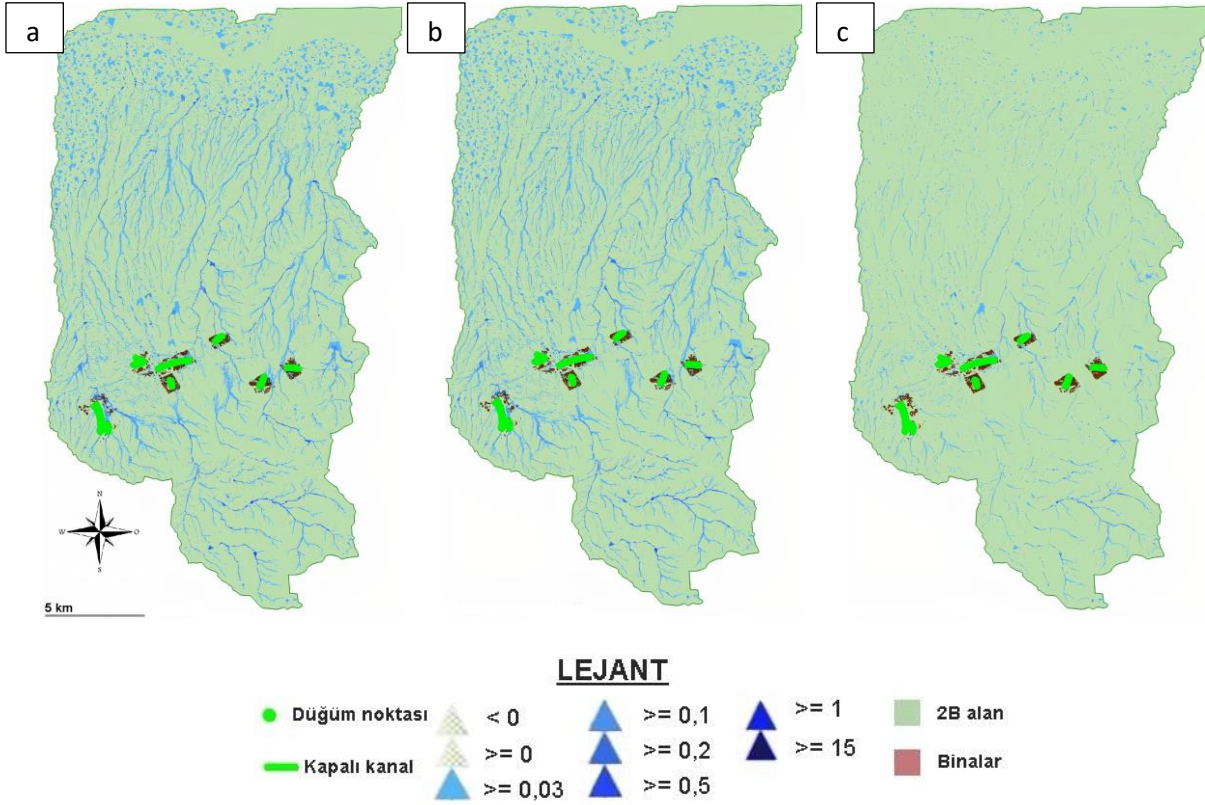
Senaryo / Geri dönüş periyodu	2 yıl geri dönüş periyodu	5 yıl geri dönüş periyodu	10 yıl geri dönüş periyodu
SN1	40,43	45,90	51,36
SN2	40,43	44,26	51,36
SN3	25,13	38,25	41,53

Her senaryo için geri dönüş periyotları uzadıkça yağışın şiddeti de arttığı için borulardaki doluluk oranı sınırı olan %90'ı geçen boru sayısının yükseldiği görülmektedir (Tablo 1, Tablo 4). Ayrıca, 2, 5 ve 10 yıl geri dönüş periyotları ve 15 dakikalık yağış süresine sahip 3 farklı senaryo için oluşturulmuş gelen kesit görüntüleri Şekil 5, 6 ve 7'de verilmiştir.



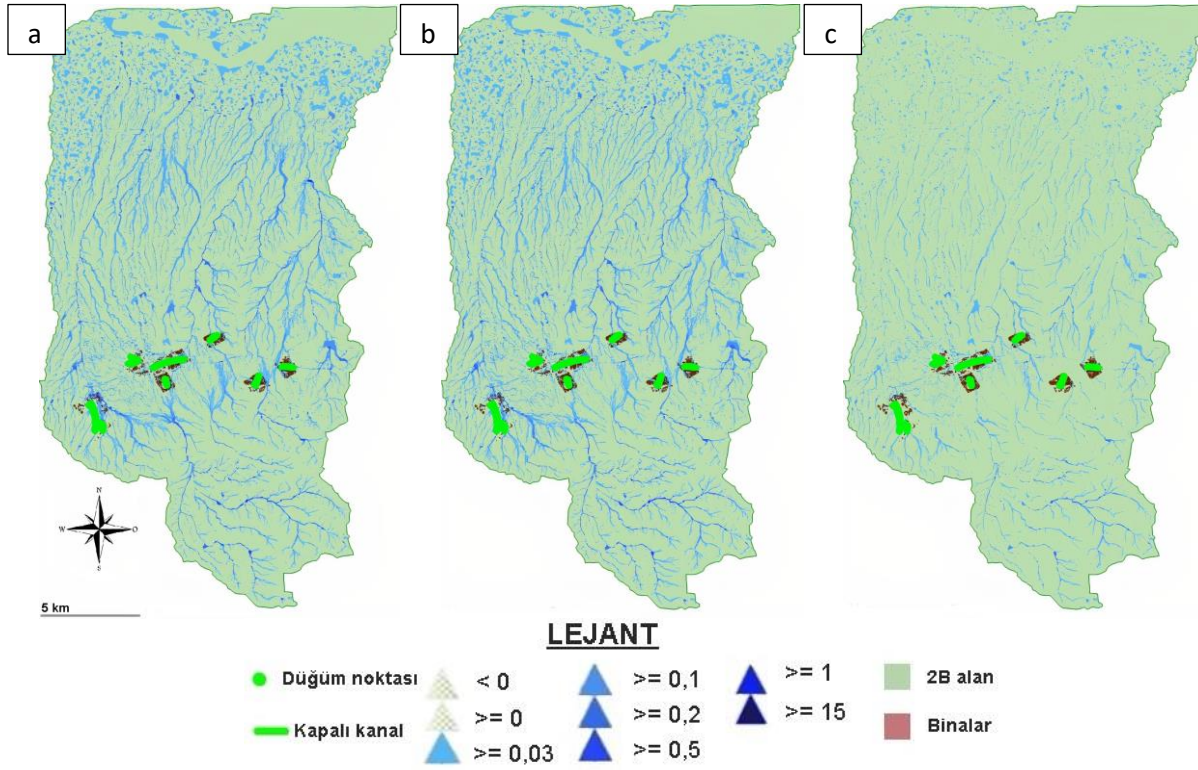
Şekil 5. 2 Yıl Geri Dönüş Periyodu ve 15 Dakikalık Yağış Süresine Sahip Senaryoların Genel Kesiti; **a.** SN1 **b.** SN2 **c.** SN3

15 dakikalık yağış sürelerine sahip 2 yıl tekerrürlü taşkın yayılım haritaları incelendiğinde, SN1 ve SN2'nin SN3'e göre daha çok akış kolları ve derinliklerinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 5). Sonuçlar, SN1 ve SN2 için taşkın haritalarının benzer görüntüleri oluştuğu ve doluluk oranını aşan boru yüzdesinin birbiriyle aynı olduğunu göstermektedir (Tablo 4, Şekil 5).



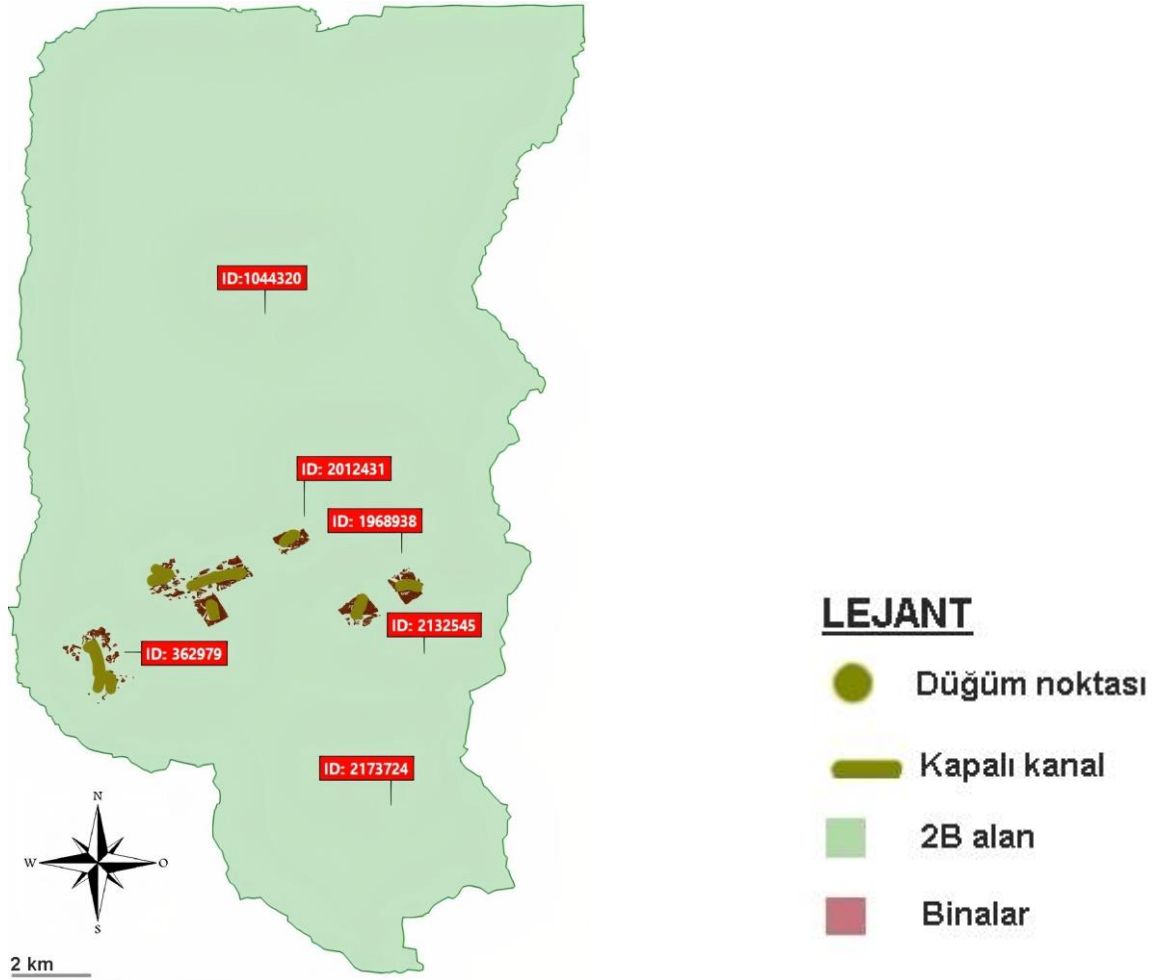
Şekil 6. 5 Yıl Geri Dönüş Periyodu ve 15 Dakikalık Yağış Süresine Sahip Senaryoların Genel Kesiti; **a.** SN1 **b.** SN2 **c.** SN3

Arazi kullanım türü ve sızma değerlerine dayalı analizi gerçekleştirilmiş SN3, diğer senaryolara göre daha az kentsel taşkın riski oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 6). 5 yıl geri dönüş periyodu için SN1’de boruların % 45,90’ı doluluk oranını aşarken, SN3’de % 38,25’nin aştığı görülmektedir (Tablo 4). InfoWorks ICM yazılımı için arazi kullanım türü ve sızma değerlerinin detaylı bir şekilde analize dahil edilmesi, Malatya ili merkez ilçelerini kapsayan alan için oluşturulmuş taşkın yayılım haritaları sonucunda, taşkın tehlikesini azaltmıştır.



Şekil 7. 10 Yıl Geri Dönüş Periyodu ve 15 Dakikalık Yağış Süresine Sahip Senaryoların Genel Kesiti; **a.** SN1 **b.** SN2 **c.** SN3

Kentsel bölgelerin yakınılarında, 10 yıl geri dönüş periyodu ve 15 dakikalık yağış süresi için, özellikle SN1 ve SN2’de kentsel yaşam alanlarını etkileyebilecek yüksek derinliğe sahip akışların oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 7). SN1 ve SN2 sonucu oluşturulan taşkın yayılım haritaları tüm geri dönüş periyotları için benzer özellikleri gösterdiği görülmektedir (Şekil 5, 6, 7). Ayrıca tüm geri dönüş periyotları için doluluk oranını aşan boru yüzdeleri de hemen hemen aynı değeri almıştır (Tablo 4). Bu sonuçların ışığında, SN1 modeli oluşturulurken seçilen ortalama Mannings’ın değerinin (0,025) ürettiği sonuç çıktıları ile SN2 için model kurulurken kullanılan ve arazinin tümünü detaylı bir şekilde temsil eden 9 farklı Mannings’ın değeriyle benzer çıktılar ürettiği söylenilebilir. Ayrıca, 2, 5 ve 10 yıl geri dönüş periyodu ve farklı senaryolar için çalışma alanının farklı bölgelerinden TIN sonucu oluşturulan üçgenlere ait maksimum derinlik değerleri Tablo 5’de ve coğrafi konumları Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Çalışma Alanının Farklı Bölgelerinden TIN Sonucu Oluşturulan Üçgenlerin Havza Üzerindeki Konumları

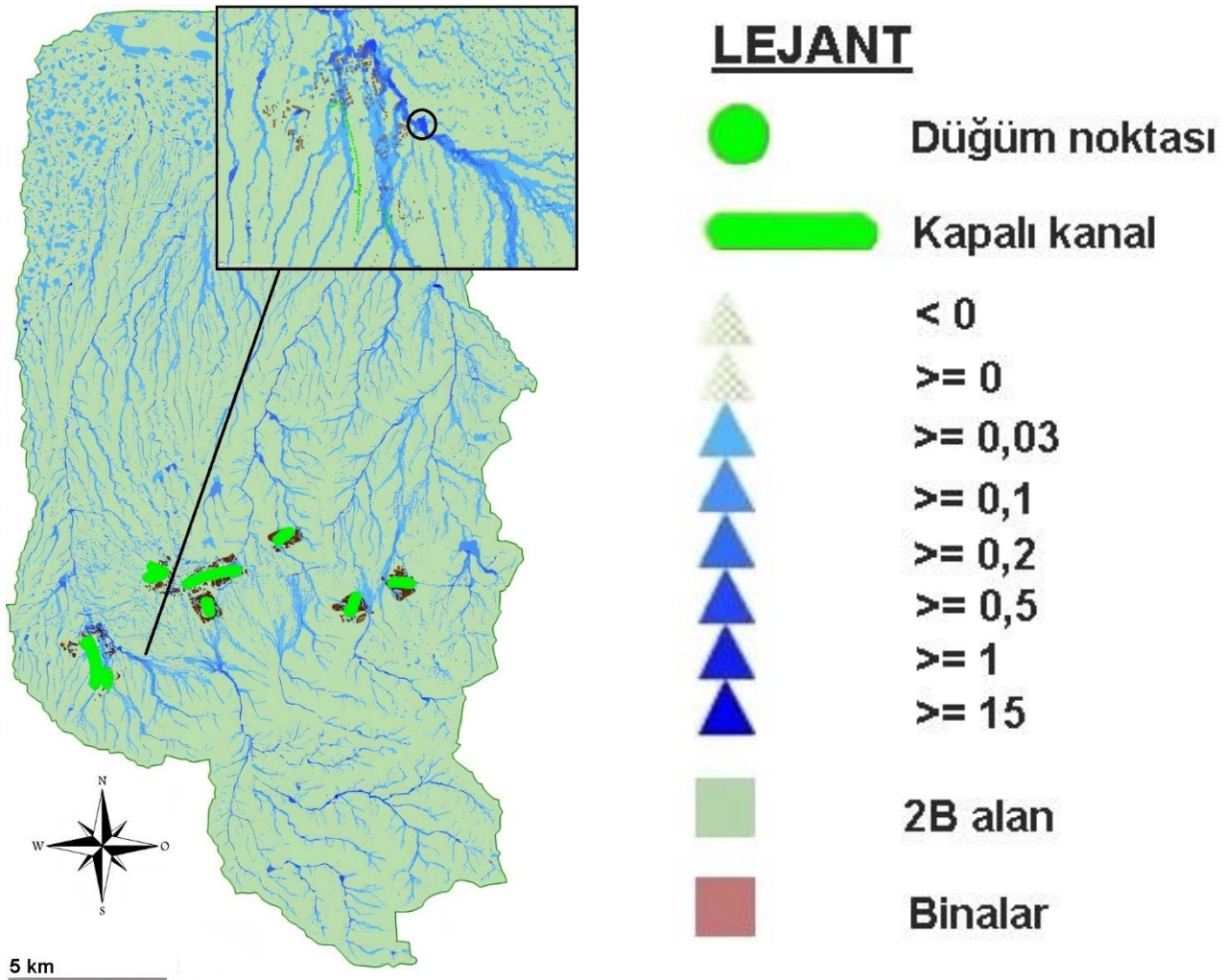
Tablo 5. 2, 5 ve 10 Yıl Geri Dönüş Periyotları ve Farklı Senaryolar İçin Çalışma Alanının Farklı Bölgelerinden TIN Sonucu Oluşturulan Üçgenlere Ait Maksimum Derinlik Değerleri

Element ID	Senaryo	Mannings'n değeri	2 yıl geri dönüş periyodu için maksimum derinlik (m)	5 yıl geri dönüş periyodu için maksimum derinlik (m)	10 yıl geri dönüş periyodu için maksimum derinlik (m)
1044320	SN1	0,025	0,120	0,170	0,226
	SN2	0,080	0,106	0,168	0,236
	SN3	0,080	0,030	0,060	0,084
1968938	SN1	0,025	0,075	0,103	0,137
	SN2	0,040	0,032	0,052	0,078
	SN3	0,040	0,019	0,029	0,040
2012431	SN1	0,025	0,003	0,004	0,005
	SN2	0,013	0,107	0,143	0,167
	SN3	0,013	0,079	0,108	0,139
2132545	SN1	0,025	0,001	0,002	0,003
	SN2	0,035	0,246	0,367	0,504
	SN3	0,035	0,072	0,117	0,167
2173724	SN1	0,025	0,437	0,998	1,255
	SN2	0,040	0,116	0,629	0,874
	SN3	0,040	0,004	0,109	0,412
362979	SN1	0,025	0,415	0,568	0,785
	SN2	0,080	0,383	0,528	0,647
	SN3	0,080	0,120	0,217	0,309

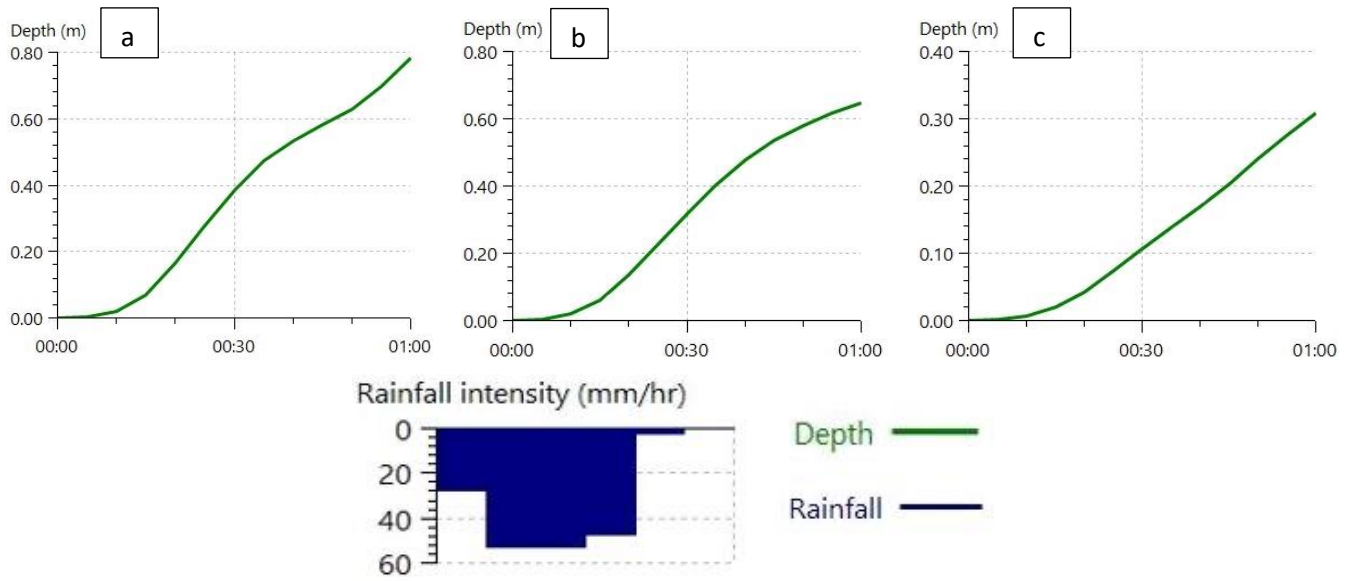
Genel kesit görünüşleri ve doluluk oranını aşan boru yüzdesi değerlerine bakıldığında SN1 ve SN2'nin sonuç çıktılarının birbirine çok yakın olmasına rağmen, arazinin farklı yerlerinden alınan üçgenlerin analiz sonucu ulaştıkları maksimum derinlik değerleri farklılık göstermektedir (Tablo 5). SN1 ve SN2 arasındaki bu değer farkı, havzanın üst kısmında bulunan 1044320 ID numaralı üçgende çok büyük olmamasına rağmen havzanın alt kısmında bulunan 2173724 ID numaralı üçgende büyük değerler aldığı görülmektedir. Bunun nedeni, havzanın giriş kısmına göre çıkış noktasında akış yüksekliklerinin büyük değerler almasıdır. Arazi kullanım türünün detaylı bir şekilde modele yansıtılması, çıkış noktasına yakın bölgelerdeki akış yükseklik değerlerinin daha iyimser sonuçlar oluşturduğu görülmektedir. Çünkü havzanın üst kısımlarında geçirimsiz bir bölgenin 0,08 Mannings'ın değeri alması gerekirken daha az geçirimsiz bir değer olan 0,025 alındığında, havza çıkışına kadar doğru temsil edilmeyen bu akışlar birikerek büyük yükseklik değerleri alan akış kolları oluşturmaktadır. Bundan dolayı, veri temini zorluğu olmayan bölgelerde taşkın modellemesi yapılırken arazi kullanım türü verisinin modele dâhil edilmesi son derece önemlidir.

SN2'ye göre SN3'de üçgenlerin aldığı maksimum yükseklik değerleri arasında da farklar olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar ışığında, modele arazi kullanım türüne ek olarak yüzeysel akışa dayalı sızma değerlerinin eklenmesinin akış yüksekliklerini azalttığı söylenebilir.

Kentsel yerleşim yeri yakınında taşkın oluşturabilecek bir akış kolu üzerinde bulunan 362979 ID'li üçgenin coğrafi konumu Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Kentsel Yerleşim Yeri Yakınındaki 362979 ID'li Üçgenin Coğrafi Konumu



Şekil 10. 362979 ID'li Üçgene Ait 10 Yıl Geri Dönüş Periyodu İçin Farklı Senaryolardaki Derinlik-Zaman Grafikleri, **a.** SN1, **b.** SN2, **c.** SN3

Şekil 9'da coğrafi konumu verilen üçgene ait derinlik-zaman grafikleri sonucunda üç farklı senaryoda da derinlik değerleri farklıdır (Şekil 10). Arazi kullanım türünün ortalama değeri alındığında SN1'de derinlik en yüksek değeri aldığı, SN2'de bu değer azaldığı ve SN3'de de en az değere ulaştığı görülmektedir. Yağışın 10. dakikasına kadar 3 senaryoda benzer özellik gösterebilir, 30. dakikası ve 60. dakikasında ciddi derinlik farkları oluşmuştur. Geçmişte meydana gelmiş taşkın olaylarının detaylı kayıtları tutulmadığı için model doğrulamasının yapılması zor olsa da, Tarım ve Orman Bakanlığı'nın ciddi arazi çalışmaları sonucu ürettiği arazi kullanım türü verileri dâhil edilerek kurulan modele dahi bakıldığında, arazi kullanım türü verisinin modellemeye katılması gerektiği söylenilebilir.

SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, Malatya ili kentsel bölgeleri için InfoWorks ICM yazılımı yardımıyla oluşturulan taşkın yayılım haritalarındaki arazi kullanım türü ve sızma verilerinin etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, temin edilen veriler Arc-GIS 10.5'de düzenlenerek 1B-2B hidrodinamik model olan InfoWorks ICM yazılımına girdi olarak eklenmiştir. 3 farklı senaryo için farklı periyotlarda taşkın yayılım haritaları oluşturulmuştur. Analizler neticesinde arazi kullanım türü verisinin ortalama bir değer alınarak yapılan modeller, detaylı arazi kullanım türü verileriyle yapılan analizlere benzerlik gösterse de detayında farklılıklar oluşmuştur. Arazi kullanım türü verisine dayalı yüzeysel akış değerleri kullanılarak oluşturulan sızma verisi ve arazi kullanım türü verisinin ortak kullanıldığı model de diğer iki senaryo sonucu oluşan analizlere göre taşkın şiddetinin azaldığı ve daha az zarar verecek görüntü oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır. Taşkın yayılım haritalarının oluşturulması, halkın taşkın tehlikelerine karşı bilinçlenmesi için oldukça önemlidir. Ayrıca imar planı oluşturulurken ilgili belediyelere taşkın riski bakımından detaylar sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: İÜ BAP-FYL 2020/2058).

KAYNAKLAR

Abdulkareem, J., Pradhan, B., Sulaiman, W., ve Jamil, N. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(4), 1577-1605.

ArcMap. (2022). How fill works. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm> Accessed 28.03.2022.

- Bertsch, R., Glenis, V., ve Kilsby, C. (2017). Urban flood simulation using synthetic storm drain networks. *Water*, 9(12), 925.
- Bongaarts, J. (2006). United nations department of economic and social affairs, population division world mortality report 2005. *Population and Development Review*, 32(3), 594-596.
- Cheng, T., Xu, Z., Hong, S., ve Song, S. (2017). Flood risk zoning by using 2D hydrodynamic modeling: A case study in Jinan City. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Cortés-Zambrano, M., Amaya-Tequia, W. E., ve Gamba-Fernández, D. S. (2021). Implementation of the hydraulic modelling of urban drainage in the northeast sector, Tunja, Boyacá. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(101), 74-83.
- Çırağ, B. (2021). Yağmursuyu drenaj sistemlerinin taşkın performansının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malatya 158s.
- ÇŞİB. (2017). Yağmursuyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmelik. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/06/20170623-8.htm> Erişim 28.03.2022
- Darabi, H., Choubin, B., Rahmati, O., Haghghi, A. T., Pradhan, B., ve Kløve, B. (2019). Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques. *Journal of Hydrology*, 569, 142-154.
- Fan, Y., Ao, T., Yu, H., Huang, G., ve Li, X. (2017). A coupled 1D-2D hydrodynamic model for urban flood inundation. *Advances in Meteorology*, 2017.
- Innovyze. (2022). 2D zones. https://help2.innovyze.com/infoworksicm/Content/HTML/ICM_ILCM/2D_Zones.htm Accessed 28.03.2022
- Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K., ve Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. *Journal of Hydrology*, 564, 1085-1098.
- Jiang, L., Chen, Y., ve Wang, H. (2015). Urban flood simulation based on the SWMM model. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, 186-191.
- Kadioğlu, M. (2019). Kent Selleri Yönetim ve Kontrol Rehberi. Marmara Belediyeler Birliği Kültür Yayınları, İstanbul.
- Mejía, A. I., ve Moglen, G. E. (2010). Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing. *Water Resources Research*, 46(7).
- Mukherjee, S., Aadhar, S., Stone, D., ve Mishra, V. (2018). Increase in extreme precipitation events under anthropogenic warming in India. *Weather and Climate Extremes*, 20, 45-53.
- Naiji, Z., Mostafa, O., Amarjouf, N., ve Rezqi, H. (2021). Application of two-dimensional hydraulic modelling in flood risk mapping. A case of the urban area of Zaio, Morocco. *Geocarto International*, 36(2), 180-196.
- Narasimhan, B., Bhallamudi, S. M., AMondal, A., Ghosh, S., ve Mujumdar, P. (2016). Chennai floods 2015, A Rapid Assessment. Interdisciplinary Centre for Water Research Indian Institute of Science, Hindistan.
- Natarajan, S., ve Radhakrishnan, N. (2020). An integrated hydrologic and hydraulic flood modeling study for a medium-sized ungauged urban catchment area: A case study of Tiruchirappalli City Using HEC-HMS and HEC-RAS. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101(2), 381-398.
- Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S. M., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., ve Kossieris, P. (2018). An operational method for flood directive implementation in ungauged urban areas. *Hydrology*, 5(2), 24.
- Pontius Jr, R. G., ve Schneider, L. C. (2001). Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, ecosystems ve environment*, 85(1-3), 239-248.
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., ve Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards*, 108(1), 31-62.
- Rahmati, O., Darabi, H., Haghghi, A. T., Stefanidis, S., Kornejady, A., Nalivan, O. A., ve Tien Bui, D. (2019). Urban flood hazard modeling using self-organizing map neural network. *Water*, 11(11), 2370.

- Rangari, V. A., Umamahesh, N., ve Bhatt, C. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1839-1851.
- Sidek, L. M., Chua, L. H. C., Azizi, A. S. M., Basri, H., Jaafar, A. S., ve Moon, W. C. (2021). Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D-2-D Modeling of Urban Flooding in Damansara Catchment, Malaysia. *Applied Sciences*, 11(19), 9300.
- Şimşek, H. (2017). Corine 4. seviye arazi örtüsü/kullanım sınıflarının belirlenmesi ve yüzey akış risk haritasının oluşturulması (Bartın çayı havzası örneği). Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bartın 101s.
- T.C.Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2022). İklim ve bitki örtüsü. <https://malatya.ktb.gov.tr/TR-58266/iklim-ve-bitki-ortusu.html> Erişim 23.05.2022.
- T.C.Tarım ve Orman Bakanlığı. (2022). Corine projesi. <https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/index.html> Erişim 28.03.2022.
- Todini, E. (1978). Using a desk-top computer for an on-line flood warning system. *IBM Journal of Research and Development*, 22(5), 464-471.
- Turkington, T., Breinl, K., Ettema, J., Alkema, D., ve Jetten, V. (2016). A new flood type classification method for use in climate change impact studies. *Weather and Climate Extremes*, 14, 1-16.
- Yao, L., Wei, W., ve Chen, L. (2016). How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases?. *Ecological indicators*, 60, 893-905.
- W. Steffen, L. Hughes, D. Alexander, ve M.Rice. (2017). Cranking up the intensity: climate change and extreme weather events. *Climate Council*, Avustralya.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.04.2022
Kabul Tarihi : 08.06.2022

Received Date : 03.04.2022
Accepted Date : 08.06.2022

ORGANİK ATIKLARDAN ÜRETİLEN KOMPOZİT BİR MODİFİYE BİYOKÖMÜR KULLANILARAK SULU ÇÖZELTİDEN SAFRANİN T GİDERİMİ

SAFRANİN T REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTION USING A COMPOSITE MODIFIED BIOCHAR PRODUCED FROM ORGANIC WASTES

Dilek GÜMÜŞ (ORCID: 0000-0001-7665-3057)

Sinop Üniversitesi Rektörlüğü, Sinop, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: *Dilek GÜMÜŞ*, dgumus@sinop.edu.tr

ÖZET

Modern yaşamın ilgi çekici unsurlarından biri de renktir. Başta tekstil endüstrileri olmak üzere birçok endüstri, farklı konsantrasyonlarda çeşitli boyalar içeren yüksek miktarda renkli atık su üretmektedir. Sağlık ve ekolojik kaygılara yol açan sentetik boyaların alıcı ortama verilmeden önce atıksulardan uzaklaştırılması gerekmektedir. Düşük maliyetli adsorbanlar elde edebilmek için atık malzemelerin kullanımı, atıksu arıtma maliyetlerinin azaltılmasına ve çevrenin korunmasına katkıda bulunduğu için araştırmalara konu olmaktadır. Bu çalışmada, kolayca temin edilebilen ve toksik olmayan, organik üretilen, aktive edilmiş kompozit bir biyokömür hazırlanarak Safranin T boyasının gideriminde adsorbent olarak kullanılmıştır. Kesikli sistemde gerçekleştirilen deneylerde adsorban miktarı (0,1-1 g/L), boya konsantrasyonu (10-50 mg/L), pH (5-9) ve temas süresi (0-360 dk) gibi en temel parametreler incelenmiştir. Dört farklı İzoterm ve dört farklı kinetik tartışılmıştır. Elde edilen verilerle Langmuir izoterm modeli ve sözde ikinci derece kinetik model daha iyi uyum sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, biyokömür, asetik asit, modifikasyon, Safranin T

ABSTRACT

Color is one of the attractive elements of modern life. Many industries, especially the textile industries, produce high amounts of colored wastewater containing various dyes at different concentrations. Synthetic dyes, which cause health and ecological concerns, must be removed from wastewater before being released into the receiving environment. The use of waste materials to obtain low-cost adsorbents is the subject of research as it contributes to reducing wastewater treatment costs and protecting the environment. In this study, an easily available and non-toxic organically produced activated composite biochar was prepared and used as an adsorbent for the removal of Safranin T dye. In the experiments performed in a batch system, basic parameters such as adsorbent amount (0,1-1 g/L), dye concentration (10-50 mg/L), pH (5-9), and contact time (0-360 min) were investigated. Four different Isotherms and four different kinetics are discussed. The Langmuir isotherm model and the pseudo-second-order kinetic model were better fitted with the obtained data.

Keywords: Adsorption, biochar, acetic acid, Safranin T

GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artışı, teknolojik ve endüstriyel gelişmeler, suya olan taleplerin çeşitlenerek artmasına bununla birlikte temiz su kaynaklarının da azalmasına sebep olmuştur. Günümüzde çevre kirliliği ve iklim değişikliğinin tüm dünyanın yoğunlaştığı ortak sorunu olduğu düşünülürse hammadde verimliliği, enerji verimliliği ve su verimliliğini sağlayan stratejiler geliştirilmesi son derece önemlidir. Su kirliliğinin en önemli nedenlerinden biri ise hiç şüphesiz tekstil, kağıt, deri gibi çok çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmakta olan ve her yıl çok büyük miktarlarda oluşan boyalı atıksulardır. Suda bulunan bu boyalar kanserojen, teratojenik ve mutajeniktir ve su ortamı ve insanlar için ciddi sorunlara neden olmaktadır ve deşarj edilmeden önce bu tehlikeli boyaların giderilmesi gerekmektedir (Suleman vd., 2021).

Boya gideriminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları, ileri oksidasyon (AOP), biyolojik arıtma, elektrokimyasal arıtma, membran filtrasyon ve adsorpsiyondur (Samsami vd., 2020). Her birinin maliyet, verimlilik, fizibilite ve çevresel etkilerle ilgili avantajları ve sınırlamaları olmakla birlikte bu yöntemler arasında, en etkin ve en yaygın olarak kullanılan teknik adsorpsiyondur (Crini vd., 2019). Bu amaçla çok çeşitli adsorbanlar kullanılmaktadır (Zhou vd., 2019). Ancak mevcut pahalı adsorbanlara alternatif olarak doğal malzemeler veya endüstrilerden kaynaklanan atıklar/yan ürünler kullanılarak düşük maliyetli adsorban geliştirme çabaları halen devam etmektedir. Biyokömür, tarımsal kalıntılardan organik atık maddelere kadar çeşitli hammaddelerin pirolizi yoluyla üretilen karbonca zengin bir malzemedir (Li vd., 2018).

Mikrodalga destekli piroliz (MDP), organik atık malzemeleri biyokömüre dönüştürmek için alternatif bir ısıtma yaklaşımıdır. Geleneksel pirolize göre daha az ve kısa süreli ısı kaynağı gerektirir (Mašek vd., 2013). Mikrodalga ısıtma tekniğiyle, çoğu durumda organik ve inorganik kirlleticilerin adsorpsiyonu için kullanılabilen farklı tipte biyokömür malzemeleri üretilmiştir (Shirvanimoghaddam vd., 2021). MDP yönteminde etkin bir biyokömür geliştirilmesi için hammaddenin ön işleme tabi tutulması gerekmektedir (Wang vd., 2017). Asit-baz modifikasyonu ile oluşturulan C-OH ve C-H fonksiyonel grupları da adsorpsiyon sürecinde önemli bir rol oynar, böylece biyokömlerinin adsorpsiyon kapasitesini değiştirir (Hu vd., 2018). Tüm dünyada her yıl sınırlı kullanıma sahip tonlarca organik kökenli atık ortaya çıkmaktadır. Bu atık maddelerin biyokömlere dönüştürülerek katma değeri yüksek ürünler elde edilmesi mükemmel bir atık yönetimi ve değerlendirme yöntemidir. Ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Safranin T boyasının sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için kompozit bir biyokömür elde etmektir. Bu amaçla öncelikle mikrodalga destekli bir piroliz yöntemi ile adsorban elde edilmiştir. Biyokömlerinin yüzey alanını iyileştirmek için, aktivasyon ajanı olarak asetik asit kullanıldı. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılarak adsorbanın yüzey özellikleri analiz edildi. Daha sonra, başlangıç boya konsantrasyonu, adsorban miktarı, pH değeri, adsorpsiyon süresinin bir fonksiyonu olarak kesikli adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, biyokömler üzerine boya adsorpsiyonunun denge ve kinetik çalışmaları gerçekleştirildi ve elde edilen veriler uygun matematiksel modellemelerle analiz edildi. Bu çalışmada adsorban hazırlanırken organik kökenli atıkların hammadde olarak kullanıldığı, hiçbir tehlikeli kimyasal maddenin dahil edilmediği ve mikrodalga yöntemi ile kısa sürede hazırlandığı için hammadde ve enerji verimliliğinin ön plana çıktığı, çevre dostu bir atıksu arıtma prosesi önerilmektedir.

MATERYAL METOT

Kirleticisi ve Çözeltilerin Hazırlanması

Safranin T; Bazık Kırmızı 2, Gossipimin, Safranin Y veya A, ve Koton Kırmızısı olarak da adlandırılır. C₂₀H₁₉CIN₄ molekül formülünde pozitif yüklü, katyonik bir boyadır ve 350.84 g/mol moleküler ağırlığa sahiptir. Safranin T Merck firmasından satın alındı. Boya çözeltisi hazırlanırken distile deiyonize su (DDS) kullanıldı. 500 mg/L konsantrasyonunda stok çözelti hazırlandı ve karanlık koşullarda saklandı. Stok çözeltinin istenilen konsantrasyonlara seyreltilmesi ile deney çözeltileri hazırlandı. Çözeltilerin pH ayarları Merck firmasından satın alınmış olan sodyum hidroksit (NaOH, 97% w/w) ve hidroklorik asit (HCl, 37% w/w) kimyasallarının hazırlanan çözeltileri (0,1 M) ile yapıldı.

Biyokömlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Biyokömür elde edebilmek için yaklaşık olarak eşit miktarlarda kereviz kabuğu, portakal kabuğu, havuç kabuğu, soğan kabuğu, pirinç ve çay posasını içeren evsel organik kökenli katı atıklardan oluşan kompozit malzeme

kullanıldı. Biyokütle önce musluk suyu daha sonra saf su ile yıkandı ve bir elektrikli mikser (Waring 8011) kullanılarak öğütüldü. Yerel bir marketten satın alınan endüstriyel beyaz sirke (%20 asetik asit) (CH_3COOH) ile 48 saat muamele edilen kompozit atık malzeme daha sonra mikrodalga yöntemi ile pirolize tabi tutuldu. Tek aşamalı mikrodalga piroliz için modifiye edilmiş bir mikrodalga ısıtma fırını kullanıldı. Hazırlanan örnekler, piroliz gazlarının kaçabileceği sızdırmaz bir kuvars cam reaktöre yerleştirilmiş ve 3 dakikalık üç çevrimde (toplam 9 dk) 700 W mikrodalga gücünde karbonize edilerek oksijensiz ortamda aktive edilmiştir. Numuneler daha sonra oda sıcaklığına soğumaya bırakılmış ve nötr pH değerine ulaşana kadar DDS ile yıkanmış ve 105 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Aktive edilen biyokömür, BC-AA olarak etiketlenmiş ve daha sonraki deneysel çalışmalar için kapalı şişelerde saklanmıştır.

Adsorpsiyon prosesine katkıda bulunan temel fonksiyonel grupları belirlemek için Fourier transform kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi yapıldı. Adsorpsiyon öncesi ve sonrasındaki biyokömür numunelerinin spektrumları, 500–4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında FTIR spektroskopisi (SHIMADZU IRSpirit) kullanılarak analiz edildi. Adsorbentın sıfır yük noktası pH_{pzc} literatürde belirtilen yöntem kullanarak belirlendi (Suleman vd., 2021). Başlangıç pH'sı 2 ila 11 arasında (0.1 M HCl veya NaOH eklenerek) ayarlanan farklı pH çözeltilerine. 0.10 g adsorban ilave edilerek 24 saat çalkalandı. Belirlenen zamanın sonunda çözeltilerin nihai pH'sı (pH_n) ve ilk pH_i 'sı ölçülerek pH'daki değişim (ΔpH) belirlendi. (Denklem (1)) Değişmeden kalan değer yaklaşık olarak pH_{PZC} değerini verdi. Hazırlanan adsorban için pH_{pzc} noktası yaklaşık olarak pH 6.5 olarak belirlendi.

$$\Delta_{\text{pH}} = \text{pH}_i - \text{pH}_n \quad (1)$$

Adsorpsiyon Deneyleri

Adsorpsiyona etki eden parametrelerin optimum değerlerini belirleyebilmek için kesikli adsorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda başlangıç çözelti pH değeri, kullanılan biyokömür miktarı (m), adsorpsiyon temas süresi (t) ve kirletici olarak seçilen sentetik boya konsantrasyonu (C_0) gibi temel parametreler araştırılmıştır.

Belirli miktarlarda boya çözeltisi ve adsorbent içeren çözeltiler belirlenen çeşitli çalışma koşulları altında bir orbital çalkalayıcı ile 150 rpm'de 23 ± 1 °C'de bir dizi Erlen şişesinde çalkalandı. Belirlenen sürelerin sonunda deney ortamından bir miktar numune alınmış ve adsorbentten arındırılan numunelerin 519 nm dalga boyunda bir spektrofotometre (Thermo Genesys 10) ile absorbansları belirlenerek hazırlanan kalibrasyon grafiği ile konsantrasyonları hesaplanmıştır (Ugraskan vd., 2022). Aşağıdaki denklemler kullanılarak adsorpsiyonun kapasitesi ve giderim verimi hesaplanmıştır.

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2)$$

$$\text{giderim}(\%) = \frac{(C_0 - C_e) \cdot 100}{C_0} \quad (3)$$

q, adsorpsiyon kapasitesi (mg/g), C_0 ve C_e boyanın başlangıç ve son konsantrasyonlarıdır (mg/L), V çözelti hacmidir (L) ve m BC-AA miktarını ifade etmektedir.

İzoterm ve Kinetik Çalışmaları

İzoterm çalışmaları, 100 mL hacmindeki farklı konsantrasyonlarda kirletici boya içeren çözeltilere 60 mg adsorbent ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, optimize edilmiş deneysel koşullar altında sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Denge süresinin sonunda alınan numunelerle boyanın nihai konsantrasyonu ve adsorbentın dengedeki adsorplama kabiliyeti Denklem 2'de belirtildiği gibi hesaplanmıştır. Safranin T'nin BC-AA'ya adsorpsiyonunda elde edilen verileri Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich (DR) izoterm modelleri ile değerlendirildi. Adsorpsiyon kinetiği için elde edilen veriler sözde birinci dereceden, sözde ikinci dereceden ve partikül içi difüzyon kinetik modellerle değerlendirildi (Lagergren, 1898; Ho, 1999). Çalışmada kullanılan tüm model denklemleri Tablo 1'de sunulmuştur. Model çözümlenmeleri doğrusal olmayan regresyon kullanılarak Excel® Solver programında yapılmıştır. Model verimlilikleri en düşük RMSE (ortalama hata kareleri toplamı karekökü) ve en yüksek R^2 ile belirlenmiştir.

Tablo 1. Model Denklemleri

Model	Denklem	Referans	
Izoterm model	Langmuir	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}, \quad RL = \frac{1}{1 + K_L C_0}$	(Langmuir, 1918)
	Freundlich	$q_e = K_F C_e^{(1/n)}$	(Freundlich, 1906)
	Temkin	$B_T \ln(K_T C_e), \quad B_T = \left(\frac{RT}{b_t}\right)$	(Temkin, 1941)
	Dubinin-Radushkevich	$q_e = q_s \exp(-k_d [RT \ln(1 + \frac{1}{C_e})]^2)$ $E = \frac{1}{2\sqrt{k_d}}, \quad q_e = q_s \exp(-k_d \epsilon^2)$	(Dubinin vd., 1947)
Kinetik model	Sözde birinci derece	$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t})$	(Lagergren, 1898)
	Sözde ikinci derece	$q_t = \frac{k_2 (q_e)^2 t}{1 + k_2 q_e t}$	(Ho and McKay, 1999)
	Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} (\ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t)$	(Chien ve Clayton, 1980)
	Partikül içi difüzyon modeli	$q_t = K_1 \sqrt{t} + C_i$	(Weber ve Morris, 1963)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (q_{hesaplanan} - q_{deneysel})^2}$$

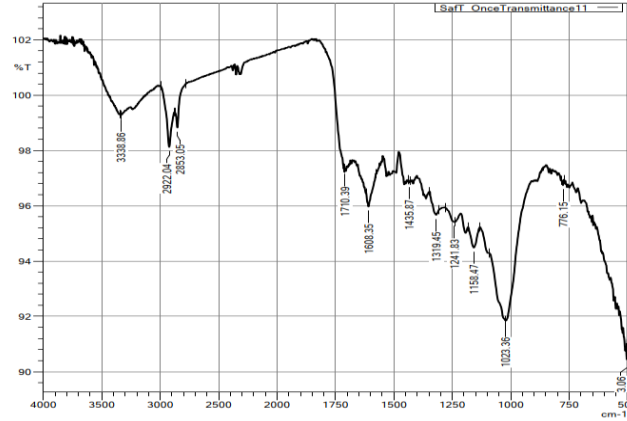
İzoterm model denklemlerinde; q_e , adsorbentın dengedeki boya adsorpsiyon kapasitesidir, C_e dengedeki boya iyon konsantrasyonudur, K_F ve n adsorpsiyon kapasitesi ve yoğunluğu ile ilgili Freundlich model sabitleridir, q_m (mg/g) adsorbentın maksimum boya adsorpsiyon kapasitesidir, K_L Langmuir adsorpsiyon enerjisiyle ilgili denge sabiti ve R ve T , Kelvin ölçeğinde evrensel gaz sabitleri (8.341 J/mol/K) ve sıcaklıktır. K_T ve B_T maksimum bağlanma enerjisi ve emilim ısıyla ilgili Temkin sabitidir. q_s ve k_d adsorbentın maksimum boya adsorpsiyon kapasitesi ve boya molü başına adsorpsiyon enerjisiyle ilgili sabittir. ϵ Polanyi potansiyelini ifade etmektedir.

Kinetik denklem modellerinde; q_t (mg/g) adsorbentın t zamanındaki boya adsorpsiyon kapasitesini, k_1 ve k_2 sırasıyla, sözde birinci derecede ve sözde ikinci derece hız sabitlerini, α ve β Elovich sabitlerini, k_i partikül içi difüzyon hızı sabitini ifade etmektedir. C_i sınır tabakasının kalınlığı hakkında bilgi veren bir sabittir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Karakterizasyon

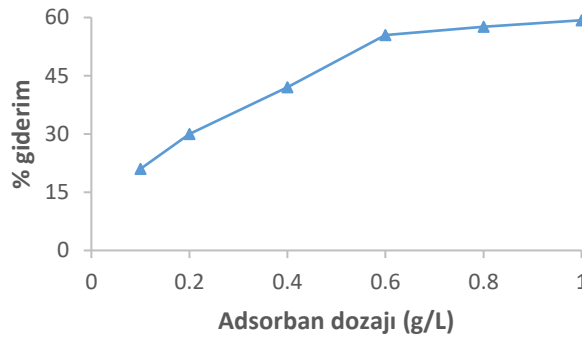
Hazırlanan biyokömürün yüzey kimyası ve fonksiyonel grupları FTIR spektrumu ile incelenmiş çeşitli hidroksil, karboksil ve amin guruplarını içeren 3338.86, 2922.04, 2853.05, 1710.39, 1608.35, 1435.87, 1319.45, 1241.83, 1158.47, 1023.36 noktalarında Safranin T adsorpsiyonuna katkıda bulunabilecek çeşitli pikler tespit edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. BC-AA FTIR Spektrumu

Adsorban Miktarının Etkisi

Adsorpsiyonun bir fonksiyonu olarak adsorban miktarının Safranin T boyasının giderim verimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve 0,1 ile 1 g/L arasında değişen miktarlardaki adsorban dozajının etkisi Şekil 2'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Adsorbent miktarı 0,1g/L'den 0,6 g/L'ye artırıldığı zaman Safranin T'nin adsorplanma yüzdesi belirgin bir artış göstermiştir. Adsorban miktarı 0,6 g/L'den 1 g/L'ye çıkarıldığında ise bir miktar artış olmakla birlikte % giderim veriminde kaydadeğer bir yükseliş olmadığı için optimum adsorbent dozajı 0,6 g/L olarak belirlenmiş ve daha sonraki deneylerde bu miktar kullanılmıştır. Adsorban miktarının artmasıyla artan aktif bölgelere bağlanma gerçekleştiği için boya giderim yüzdesi artış göstermiştir. Buna zıt olarak ise adsorban miktarı arttıkça birim adsorban başına adsorplanan kirletici miktarı azalmış olacaktır (Azimvand vd., 2018).

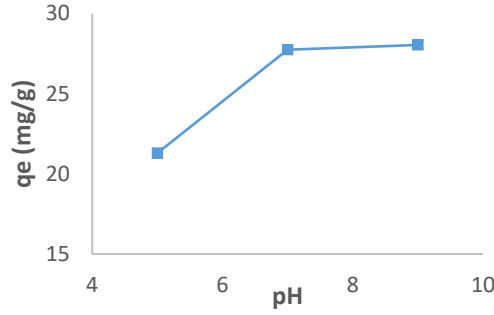


Şekil 2. Adsorban Dozajının Etkisi (Başlangıç Boya Konsantrasyonu: 30 mg/L, pH: 7, Adsorpsiyon Süresi: 360 Dakika, Çalkalama Hızı: 150 rpm)

pH Etkisi

Adsorbanın kirletici ile etkileşiminde en önemli faktörlerden biri çözeltinin pH değeridir. pH adsorbent'in yüzey yükünü ve aktif bölgelerindeki fonksiyonel grupların ayrışmasını etkilemekle birlikte boya moleküllerinin yapısını da etkilemektedir. Safranin T boyasının farklı pH değerleri (5,7,9) için BC-AA üzerine adsorpsiyonu Şekil 2'de sunulmuştur. Grafikten de görüldüğü üzere adsorpsiyon kapasitesi asidik pH değerinde düşüktür. Nötr ve daha alkali pH değerlerinde adsorpsiyon kapasitesi artmıştır.

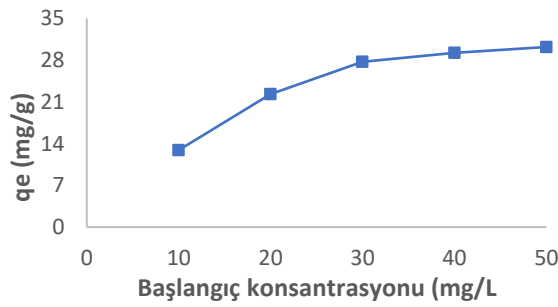
pH_{pzc} (sıfır yük noktası) değeri BC-AA'nın yüzey yükünün sıfır olduğu pH değeri yaklaşık 6,5 olarak tanımlandı. Bu durumda $pH < pH_{pzc}$ olduğunda, adsorbanın yüzeyi pozitif olarak yüklenir ve elektrostatik çekim nedeniyle anyonik moleküllerin adsorbent yüzeyine adsorplanma kapasitesi artar. pH değeri $> pH_{pzc}$ olduğu durumlarda, adsorbanın yüzeyi negatif olarak yüklenir ve katyonik moleküllerin adsorpsiyon kapasitesi artar (Li vd., 2021). Safranin T'nin daha yüksek pH'ta yani $pH > 6,5$ olduğunda elektrostatik etkileşimle birlikte adsorplanma kapasitesinde artış olduğu söylenebilir. Literatürdeki çalışmalarda da boya gideriminde benzer davranışlar sergilenmiştir (Sharafinia vd., 2021). Optimum pH değeri 7 olarak belirlenmiş ve deneyler pH 7'de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Başlangıç pH Etkisi (Başlangıç Boya Konsantrasyonu: 30 mg/L, Adsorbant Dozajı:0,6 g/L, Adsorpsiyon Süresi: 360 Dakika, Çalkalama Hızı: 150 rpm)

Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Etkisi

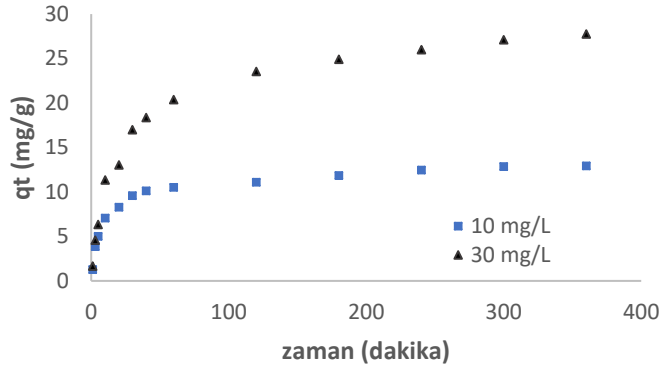
Safranin T'nin BC-AA üzerine adsorpsiyonunda kirletici konsantrasyonunun etkisini araştırmak için 5 farklı konsantrasyonda (10-50 mg/L) deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylere ilişkin grafik Şekil 4' de sunulmuştur. Başlangıç Safranin T konsantrasyonunun 10 mg/L'den 50 mg/L'ye artırılmasıyla BC-AA'nın boya giderim kapasitesi 12,91 mg/g'dan 30,20 mg/g'a yükselmiştir. Safranin T boyasının başlangıç konsantrasyonundaki artış, boya molekülleri ve BC-AA yüzeyi arasındaki etkileşimleri artırarak ve adsorbat ve adsorban arasında kütle aktarımı için önemli bir itici güç sağlayarak adsorpsiyona yardımcı olmaktadır (Novais vd., 2018).



Şekil 4. Başlangıç Boya Konsantrasyonu Etkisi (pH: 7, Adsorbant Dozajı:0,6 g/L, Adsorpsiyon Süresi: 360 Dakika, Çalkalama Hızı: 150 rpm)

Adsorpsiyon Süresinin Etkisi

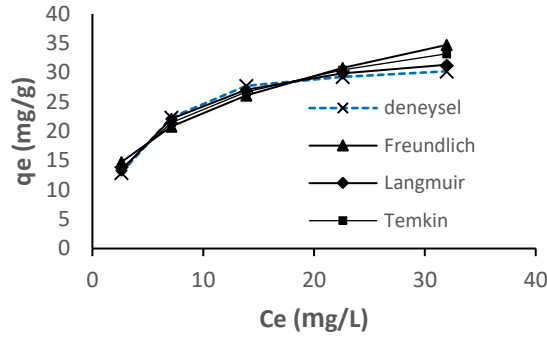
Adsorpsiyon prosesinde temas süresinin etkisini araştırmak için 2 farklı kirletici konsantrasyonunda (10-30mg/L) çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalara ilişkin grafik Şekil 5'te sunulmuştur. Çalışılan iki başlangıç boya konsantrasyonu için, temas süresinin artmasıyla Safranin T'nin BC-AA üzerine adsorplanma kapasitesi kademeli olarak artmaktadır. 360 dakika sonra denge durumuna ulaştıkları görülmektedir. Adsorpsiyon prosesinde temas süresi arttıkça kirleticinin adsorbent yüzeyine transferi dengeye ulaşmaya kadar artmıştır. Dengeye ulaşma süresi boyunca her iki kirletici için de yaklaşık olarak ilk 30 dakikada daha hızlı bir artış gözlemlenmiş daha sonra dengeye yönelerek yavaş bir şekilde dengeye ulaşmıştır. İlk yarım saatteki hızlı artış adsorpsiyonun başlangıcında fazla miktarda aktif bölge bulunması ve sürecin ilerlemesiyle buradaki aktif bölgelerin yavaş yavaş dolması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 5. Temas Süresinin Etkisi (pH: 7, Adsorbant Dozajı: 0,6 g/L, Kirlenici Konsantrasyonları: 10-30 mg/L, Adsorpsiyon Süresi: 360 dakika, Çalkalama Hızı: 150 rpm)

İzoterm Çalışmaları

Adsorpsiyon izotermelerini hesaplamak için kullanılan denge verileri, kirlenicilerin adsorbanlarla nasıl etkileşime girdiğini tanımlamak ve etkileşimin doğası hakkında bilgi edinmek için kullanılır (Tran vd., 2020). Bir adsorpsiyon prosesinin tasarımını optimize etmek çok önemlidir. Farklı modellerden elde edilen parametreler, adsorbantın yüzey özellikleri ve adsorbata olan afinitesi hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu modeller için izoterm denklemleri geliştirilmiştir. Çalışmanın bu kısmında sıklıkla kullanılan dört izoterm modeli olan Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich izotermi ile modeller yapılmıştır. Modellemeye ilişkin grafik Şekil 6'da sunulmuştur. Model parametrelerinin verileri Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 6. İzoterm Modellerinin Grafikselsel Gösterimi (DeneySEL Koşullar: pH: 7, Adsorbant Dozajı: 0,6 g/L, Kirlenici Konsantrasyonları: 10-50 mg/L, Adsorpsiyon Süresi: 360 Dakika, Çalkalama Hızı: 150 rpm)

Tablo 2. İzoterm Model Parametreleri

Freundlich	
K_F ($\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$)	10,61
$1/n$	0,342
RMSE	2,32
R^2	0,8958
Langmuir	
q_m (mg g^{-1})	35,60
K_L (L mg^{-1})	0,23

R_L	0,0002-0,00048
RMSE	0,67
R^2	0,9910
Temkin	
B_T	7,81
K_T (L/mg)	2,19
RMSE	1,60
R^2	0,9581
Dubinin-Radushkevich	
q_s (mg/g)	28,99
E (kJ/mol)	0,384
RMSE	1,48
R^2	0,9463

Verilerden elde edilen parametreler incelendiğinde en düşük hata değerini (0,67) ve en yüksek korelasyonu (0,9910) sağlayan modelin Langmuir izoterm modeli olduğu görülmektedir. Langmuir izoterm modeli, tek tabakalı adsorpsiyona dayanmaktadır. Model hesaplamalarına göre Safranin T'nin BC-AA yüzeyine adsorplanmasında maksimum tek tabakalı adsorpsiyon kapasitesi q_{max} : 35,60 mg/g bulunmuştur. Langmuir modelinin denge parametresi veya ayırma faktörü olarak adlandırılan bir sabit olan boyutsuz denge parametresi R_L değerinin 0 ile 1 arasında olması da adsorpsiyonun bu model için uygunluğunu göstermektedir (Hamzenejad vd., 2020). Literatürde de Safranin T ile yapılan çalışmalarda Langmuir modeli ile uygunluk sergileyen çalışmalar mevcuttur (Gümüş, 2021; Hu vd., 2019).

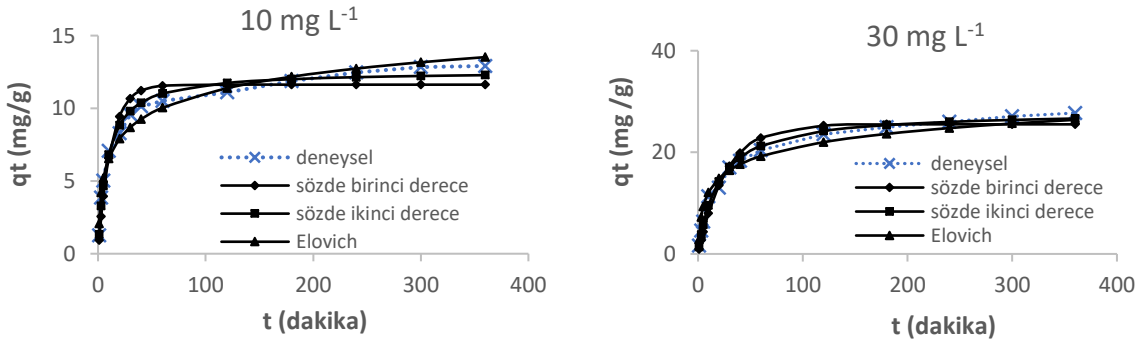
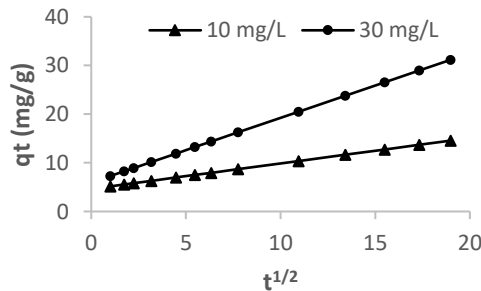
Freundlich modeli, heterojen bir yüzey üzerinde çok tabakalı adsorpsiyonu tanımlar. Ayrıca, $1/n$ değeri ($0 < (1/n) < 1$) adsorpsiyonun uygun olduğunu göstermiştir. Temkin izotermi adsorban ve kirletici arasındaki etkileşimleri hesaba katan ve katmandaki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısının doğrusal olarak azalacağını varsayan bir modeldir. Dubinin-Radushkevich izoterm modelinden elde edilen adsorpsiyonun serbest enerjisi, E (kJ/mol), çözelti ortamında 1 mol boyayı adsorplamak için gereken serbest enerjidir. Genellikle bu değer adsorpsiyonun doğasını ayırt etmek için kullanılır. $E < 8$ kJ/mol ise fizikosorpsiyon veya E değeri 8 ile 16 kJ/mol arasında ise kimyasal adsorpsiyonu belirtmektedir (Almarri, 2021). Buradan elde edilen E değeri < 8 kJ/mol olduğu için, Safranin T adsorpsiyonunun fiziksel mekanizmayı içerdiği görülmektedir.

Kinetik Çalışmalar

Adsorpsiyon kinetiğinin değerlendirilmesi reaksiyon mekanizması hakkında değerli bilgiler sağladığı için atık suyun sorpsiyon prosesi ile arıtımı çalışılırken büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, BC-AA'nın kinetik davranışını incelemek için dört farklı matematiksel modelden (sözde birinci dereceden, sözde ikinci dereceden, Elovich ve parçacık içi difüzyon modeli) yararlanılmıştır. Hesaplanan kinetik sabitler ve istatistiksel analiz verileri Tablo 3 ve Şekil 7'de sunulmuştur.

Tablo 3. Kinetik Model Parametreleri

Kinetik parametreler	10 mg L ⁻¹	30 mg L ⁻¹
Sözde birinci derece		
q _e (mg g ⁻¹)	11,63	25,51
k _F (dakika ⁻¹)	0,0830	0,0375
R ²	0,9376	0,9702
RMSE	0,96	1,72
Sözde ikinci derece		
q _e (mg g ⁻¹)	12,57	28,09
k _s (g mg ⁻¹ dakika ⁻¹)	0,0094	0,00183
R ²	0,9852	0,9916
RMSE	0,44	0,84
Elovich		
α (mg g ⁻¹ dakika ⁻¹)	5,627	8,155
b (g mg ⁻¹)	0,514	0,250
R ²	0,9773	0,9907
RMSE	0,54	1,58
Partikül içi difüzyon modeli		
k _{id} (mg g ⁻¹ dakika ⁻¹)	0,5230	1,3278
C _i (mg g ⁻¹)	4,6301	5,9591
R ²	0,7729	0,8625
RMSE	1,70	3,14

**Şekil 7.** Kinetik Modellerinin Grafikselsel Gösterimi (DeneySEL Koşullar: pH: 7, Adsorbant Dozajı: 0,6 g/L, Kirlenici Konsantrasyonları:10-30 mg/L, Adsorpsiyon Süresi: 360 Dakika, Çalkalama Hızı: 150 rpm)**Şekil 8.** Partikül İçi Difüzyon Modeli Grafiği

Tablodaki kinetik veriler değerlendirildiğinde her iki kirletici konsantrasyonu için de en düşük RMSE değeri (10 mg/L: 0,44 ve 30 mg/L: 0,84) ve en yüksek R^2 değeri (10 mg/L: 0,9852), 30 mg/L: 0,9916) ile Safranin T boyasının BC-AA üzerine adsorpsiyonunun sözde ikinci derece adsorpsiyon modeline daha iyi uyum sağladığı görülmüştür (Ugraskan vd., 2022). Sözde ikinci derece modelin uygunluğunu Şekil 7'deki grafikler de doğrulamıştır. Tablodaki veriler değerlendirildiğinde, adsorpsiyon işleminin muhtemelen kimyasal yüzey reaksiyonuna dayandığını ancak sözde birinci dereceden modelin istatistiksel analiz değerlerine göre, bu yüzey reaksiyonunda fiziksel etkileşimlerin de rol oynayabileceği sonucuna varılabilir. Adsorpsiyon kinetiğinin heterojen doğasını temsil eden Elovich modeli ise sözde ikinci derece kinetik modelden sonra diğer modellere göre daha düşük bir hata değeri sergilemiştir.

Bununla birlikte, adsorpsiyon işleminde katkısı olan olası mekanizmalar hakkında fikir sahibi olabilmek için partikül içi difüzyon modelinden yararlanıldı. Her iki konsantrasyon için de partikül içi difüzyona ilişkin grafikler Şekil 8'de sunulmuştur. $t^{1/2}$ 'ye karşı çizilen q_t grafiği lineer ise, partikül içi difüzyon söz konusudur ve grafik çizgisi orijinden geçiyorsa, o zaman partikül içi difüzyon tek hız sınırlayıcıdır (Mohammed vd., 2018). Sunulan şekilde her iki konsantrasyon için de grafiğe ait çizgilerin orijinden geçmediği görülmektedir. Bu durum Safranin T'nin BC-AA yüzeyine adsorpsiyonunda partikül içi difüzyonun tek hız sınırlayıcı adım olmadığı, hızı kontrol edebilecek diğer mekanizmaların da olduğu şeklinde yorumlanabilir.

SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada, organik kompozit atık ürünlerden elde edilen verimli, ekonomik olarak uygulanabilir ve yeşil adsorban materyali, asetik asit ile aktive edilerek hazırlandı. Hazırlanan biyokömür sulu çözeltiden Safranin T boyasının giderimi için kullanıldı. Çalışılan deneysel parametrelere ait optimum değerler; pH: 7, adsorbant dozajı: 0,6 g/L, adsorpsiyon denge süresi: 360 dakika olarak belirlendi. Kesikli deneyler sırasında elde edilen denge verileri Langmuir, Freundlich, Temkin ve DR gibi farklı izoterm modelleri ile analiz edilmiştir. En iyi uyumu sağlayan Langmuir izoterminin tek tabakalı adsorpsiyon kapasitesi (q_{max}) 35,60 mg/g olarak hesaplanmıştır. Kinetik çalışmalardan elde edilen veriler ile değerlendirilen dört modelden en iyi uyumu sözde ikinci dereceden kinetik model sağlamıştır. Hazırlanan adsorban ile Safranin T giderimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma organik atıklardan biyokömür üreterek çevresel iyileştirmeler için atık yönetimine katkıda bulunmak, karbon tutmak ve sera gazlarını azaltarak küresel ısınmayı yavaşlatabilmek için organik atıkların değerlendirilmesine alternatif bir yöntem olarak ilerideki çalışmalara bir temel oluşturacaktır.

Teşekkür: Bu çalışma için laboratuvar altyapısını kullanmama izin veren Sinop Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölüm Başkanlığına teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Almarri, A. H. (2021). Chitosan composites for thionine dye adsorption. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-12.
- Azimvand, J., Didehban, K. & Mirshokraie, S. A. (2018). Safranin-O removal from aqueous solutions using lignin nanoparticle-g-polyacrylic acid adsorbent: Synthesis, properties, and application. *Adsorption Science & Technology*, 36(7-8), 1422-1440. <https://doi.org/10.1177/0263617418777836>
- Chien, S. H. & Clayton, W. R. (1980). Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(2), 265-268. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x>
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D. & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195-213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- Dubinin, M. M., Zaverina, E. D. & Radushkevich, L. V. (1947). Sorption and structure of active carbons. I. Adsorption of organic vapors. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 21(3), 151-162.
- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385-471.
- Gümüş, D. (2021, Şubat). Kav Mantarı (*Fomes fomentarius* L. ex Fr.) Kullanılarak Sulu Çözeltilerden Bazik Kırmızı 2 Boyasının Giderimi. Black Sea Summit 5th International Applied Science Congress, 27-35.

- Hamzenejad Taghliabad, R., Sepehr, E., Khodaverdiloo, H., Samadi, A. & Rasouli-Sadaghiani, M. H. (2020). Characterization of cadmium adsorption on two cost-effective biochars for water treatment. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(12), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05477-6>
- Ho Y.S. & McKay G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Hu, H., Lin, C., Zhang, Y., Cai, X., Huang, Z., Chen, C., Qin, Y. & Liang, J. (2019). Preparation of a Stable Nanoscale Manganese Residue-Derived FeS@ Starch-Derived Carbon Composite for the Adsorption of Safranin T. *Nanomaterials*, 9(6), 839. <https://doi.org/10.3390/nano9060839>
- Hu, X., Xue, Y., Long, L. & Zhang, K. (2018). Characteristics and batch experiments of acid-and alkali-modified corncob biomass for nitrate removal from aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19932-19940. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2198-5>
- Lagergren, S. K. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens*, 24, 1-39.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40 (9), 1361-1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Li, R., Wang, J. J., Gaston, L. A., Zhou, B., Li, M., Xiao, Wang, Q., Zhang, Z., Huang, H., Liang, W., Huang H. & Zhang, X. (2018). An overview of carbothermal synthesis of metal–biochar composites for the removal of oxyanion contaminants from aqueous solution. *Carbon*, 129, 674-687. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.12.070>
- Li, W., Xie, Z., Xue, S., Ye, H., Liu, M., Shi, W. & Liu, Y. (2021). Studies on the adsorption of dyes, Methylene blue, Safranin T, and Malachite green onto Polystyrene foam. *Separation and Purification Technology*, 276, 119435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119435>
- Mašek, O., Budarin, V., Gronnow, M., Crombie, K., Brownsort, P., Fitzpatrick, E. & Hurst, P. (2013). Microwave and slow pyrolysis biochar—Comparison of physical and functional properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.015>
- Mohammed, N. A., Abu-Zurayk, R. A., Hamadneh, I., & Al-Dujaili, A. H. (2018). Phenol adsorption on biochar prepared from the pine fruit shells: Equilibrium, kinetic and thermodynamics studies. *Journal of environmental management*, 226, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.033>
- Novais, R. M., Caetano, A. P., Seabra, M. P., Labrincha, J. A., & Pullar, R. C. (2018). Extremely fast and efficient methylene blue adsorption using eco-friendly cork and paper waste-based activated carbon adsorbents. *Journal of cleaner production*, 197, 1137-1147. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.278>
- Samsami, S., Mohamadizani, M., Sarrafzadeh, M. H., Rene, E. R., & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process safety and environmental protection*, 143, 138-163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>
- Sharafinia, S., Farrokhnia, A., & Ghasemian, E. (2021). Comparative Study of Adsorption of Safranin o by TiO₂/Activated Carbon and Chitosan/TiO₂/Activated Carbon Adsorbents. *Physical Chemistry Research*, 9(4), 605-621. <https://doi.org/10.22036/PCR.2021.274568.1889>
- Shirvanimoghaddam, K., Czech, B., Abdikheibari, S., Brodie, G., Kończak, M., Krzyszczyk, A., Othman, A. & Naebe, M. (2021). Microwave synthesis of biochar for environmental applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105415. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105415>
- Suleman, M., Zafar, M., Ahmed, A., Rashid, M. U., Hussain, S., Razzaq, Mohidem, N.A., Fazal, T., Haider B. & Park, Y.K. (2021). Castor Leaves-Based Biochar for Adsorption of Safranin from Textile Wastewater. *Sustainability*, 13(12), 6926. <https://doi.org/10.3390/su13126926>
- Temkin M.I. (1941). Adsorption equilibrium and the kinetics of processes on nonhomogeneous surfaces and in the interaction between adsorbed molecules. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 15, 296-332.
- Tran, T. H., Le, A. H., Pham, T. H., Nguyen, D. T., Chang, S. W., Chung, W. J., & Nguyen, D. D. (2020). Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste. *Science of the Total Environment*, 725, 138325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138325>

Ugraskan, V., Isik, B., Yazici, O., & Cakar, F. (2022). Removal of Safranine T by a highly efficient adsorbent (Cotinus Coggygria leaves): Isotherms, kinetics, thermodynamics, and surface properties. *Surfaces and Interfaces*, 28, 101615. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101615>

Wang, B., Gao, B., & Fang, J. (2017). Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical reviews in environmental science and technology*, 47(22), 2158-2207. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1418580>

Weber Jr, W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the sanitary engineering division*, 89(2), 31-59.

Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: a review. *Environmental pollution*, 252, 352-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.03.2022
Kabul Tarihi : 19.07.2022

Received Date : 17.03.2022
Accepted Date : 19.07.2022

YAYLA ALANLARINDA YAPILAŞMANIN İNCELENMESİ: BOLU ATYAYLASI ÖRNEĞİ

INVESTIGATION OF CONSTRUCTION ON SUMMER PASTURELANDS: CASE OF BOLU ATYAYLASI

Muzaffer Can İBAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-3341-1338)
Muhammed Eren KILIÇ^{2,3} (ORCID: 0000-0002-6390-4870)

¹ Mersin Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

² Mersin Üniversitesi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Mersin, Türkiye

³ Bolu Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, Milli Emlak Müdürlüğü, Bolu, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muzaffer Can İBAN, caniban@mersin.edu.tr

ÖZET

Bu makale, Bolu İli Merkez İlçesi'ne bağlı Atayaylası yöresindeki yapılaşmanın zamansal değişimini yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verilerini ve coğrafi bilgi sistemlerini kullanarak tespit etmeyi, buna bağlı olarak da yayla alanlarının yönetimi konusunda arazi politikaları üzerine bir tartışma sunmayı hedeflemiştir. Günümüzdeki fiili arazi kullanımına baktığımız zaman, yayla varlıkları üzerinde özellikle konut ve turizm tesisi olarak kullanılan çok sayıda yasal olmayan yapılaşma gözlemlenmektedir. Anayasamızın 45. maddesinde, devletin çayır ve meraların amaç dışında kullanılmasını ve tahribini önleme sorumluluğundan bahsedilmektedir. Bununla birlikte, Mera Kanunu gereğince Türkiye'de yayla varlıkları üzerinde inşaat yasağı kesindir. Bu yasal hükümlere karşın, Atayaylası yöresinin 2014, 2018 ve 2021 yılları için hazırlanan haritaları değerlendirildiğinde, yapılaşmanın ve yayla içi yol üretiminin bu süre zarfında iki kattan fazla bir oranda arttığı, 2018 yılında yürürlüğe konulan İmar Barışı'nın bu yapılaşmayı ivmelendirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yasaların güvence altına aldığı kamu orta mallarından olan yaylaların, kamu yararına uygun ve ekolojik sürdürülebilirlik gözetilerek kullanılması gerekmektedir. Ancak bu çalışmanın bulguları, Türkiye'de bu durumun tersi yönde bir eğilimde olduğu fikrini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Arazi yönetimi, kaçak yapılaşma, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri, kamu orta malları

ABSTRACT

The purpose of this article is to use high-resolution remote sensing data and geographic information systems to determine the temporal variation of construction on summer pasturelands in the Atayaylası region of Bolu Province, Turkey and to present a discussion on land policies for pastureland management as a result. By taking the current land use into consideration, a large number of constructions are observed on the pasture assets, especially those used as housing and tourism facilities. The responsibility of the state to prevent the misuse and destruction of pasturelands is mentioned in Article 45 of the Turkish Constitution, and the Pasture Law prohibits absolutely any construction on pasture assets in Turkey. Despite these legal provisions, maps of the Atayaylası region prepared for the years of 2014, 2018 and 2021 show that construction and road production on pasturelands increased by more than twice during this period, and that the Informal Housing Formalization Amnesty, which took effect in 2018, has accelerated these construction activities. Pasture-qualified lands, which are among the public common goods guaranteed by the law, should be used for the public benefit and ecological sustainability. However, the findings support the idea that this trend is in the opposite direction in Turkey.

Keywords: Land management, illegal construction, remote sensing, geographic information systems, public common goods

GİRİŞ

Yaylacılık (pastoralizm), yüksek rakımlı dağ sıralarında, bozkırlarda veya ormanlık alanlarda faaliyet göstermekte uzmanlaşmış kapsamlı bir hayvansal üretim sistemidir. Bir arazi kullanımı biçimi olan yaylacılık, dünyanın toplam yüzölçümünün yüzde 25’inden fazla bir araziyi kaplar ve dünya çapında yüz milyonlarca insanın yaşamını doğrudan destekler (Asner vd. 2004). Geniş otlatma sistemleri aracılığıyla, hayvancılık ve mahsul çiftçiliğinin zor olduğu ya da yüksek girdi maliyetleri gerektirdiği coğrafyalarda, et ve süt üretiminin gerçekleştirilmesine yardımcı olan ekosistemlerdir. Bu doğal alanların ortak kullanımı, yetiştirilen hayvan ırklarının gelişimini ve canlı hayvan hareketliliğini olanaklı kılar (Kaufmann vd. 2018). Yaylacılığı yasal olarak güvence altına alan ülkelerde dahi, yerleşim alanlarının ya da endüstriyel gelişmenin yaylacılık faaliyetlerine baskısı engellenememektedir (Manzano, 2015). Bunun temelinde, yaylacılığı yanlış ya da eksik bir şekilde ele alan politikalar bulunmaktadır. Yaylacılıkla uğraşan nüfusun hareketliliğini sağlamak yerine, hükümetler bu alanlardaki sermaye girişimlerinin ya da bireylerin yasal olmayan parçalama, çevreleme veya özel mülkiyete dönüştürme çabalarına göz yumabilmektedir. Ortak bir şekilde bu alanları kullanan kırsal nüfus yerleşik yaşam düzenine özendirilirken, bu alanların sanayi, madencilik, konut ya da tarımsal üretim amaçlı kullanımına izin verilebilmektedir. Oluşan bu baskılar, yaylaların daha çok bozunumunu, kişiler arası çıkar çatışmasını ve yaylacılık faaliyetlerinden elde edilen gelirlerin düşmesini beraberinde getirmiştir (FAO, 2022).

Bahsedilen bu sorunların çoğu, Türkiye’de de gözlemlenmektedir. Yayla vasfını kaybettirecek derecede arazi kullanımı değişimi, yayla varlığı üzerine kaçak yapılaşma faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi, yayla yollarının genişlemesi gibi sorunlar literatürde irdelenmiştir (Başer, 2019; Cin, 2019; Döner, 2021a, 2021b). Bu çalışmada, Bolu İli Merkez İlçesi sınırları içinde kalan Atyaylası yöresindeki yaylacılık faaliyetlerinin müstakil konut üretimi ile bozunumu ele alınmaktadır. Çalışma ilk olarak yayla varlığının niteliğini açıklayan “kamu orta malları” üzerindeki literatürü uluslararası bir boyutta tartışmaktadır. Daha sonra, Türkiye’deki yayla ve yaylacılık kavramlaşmalarının, mülkiyet ve kullanım eksenindeki hukuki olarak evrimini, karşılaşılan sorunları incelemektedir. Örnek çalışma alanı için yüksek çözünürlüklü uydu verilerinden ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) araçlarından yararlanılmış olup, Atyaylası bölgesindeki yapılaşma değişimleri nicel olarak izlenmiştir. Literatür araştırması ve çalışmadan çıkarılan dersler ışığında, Türkiye için yasalara uygun ve sürdürülebilir bir yayla alanları yönetimi adına tespitler ve öneriler sunulmuştur.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kamu Orta Mallarının Mülkiyeti ve Kullanımı Üzerine

Sanayi öncesi çağlarda, günümüzün gelişmiş ekonomilerini oluşturan ülkelerdeki arazilerin çoğu münhasır özel mülkiyet olarak değil, yılın en azından bir bölümünde toplumun ortak kullanımında bulunmaktaydı. Bu sistem, “ortak/müşterek mülkiyet” adıyla anılmaktaydı ve bu mülkiyet biçimine konu olan araziler ya da kaynaklar ise “kamu orta malları” adıyla nitelendirilmekteydi (Clark, 1998). Hardin (1968), ortak mülkiyete konu olan doğal kaynakların kontrolsüz, herkesin kişisel menfaati için ve yanlış kullanımının bir tür “trajediye” yol açacağını varsayıyordu. Bu kaynakların, sıkı bir devlet kontrolüne tabi tutulmasını ya da özel mülkiyete dönüştürülmesini savunuyordu. Hardin’in bu görüşüne itirazlar da vardı. Örneğin Ciriacy-Wantrup ve Bishop (1975), orta malı ve ortak mülkiyet kavramlarının Roma Hukuku’nu esas alan hukuk rejimlerinde yerleşik bir tanıma sahip olduğunu, orta mallarının özel mülkiyet biriktirme aracına dönüştürülemeyeceğini, ortak mülkiyete konu olan arazilerin (*res communes*), sahipsiz mal/kaynak (*res nullius*) olarak değerlendirilemeyeceğini öne sürmüşlerdir.

Ostrom (1990) ise kamu orta mallarını, “Ortak Kaynaklar Havuzu” (OKH) tanımı ile ele almıştır. Ciriacy-Wantrup ve Bishop’un (1975) itirazlarına destek olacak şekilde, ortak mülkiyetin özel mülkiyete dönüştürülmesinin çok zor olduğunu, ortak mülkiyete konu olan kaynakları kullanan toplumların geleneksel olarak geliştirmiş olduğu bir kurallar bütünü var olduğunu, bir kaynağın herkes tarafından erişilebilir ve kullanılabilir bir büyüklükte olmasının, belirli kişileri bu kaynaktan uzak tutmayı olanaksızlaştıracağını, dolayısıyla ortak mülkiyetlerin bir nevi OKH olarak değerlendirilmesi gerektiğini öne sürmektedir. Ostrom’a göre kadimden gelen kurallar; kaynakların kimin erişimine açık olacağını belirleme, kaynaklardan hangi ölçüde yararlanılacağını saptama, bu kullanımın nasıl izleneceği, kullanım sınırını aşanların karşılaşıacağı yaptırımların belirlenmesi ve anlaşmazlıkların çözüme

kavuşturulması gibi konuları irdelemektedir. Ostrom, OKH tanımını anlatırken, Olson'un (1965) "kolektif eylemlerde bulunma mantığını" kullanarak savını desteklemeye çalışmıştır. OKH kapsamında bulunan arazilerin ve kaynakların, toplum gönenci adına daha fazla fayda oluşturduğunu savunan Ostrom burada, Olson'un adres gösterdiği (1965) "faydalanan grupların kendi grup çıkarlarını desteklemek için daha fazla eylemde bulunma eğilimini" atıflamaktadır. Başka bir deyişle, eğer bir grubun üyelerinin ortak bir çıkarı ya da amacı varsa ve bu amaca ulaşıldığında grup üyelerinin hepsi daha iyi durumda olursa, bireylerin mantıksal olarak toplu hareket etmeyi tercih edecekleri sonucuna varılmaktadır. Buradaki kullanıcı grubu, bir veya birden fazla kamu orta malından fayda sağlayan, onların bakımını yapan, elde edilen bu faydaları ortak olarak paylaşan, resmi ya da gayri resmi olarak organize olmuş kişileri ifade etmektedir (Coleman, 2011).

OKH dahilinde ele alınan doğal kaynaklar ve araziler şayet özel mülkiyete konu olsaydı, topluluğun genelinin bunlardan faydalanması beklenemezdi. Bu kaynaklar ve araziler, bireysel çıkarlara ya da faydaya konu olduğunda toplum faydasından bahsedilemez. OKH tanımını benimseyen literatür, gelişmekte olan ya da az gelişmiş ülkelerdeki düşük gelir gruplarının bu doğal kaynaklardan ve ortak mülkiyetteki arazilerden daha fazla gelir elde ettiğini, onlara daha çok ihtiyaç duyduğunu, bu grupların bu varlıklar üzerinde daha fazla vakit harcadığını, varlıkların kullanımının çevreye olan etkilerini daha hassas bir şekilde gözetlediğini savunmaktadır (Adhikari, 2005). Bu bağlamda kamu orta malları, her zaman müşterek bir yaşam biçimini temsil etmiştir. Özel kısıtlamalardan uzak tutulan ve nesiller boyunca aktarılan toplumsal kazançları ifade etmektedir. Dolayısıyla, gelecek nesiller için muhafaza edilen bu kaynakların, halkın demokratik onayı olmadan satılması, ticarileşmesi ve her türlü özel mülkiyete konu edilmesi yanlış bir tercih olacaktır. Kamu orta malları, o yörede yaşayan ama bu malların özel mülkiyetini elinde bulundurmayan ortakların belirli erişim ve kullanım haklarına sahip olmasını sağlar. Bu haklar, yeterli toprağa sahip olmayan insanların hayvan otlatma, hayvanlarını barındırma, yakacak toplama vb. ihtiyaçlarına ilişkindir (Standing, 2019). Bu ortak haklar, özel mülkiyete konu olan taşınmazlar üzerindeki elbirliği ya da paylı mülkiyet ile karıştırılmamalıdır. Kamu orta mallarının tespit ve tescili, toplumu temsilen devlet adına yapılmaktadır ve ortaklara kullanım hakları tahsis edilmektedir (Paasch, 2008). Devletin bu arazileri ve kaynakları kamunun kullanımına tahsis etmesi, devletin mülkiyetini elinde bulundurduğu alanların kamu tarafından kullanımını sağlaması anlamına gelmektedir. Burada devletin, toplum yararına mülkiyeti kendi adına tespit ve tescil etmesi, devletin bu varlıkları toplum yararına aykırı bir şekilde kullanacağı, tasarruf edeceği ya da toplumu bu kaynaklardan uzaklaştırabileceği durumlardan toplumu korumayı amaçlamaktadır. Özel mülkiyetin esaslarından olan "mülkün sahibi olmayanları hariç tutabilme/dışlama" özelliği, kamu orta malları için geçerli olmayıp, bu varlıklar için "benim mülküm, senin mülkün değil" söyleminde bulunulamaz (Grear, 2003). Ülkeler, Ciriacy-Wantrup ve Bishop'un da işaret ettiği gibi (1975) "sahipsiz yerler" ile kamu orta mallarının karıştırılmaması için bu varlıkların sınırlarını tespit ettiği ve bu geometrik sınırların özel sicillere tescil ettiği kadastral sistemlere sahiptir. Bazı az gelişmiş ülkelerde, bu sınırların detaylı ve doğru kadastral ölçülerle oluşturulmamasından ötürü "bulanık" kaldığı, kamu orta mallarının tahsisi ya da özel mülkiyet ile ayırt edilebilmesi konularında kafa karışıklıklarının yaşandığı raporlanmaktadır (Robinson, 2008).

Bu çalışmada irdelenen kamu orta malları, mera, yayla ve kışlak gibi doğal arazileri kapsamaktadır. Mera ve yaylak olarak kullanılan yayla alanları, günümüze değin arazi bozunumunun yoğun bir şekilde gözlemlendiği, çevre yönetimi ve gıda güvenliği için önem arz eden sorunların küresel ölçekte yaşandığı alanlardır. Geleneksel yayla yönetiminin kökleri, yaylaların taşıma kapasitesinin veya hayvan sayısı ile yaylanın yenilenme kapasitesinin arasındaki dengenin hesaplanmasına dayanmaktadır (Behnke ve Scoones, 1993). Bununla birlikte yaylalar, bitki örtüsünün büyümesini engelleyen büyük iklim değişiklikleri nedeniyle kırılgandır ve doğası gereği kararsızdır (Swift ve Mearns, 1993). Çevresel hassasiyeti yüksek olan bu yayla alanlarının, sürdürülebilir arazi yönetimi ve kullanımı çerçevesinde yayla vasfının korunması, başka arazi kullanımı biçimlerinden uzak tutulması ve bir zenginlik dağıtım aracı olarak kullanılmaması zorunluluktur. Batılı hukuk rejimlerinde, "kişiye doğuştan verilmesi gereken doğal bir hak" olarak tanımlanan özel mülkiyet hakkının ilk savunucularından olan İngiliz düşünür John Locke, "Tanrı, dünyayı insanlara ortak olarak bahşetti" ifadesini kullanmıştır. Buna ek olarak Locke, özel mülkiyetin sınırsız olarak dağıtılamayacağını, arazinin nüfusa oranla kıt bir kaynak olduğu durumlarda, müşterek kullanıma konu olan arazilerin mülkiyet hakkının, parası ve nüfuzu çok olanların lehine dağıtılmaması gerektiğini, diğer ortakların da (toplumun diğer fertlerinin de) rızası olmadan bu arazilerin çevrelenip kapatılmasının yanlış olacağını düşünmektedir (Purdy, 2005).

Türkiye'de Kamu Orta Mallarının Yönetimi

Türkiye'deki kamu orta mallarının yönetimini incelemeye, Osmanlı Dönemi'nin son yıllarından başlamakta fayda vardır. Osmanlı Devleti, Tanzimat Fermanı'nı ilan ettikten sonra, fermanın içeriği itibarıyla devlet yönetimindeki bazı hususları, çıkarılacak olan yeni kanunlarla yeniden düzenlemeyi hedeflemiştir. Bu düzenlemelerden bir tanesi

de Osmanlı Dönemi'ndeki en önemli ve stratejik varlık olan arazilerin düzenlenmesi üzerinedir. 6 Haziran 1858'te yürürlüğe giren Arazi Kanunnamesi, Tanzimat Dönemi'nde öne sürülen yenilikçi anlayışı barındıran, hazırlanma tekniği ve dili dikkate değer bir hukuk metnidir. Kanunnamede, Osmanlı topraklarındaki araziler beş grupta sınıflandırılmış olup, kamu orta malları "metruk" olarak adlandırılıp, devlet hazinesi kapsamında değerlendirilmiştir (Aytekin, 2005). Böylece, kamunun yararına ayrılmış bu yerler herhangi bir özel mülkiyete konu edilmemiştir. Bu sayede, bu alanların "kadimden beri" kullanana tahsis edilmesi anlayışı, bu kanunname ile ilk kez yasal bir altlık kazanmıştır.

Cumhuriyetin ilanı ile birlikte mera, yaylak ve kışlak alanları ile ilgili hükümlere ilk yer veren kanun, 1924 yılında yürürlüğe giren 442 sayılı Köy Kanunu'dur. Cumhuriyetin ilanı sonrası özel mülkiyetin yaygınlaşmasına rağmen, mera, yaylak ve kışlaklarla ilgili anlayış 1848 Arazi Kanunnamesi ile aynı tutulmuştur. Bu alanlar, kanunun 6. ve 8. maddeleri gereği devlet güvencesi altına alınmış ve kamunun ortak malı olarak yakınındaki köyün fertleri tarafından faydalanılacağı belirtilmiştir. Bu faydanın tahsisi, o alanı kullandığını belgeleyen yerleşim yeri yönetimi lehine sağlanmış olup, bu belgeleri Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) toplamıştır. Böylece, TKGM yıllar boyunca bu belgeleri kullanarak mera, yaylak ve kışlak alanların tespit ve tescil işlemlerini gerçekleştirmiştir (Döner, 2021b). Yayla alanlarının genel sınırları da bilirkişilerin tahditle ilgili beyanları göz önünde bulundurularak yayla sınırı olarak kabul görmüş ve bu sınırlar 1:100.000 ölçekli haritalara "genel yayla sınırı" olarak işlenmiştir. Özel mülkiyete konu olan taşınmazların kadastro sununun yapımında, bu kamu orta mallarının sınırlarının bozulmaması için gerekli özen gösterilmiştir. 1930 yılında yürürlüğe giren 1580 sayılı Belediyeler Kanunu'nun 4. ve 159. maddeleri, belediye mücavir sınırları içerisinde kalan yaylaların belediye mülkiyetine tescil edilmesini hükmetmiştir. Yaylaların arazi kullanımına ilişkin tanımları yapan ilk kanun ise 1945 yılında yürürlüğe giren 753 sayılı Çiftçiyi Topraklandırma Kanunu'dur. Bu kanunun tanımlar kısmında yaylalar (meralar) için "üzerinde tarımsal faaliyet yapılmayan, hayvan otlatılan araziler" ifadesinin kullanılmasıyla, tarım arazileri ve yaylalar arasında keskin bir arazi kullanımı farklılığı tasvir edilmeye çalışılmıştır. 6831 sayılı Orman Kanunu da orman niteliğini kaybetmiş ve yaylacılık faaliyetleri için kullanılan arazilerin orman sınırları dışına çıkarılmasını hükmetmiştir. Aynı zamanda, orman sınırları içinde kalan yayla alanları için de çiftçiye ormana zarar vermeden yaylaya erişim hakkı verilmiştir.

1987'de yürürlüğe giren 3402 sayılı Kadastro Kanunu'nun 16. maddesinde kamu mallarının tanımı, sınıflandırılması, tespit ve tescil durumu açıklanmıştır. Bu maddenin (b) bendinde mera, yaylak, kışlak, otlak, harman ve panayır yerleri gibi kamunun kadimden beri paralı ya da parasız olarak yararlandığı arazilere "orta malları" ismi verilmiş, tanık beyanı, bilirkişiler ve ispatlayıcı belgeler değerlendirilerek sınırlandırılmasını, yüzölçümlerinin hesaplanmasını, parsel numarası verilerek özel siciline kaydedilmesi hükmü verilmiştir. Bu sınırlandırma, özel mülkiyet lehine tescil amaçlı değildir. Bu bağlamda, orta mallarının özel mülkiyete konu olamayacağı hükmü, aynı zamanda sınırlandırma ve tescil ile ilgili hükümleri kadastral anlamda belirginleşmiştir. Ancak, yaylanın kullanım vasfı konusunda arazi yönetimi açısından sorunların giderilmesi için kadastral anlayış tek başına yeterli değildir. Yayla varlığının tespiti ve kayıt altına alınması hukuki ve geometrik anlamda Kadastro Kanunu ile belirlenmişken, yaylaların korunması ve kullanım amaçlarının belirlenmesi hususunda hukuki altlığı 1998'de yürürlüğe giren 4342 sayılı Mera Kanunu oluşturmuştur. 2004 yılındaki düzenlemeler ile mera, yaylak ve kışlaklarla ilgili denetleme ve düzenleme yetkisi İl Valilikleri tarafından kurulmuş olan Mera Komisyonlarına verilmiştir. Bu komisyonlar tarafından oluşturulan teknik ekiplerle, Mera Kanunu'nun temel hedefi olan yaylaların ıslahı ve sürdürülebilirliğini sağlama çalışmaları hız kazanmıştır (Avcıoğlu, 2012; Cevher vd. 2008).

Mera Kanunu'nun 4. maddesinde, yaylaların devletim hüküm ve tasarrufu altındaki orta mallardan sayılarak özel mülkiyete konu olamayacağı, kullanım haklarının en az bir yerleşim birimine tahsis edileceği, sınırlarının daraltılamayacağı açık bir şekilde belirtilmiştir. Ek olarak, yaylanın sürdürülebilirliğini bozmayacak bir şekilde, özellikle turizm amaçlı olarak, tahsis yoluyla kullanım hakkı kiralanabilmektedir. Özel arazi kullanımı olan yaylaları ilgilendiren bu kanun, bir özel kanun niteliği taşımaktadır ve yaylaların özel mülkiyete konu olamayacağı ilkesi Türk Medeni Kanunu'nun 715. maddesindeki "Sahipsiz yerler ile yararı kamuya ait sular ile kayalar, tepeler, dağlar, buzullar gibi tarıma elverişli olmayan yerler ve bunlardan çıkan kaynaklar, kimsenin mülkiyetinde değildir ve hiçbir şekilde özel mülkiyete konu olamazlar" hükmü ile bağdaşır. Yaylalar üzerinde tahsisin kurulması da kaldırılması da kamu yararına dayanmaktadır.

Günümüzdeki fiili arazi kullanımına baktığımız zaman, yayla varlıkları üzerinde özellikle konut ve turizm tesisi olarak kullanılan çok sayıda yasal olmayan yapılaşma gözlemlenmektedir. Anayasamızın 45. maddesinde, devletin yaylaların amacı dışında kullanılmasını ve tahribini önleme sorumluluğundan bahsedilmektedir. Bununla birlikte, Mera Kanunu'nun 20. maddesi gereğince Türkiye'de yayla varlıkları üzerinde inşaat yasağı kesindir. Aynı kanunun

19. maddesine göre, bu tür tecavüzlerin engellenmesi adına yerel yönetimler bu yapılaşmaları tespit ve ihbar etme yükümlülüğüne sahiptir. Herhangi bir tecavüz söz konusu olduğunda, 3091 sayılı “Taşınmaz Mal Zilyetliğine Yapılan Tecavüzlerin Önlenmesi Hakkındaki Kanun” gereğince valilikler tarafından cezai işlemler uygulanır. 5237 sayılı Türk Ceza Kanunu’nun 154. maddenin ikinci fıkrasına göre “hakkı olmayan yere tecavüz” suçunun cezası altı aydan üç yıla kadar hapis ya da adli para cezasıdır. Ancak uygulamalarda genellikle bunun para cezası olarak uygulandığı, hatta bazı mahkemelerce beraat kararı dahi verildiği anlaşılmaktadır (Bölek, 2019; Demirtaş, 2018).

2018 yılında yürürlüğe giren ve kamuoyunda “imar barışı” olarak dile getirilen 7143 sayılı Kanun, 3194 sayılı İmar Kanunu’na Geçici 16. maddeyi ekleyerek imar düzenine aykırı yapıların “yapı kayıt belgesi” verilerek resmi kayıt altına alınmasını hedeflemiştir. Aralık 2017 tarihinden önce oluşturulmuş imara aykırı/kaçak yapıları kapsayan bu af kanunu, imara aykırılığın beyana esas tutulması sebebiyle vatandaş nezdinde daha fazla imara aykırılık üretme gibi bir sonucu beraberinde getirmiştir. Özellikle Karadeniz Bölgesi’ndeki yayla alanlarında, oradaki kırsal nüfusun yararına tahsis edilmiş yayla alanları sınırları içerisinde daha fazla konut ve ticari kullanım amaçlı kaçak yapı üretimi gerçekleşmiş, bu yapı üretimini gerçekleştiren kişiler yapı kayıt belgesi başvurularında bulunmuştur (İban, 2020; Özkaya Özlüer, 2018). İmar barışı ile ilgili kanun, devletin hüküm ve tasarrufu altındaki alanlarda görülen imara aykırı/kaçak yapılar için yapı kayıt belgesi başvurularını kabul etmeyi ve mevcut yüzölçümü üzerinden ecrimisil alınmaya devam edeceğini hükmetmiştir. Ancak, yayla alanları devletin hüküm ve tasarrufu altında olmasına rağmen kamu yararı gereğince tahsis edilebilen ve koruma altında olan özel alanlardır. Anayasa’da ve özel kanununda özel mülkiyete konu olamayacağı kesin bir dille belirtilen bu alanlarda üretilen kaçak yapılar için verilen yapı kayıt belgelerinin özel mülkiyet oluşturmaya yönelik bir kapsamı bulunmamaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın, 2017’den sonra inşa edilen kaçak yapıların tespitinin gerçekleştirilmesi için valiliklere talimat verdiği, valiliklerin de bu yapıları arazi gözlemleri ve hava fotoğrafları ile tespit ettiği bilinmektedir (İban, 2020). Bu yapılar için verilen yapı kayıt belgelerinin iptal edilmesine ve yanlış beyandan ötürü adli para cezası kesilmesine rağmen, bu kaçak yapılaşma deseninin fiili olarak yayla alanlarında hala varlığını sürdürdüğü, yıkım işlemlerinin kapsamlı bir şekilde yapılmadığı anlaşılmaktadır.

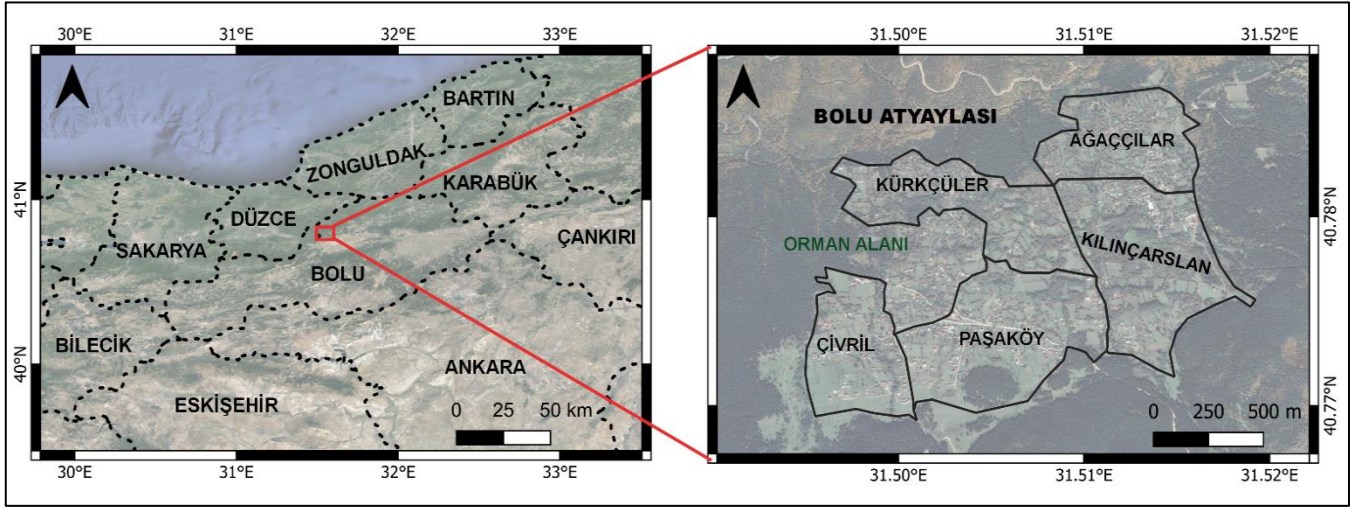
İmar barışı düzenlemesinde, devletin hüküm ve tasarrufu altındaki hazine arazileri üzerine inşa edilen kaçak yapılar için yapı kayıt belgesi verildiğinde, bu yapıların öncelikle ilgili Bakanlığa tahsis edilmesine ve öncelik yapı kayıt belgesi sahibinde olmak suretiyle bu yapıların kişilere satılmasına hükmedilmiştir. Ancak, bu yapıların özel mülkiyete konu olabilmesi için öncelikle imara açılması gerekmektedir. Yayla alanlarının imara açılmayacağı ve özel mülkiyete konu olamayacağı hükmü açıktır. Bir mera alanının mera vasfından çıkarılabilmesi için tahsis amacının değiştirilmesi gerekmektedir. Mera Yönetmeliği’nin 8. maddesine göre bir yaylanın tamamının ya da bir kısmının tahsis amacının değiştirilmesi için maden, petrol, jeotermal kaynak arama faaliyetleri, turizm yatırımları, doğal afet, ülke güvenliği, çeşitli kamu yatırımları, köyün mecburi ihtiyaçlarını karşılama gibi amaçlara yönelik arazi taleplerinin bulunması gerekmektedir (Uzun vd. 2022). Dolayısıyla, yayla sınırları içinde gerçek kişilerin kendi tasarrufu ile oluşturduğu yapıların, bu amaçlara hizmet etmemesinden ötürü, bu yapıların kapladıkları alanların yayla vasfının sonlandırılabilmesi kanunen olanaklı değildir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Bolu İli Merkez İlçesi’ne bağlı Atyaylası yöresinde bulunan Çivril, Paşaköy, Kılınçarslan, Ağaççılar ve Kürkçüler köylerindeki yayla alanları incelenmektedir. Yörenin coğrafi konumu 40.77° – 40.80° kuzey enlemleri, 31.49° – 31.52° doğu boylamları arasında bulunmaktadır (Şekil 1). Yayla alanlarının genel sınırları, Bolu İli Milli Emlak Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. Mera vasıflı yayla alanlarının yüzölçümü 208.7 hektardır.

Atyaylası yöresi, Mengen Çayı’ndan başlayan ve Zonguldak sahiline uzanan, küçükbaş hayvanların yazın sıcağından uzaklaşması için kullanılan ve yoğun bir otlatma kapasitesi bulunan Batı Karadeniz yaylalarından biridir (Alagöz, 1993). Atyaylası yöresi, özellikle 2018 İmar Barışı sürecinden sonra, Bolu kent merkezine yakınlığından ötürü yoğun yapılaşmaya maruz kalmış bir alandır. Dolayısıyla, bu yörenin uzaktan algılama verileri ve CBS araçlarıyla yapılaşma eğiliminin izlenmesi bu çalışmada hedeflenmiştir. Atyaylası yöresi için, 2018 yılındaki İmar Barışı süreciyle birlikte ortaya çıkan kaçak yapılaşma eğiliminin etkilerini analiz edebilmek adına, sırasıyla 2014, 2018 ve 2021 yıllarına ait yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden faydalanılmıştır. Bu uydu görüntülerini açık erişimli olarak sunan Google Earth Pro yazılımı ile betonarme karkas yapılar ve mera içi yollar bu üç yıla ait görüntüler üzerinde ayrı ayrı sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırma sonucu oluşan vektör dosyalar QGIS CBS yazılımına aktarılmış, 2014, 2018 ve 2021 yıllarında Atyaylası’nda bulunan yapılar ve yolların ayrı ayrı haritası hazırlanmıştır. Haritaların hazırlanmasında WGS84 referans yüzeyi kullanılmıştır. Vektör dosyalar ile QGIS yazılımında 2014, 2018

ve 2021 yılındaki yapı sayısı ve yol uzunlukları her köy için ayrı ayrı hesaplanmış ve artış eğilimi nicel olarak sunulmuştur.



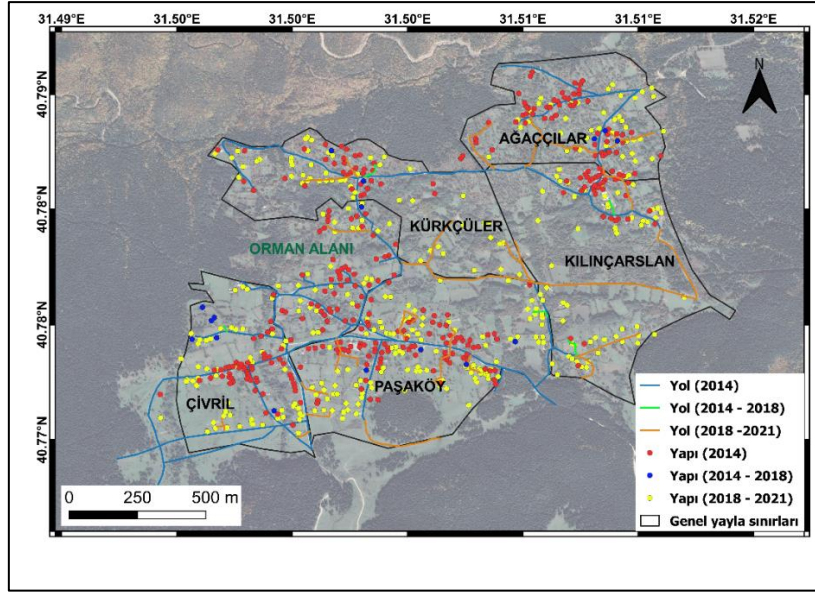
Şekil 1. Çalışma Sahası – Bolu Ataylası

BULGULAR

Yapılan çalışmaların neticesinde elde edilen 2014, 2018 ve 2022 yıllarına ait haritalar üzerinde CBS yazılımı kullanılarak, her bir yerleşim biriminde bulunan yapı sayısı ve yol uzunluğu hesaplanmıştır. Şekil 2'de 2014 yılına ait yapı ve yol durumu, 2014-2018 yılları arasında oluşan yapı ve yollar, 2018-2021 yılları arasında oluşan yapı ve yollar farklı renklerle gösterilmektedir. Bu hesaplamalara göre Ataylası yöresinde 2014 yılında bulunan 322 yapı, 2021 yılında 672'ye çıkmıştır. Bu da %108,7'lik bir artışa karşılık gelmektedir. Ataylası yöresinde yapılaşmanın en çok arttığı yerleşim birimi ise %168,8'lik artışla Kürkçüler olmuştur. En çok yapı barındıran yerleşim birimi ise Paşaköy'dür. Tablo 1'de gösterilen yapı sayısının zamansal değişimi bilgileri göz önünde bulundurulduğunda, tüm yerleşim birimlerinde 2014-2021 yılları arasında yaklaşık iki kata kadar yapılaşma artışı olduğu söylenebilir.

Benzer bir analiz ise 2014-2021 yılları arasında artış gösteren mera içi yolların uzunluğu için yapılmıştır. Tablo 2'de görüleceği üzere, Ataylası yöresinde 2014 yılında toplam 8846 metre mera içi yol uzunluğu hesaplanmıştır. Bu sayı, 2021 yılına gelindiğinde ise 13455 metreye yükselmiştir. Mera içi yol uzunluğunun en çok artış gösterdiği yerleşim birimi ise %139,5'lik artışla Kürkçüler'dir.

Sayısallaştırma çalışmalarında Ataylası yöresinde resmi yayla sınırları içinde kalmayan, ancak meralara komşu orman alanları içerisinde bulunan yol ve yapılar da tespit edilmiştir. Yapılar için %60,4, yollar için %16,9'luk bir artış bu orman alanlarında da gözlemlenmiştir. Ancak, bu alanlar üzerindeki yapılaşma ayrı bir çalışmanın tartışma konusu olabilir.



Şekil 2. Atyaylası Yapı ve Yol Durumu Değişimi Haritası

Tablo 1. Yapı Sayısının Zamansal Değişimi

	Yapı (2014)	Yapı (2018)	Yapı (2021)	2014- 2021 Artış (Adet)	2014- 2021 Artış (%)
Ağaççılar	59	62	102	+43	78.9
Kürkçüler	32	35	86	+54	168.8
Kılınçarслан	36	36	90	+54	150
Paşaköy	88	92	195	+107	121.6
Çivril	54	60	114	+60	111.1
Orman Alanı	53	53	85	+32	60.4
Toplam	322	338	672	350	108.7

Tablo 2. Yol Uzunluğunun Zamansal Değişimi

	Yol (m) (2014)	Yol (m) (2018)	Yol (m) (2021)	2014- 2021 Artış (m)	2014- 2021 Artış (%)
Ağaççılar	1388	1422	2235	+847	61
Kürkçüler	1217	1385	2225	+1008	139.5
Kılınçarслан	1024	1120	2452	+1428	82.8
Paşaköy	2058	2204	2981	+923	44.8
Çivril	1438	1502	1550	+112	7.8
Orman Alanı	1721	1721	2012	+291	16.9
Toplam	8846	9354	13455	4609	52.1

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu makale, Bolu İli Merkez İlçesi'ne bağlı Atyaylası yöresindeki beş adet yayla alanı üzerindeki yapılaşmanın zamansal değişimini uzaktan algılama ve CBS teknikleri kullanarak tespit etmeyi, buna bağlı olarak da yayla alanlarının yönetimi konusunda arazi politikaları üzerine bir tartışma sunmayı hedeflemiştir.

Bu çalışmadaki bulgulardan, Atyaylası yöresindeki yayla vasıflı arazilerde yapılaşmanın, özellikle İmar Barışı'nın yürürlüğe girdiği 2018 yılından sonra arttığı sonucuna varılmıştır. Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki yaylalar üzerine çalışan ve benzer yöntemleri kullanan diğer çalışmalarda bulgular ile bu çalışmanın bulguları örtüşmektedir. (Döner, 2021a; Başer, 2019). 2018 yılında yürürlüğe giren İmar Barışı düzenlemesinin, yeni bir yapılaşma fırsatı doğurduğunu ve gerçek kişilerin bu düzenlemeyi "daha fazla yapı üretme" şeklinde algılamasına neden olduğunu (İban, 2020) tespit eden çalışmalar bulunmaktadır. Türkiye'nin yayla vasıflı arazilerinin yayla vasfı dışında kullanılmasını engelleyebilecek düzenlemelerden yoksun olduğu söylenebilir. Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve saha gözlemleri sonucunda, yapı üreten yayla sakinlerinin yapılarının bulunduğu yerleri çevrelediği ve ileride çıkabilecek yasalardan beklentileri olduğu anlaşılmaktadır. Çevrelenen alanların artmasıyla daralan yayla

ekosisteminde, hayvanların otlayabileceği alan ve yem kaynakları azalmaktadır. Bu çalışma ve Karadeniz Bölgesi için yapılan diğer çalışmalardan, Türkiye’deki yayla alanlarının yönetiminin gerek küresel standartlara gerek meri mevzuata uygun yapılmadığı, bu konuda uygun bir arazi politikasının olmadığı, politik karar vericilerin ve uygulayıcıların bu fiili kullanımlara engel olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Türkiye’nin yayla alanlarını tespit ve tescil etmesi açısından herhangi bir kadastral altyapı sorunu bulunmamaktadır. 1848 Arazi Kanunnamesi ile birlikte “kadimden beri kullanılan ve kullanımı belirli kurallara dayalı olan” yayla arazilerinin özel mülkiyete konu olmaması ve bu kuralların yasal güvence altına alınması bakımından Türkiye Cumhuriyeti tarihi boyunca yasal metinler oluşturulmuştur. Bu bağlamda, resmi olarak Türkiye’deki yaylaların Ostrom’un (1990) tabiri olan OKH kapsamına alındığı ve Olson’un (1965) öngördüğü ortak fayda için kullanılmasının hükmedildiği sonucuna ulaşılabilir. Ancak, resmi olarak güvence altına alınmasına rağmen, fiili olarak yayla alanlarının özel mülkiyete konu edildiği, kamu otoritelerinin de bu girişimler karşısında somut adım atmayarak Anayasa’nın, Türk Medeni Kanunu’nun ve özel yasaların hükümlerini mutlak surette uygulamadığı anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, çalışmanın oluşturduğu haritalar neticesinde Bölek (2019) ve Demirtaş’ın (2018) açıkladığı cezai yaptırımların da caydırıcı ya da etkili olmadığı sonucuna ulaşılabilir.

Özetle, imara aykırı ve kaçak yapılaşmaları imar denetimi sistemi ve uzaktan algılama verileri ile takip ettiğini beyan eden merkezi yönetim ve taşra teşkilatları, bu alanların fiili olarak vasıflarının dışında kullanılmasını engelleyememektedir. Fiili olarak bu kaçak yapılaşmalar çoğunlukla arazi üzerinde varlığını korumaktadır. Yasaların güvence altına aldığı kamu orta mallarının, literatür araştırmasında öne sürüldüğü üzere kamu yararına ve ekolojik sürdürülebilirlik gözetilerek kullanılması gerekmektedir. Ancak Türkiye’de bu durum tersi yönde bir eğilimdedir. Yayla vasıflı arazilerin fiili olarak özel mülkiyete konu olduğu (*de facto*), yapı kayıt belgeleri ile bu fiili kullanıma yasal bir tanım verildiği, resmi olarak özel mülkiyete konu edilmese de serbest bir şekilde taşınmaz piyasasında bu yapıların el değiştirebilmesine olanak sağlandığı, yayla vasıflı arazilerin asıl kullanıcısı olan kırsal nüfusun hızla yerleşik düzene geçirildiği ve hayvancılık/yaylacılık faaliyetlerinden uzaklaştırıldığını söylemek mümkündür. İlerleyen süreçlerde, yaylalar üzerindeki kaçak yapıların da özel mülkiyete konu olmasını sağlayabilen bir mevzuat değişikliği, bu alanların mahalle haline getirilmesini sağlayarak yıkıcı sonuçları beraberinde getirebilir.

Mühendislik bilimlerinin kullandığı uzaktan algılama verileri ve CBS araçları yardımıyla yapılaşmanın değişimini irdelemek olanaklıdır. Üretilen haritalarla, Mera Kanunu’nda kesin bir dille yasaklanan yapılaşmanın sahada uygulandığı, vatandaşların yasaya uymayan fiillerde bulunduğu, karar vericilerin ve denetleyicilerin de vatandaşların bu fiillerden caydırılması yönünde somut bir adım atmadığını yorumlayabilmek olanaklıdır. Literatür taramasında da bahsedilen kamu yararı için mutlak surette korunması gereken kamu orta mallarından olan yayla vasıflı arazilerin, bu duruma neden maruz bırakıldığı ile ilgili nitel çalışmaların yürütülmesi zorunludur. Bu çalışmalar, sosyo-ekonomik gözlemlere dayandırılmalı ve mevzuatın uygulanışının performansını göz önünde bulundurmalıdır. İmar denetimi sisteminin yayla alanlarında nasıl çalışacağı mevzuata aykırı yapılaşmaya karşı ne tür eylemler oluşturulacağı, yayla alanlarına ilişkin arazi yönetimi politikaları oluşturulurken karar vericilerin ve akademisyenlerin gündemindeki en önemli başlıklar olmalıdır. Bir öneri olarak, yayla alanlarının sürdürülebilirliğini engellemeyecek ve yöre mimarisine uygun yayla evi örnekleri oluşturularak, bu örneklere uygun yapılaşma biçimleri devlet tarafından desteklenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya katkılarından ötürü Bolu Millî Emlak Müdürlüğü’ne teşekkür ederiz. Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı’nda devam eden 1. yazarın danışmanlığındaki 2. yazara ait yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

KAYNAKLAR

Adhikari, B. (2005). Poverty, property rights and collective action: understanding the distributive aspects of common property resource management. *Environment and Development Economics*, 10(1), 7–31. <https://doi.org/10.1017/S1355770X04001755>

Alagöz, C. A. (1993). Türkiye’de Yaylacılık Araştırmaları. *Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 2, 1–51.

- Asner, G. P., Elmore, A. J., Olander, L. P., Martin, R. E., & Harris, A. T. (2004). Grazing Systems, Ecosystem Responses, and Global Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 29(1), 261–299. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.29.062403.102142>
- Avcıoğlu, R. (2012). Türkiye Meraları ve Mera Kanununun Getirdikleri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1, 24–32.
- Aytekin, E. A. (2005). Hukuk, Tarih ve Tarihyazımı: 1858 Osmanlı Arazi Kanunnâmesi'ne Yönelik Yaklaşımlar. *Türkiye Araştırmaları Literatür Dergisi*, 5, 723–744.
- Başer, V. (2019). Yaylalardaki Arazi Kullanım Değişiminin Coğrafi Bilgi Sistemi İle Analizi: Giresun Örneği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 167–175. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.446264>
- Behnke, R. H. Jr., & Scoones, I. (1993). Rethinking range ecology: implications for rangeland management in Africa. In R. H. Jr. Behnke, I. Scoones, & C. Kerven (Eds.), *Rangeland Ecology at Disequilibrium: New Models of Natural Variability and Pastoral Adaptation in African Savannas*. Overseas Development Institute.
- Bölek, F. (2019). Hakkı Olmayan Yere Tecavüz Suçu (TCK m.154). Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Medipol Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Kamu Hukuku Bilim Dalı, İstanbul 255s.
- Cevher, C., Ceylan, İ., & Köksal, Ö. (2008). Türkiye’de Mera Kanunu Uygulamalarının Tarihsel Gelişimi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 17(1–2), 1–10.
- Cin, M. (2019, Eylül). İmar barışının yayla yerleşmeleri üzerindeki etkisinin uydu görüntüleri ile belirlenmesi: Giresun Karagöl Dağı örneği. Uluslararası Yaylacılık ve Yayla Kültürü Sempozyumu (s.127-134). Giresun Üniversitesi.
- Ciriacy-Wantrup, S. V., & Bishop, R. C. (1975). “Common property” as a concept in natural resources policy. *Natural Resources Journal*, 15, 713–727.
- Clark, G. (1998). Commons Sense: Common Property Rights, Efficiency, and Institutional Change. *The Journal of Economic History*, 58(1), 73–102. <https://doi.org/10.1017/S0022050700019896>
- Coleman, E. A. (2011). Common property rights, adaptive capacity, and response to forest disturbance. *Global Environmental Change*, 21(3), 855–865. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.03.012>
- Demirtaş, S. (2018). Hakkı Olmayan Yere Tecavüz Suçu (TCK m.154). *Ceza Hukuku Dergisi*, 13(36), 69–99.
- Döner, F. (2021a). Yayla alanlarındaki yapılaşma değişiminin incelenmesi: Gümüşhane örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 721-728. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.748435>
- Döner, F. (2021b). The effect of tourism and legalization policies on summer pasture in Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(2), 142-153. <https://doi.org/10.26833/ijeg.927503>
- FAO. Making way: developing national legal and policy frameworks for pastoral mobility (2022). <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb8461en> Accessed 28.08.22
- Garrett, H. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859), 1243–1248. <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>
- Grear, A. (2003). A tale of the land, the insider, the outsider and human rights (an exploration of some problems and possibilities in the relationship between the English common law property concept, human rights law, and discourses of exclusion and inclusion). *Legal Studies*, 23(1), 33–65. <https://doi.org/10.1111/j.1748-121X.2003.tb00205.x>
- İban, M. C. (2020). Lessons from approaches to informal housing and non-compliant development in Turkey: An in-depth policy analysis with a historical framework. *Land Use Policy*, 99, 105104. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105104>
- Kaufmann, B. A., Hülsebusch, C. G., & Krätli, S. (2018). Pastoral livestock systems. In P. Ferranti, E. M. Berry, & J. R. Anderson (Eds.), *Encyclopedia of Food Security and Sustainability* (pp. 354–360). Elsevier.
- Manzano, P. (2015). Pastoralist ownership of rural transformation: The adequate path to change. *Development*, 58(2–3), 326–332. <https://doi.org/10.1057/s41301-016-0012-6>
- Olson, M. (1965). *The logic of collective action: Public goods and the theory of groups*. Harvard University Press.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons*. Cambridge University Press.

- Özkaya Özlüer, I. (2018). İmar barışı düzenlemesine hukuki bir yaklaşım. *İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 9(2), 313–340. <https://doi.org/10.21492/inuhfd.467904>
- Paasch, J. M. (2008). Standardization within the legal domain: A terminological approach. In T. Doganoglu, M. J. Holler, & J. Tiedeman (Eds.), *Euras Yearbook of Standardization* (pp. 105–130). EURAS.
- Purdy, E. (2005). John Locke. In R. P. Carlisle (Ed.), *Encyclopedia of Politics: The Left and The Right* (pp. 285–288). SAGE Publications.
- Robinson, E. J. Z. (2008). India's disappearing common lands: Fuzzy Boundaries, encroachment, and evolving property rights. *Land Economics*, 84(3), 409–422. <https://doi.org/10.3368/le.84.3.409>
- Standing, G. (2019). *Plunder of the commons: A manifesto for sharing public wealth*. Pelican Books.
- Swift, J., & Mearns, R. (1993). Mongolian pastoralism on the threshold of the twenty-first century. *Nomadic Peoples*, 33, 3–7.
- Uzun, F., İspirli, K., & Uzun, Ö. F. (2022). Meralarda Tahsis Amacı Değişikliği Talebinin Mevzuata Uygunluk Değerlendirmesi: Kayı Köyü Merası Örneği, Çorum, Türkiye. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.980787>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.04.2022
Kabul Tarihi : 27.07.2022

Received Date : 07.04.2022
Accepted Date : 27.07.2022

FRESH AND HARDENED STATE PROPERTIES OF SCCs PREPARED WITH LIMESTONE-BASED MANUFACTURED AGGREGATES AND POWDER

KİREÇTAŞI ESASLI KIRMATAŞ AGREGA VE TAŞ TOZU İLE HAZIRLANAN KYB'LERİN TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİ

Cengiz ŞENGÜL¹ (ORCID: 0000-0003-4748-7269)
Hayati HİLMİOĞLU¹ (ORCID: 0000-0001-7345-6912)
M. Hulusi ÖZKUL^{1*} (ORCID: 0000-0002-6453-8956)

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: M. Hulusi ÖZKUL, hozkul@itu.edu.tr

ABSTRACT

Because the amount of sand and gravel extracted from natural resources is quickly depleting, the use of manufactured aggregates is becoming increasingly important in terms of sustainability. In this study, crushed limestone and filler material were used as both sand and coarse aggregate and powder material. As a result, all of the concrete components' grains had an angular form and a rough surface. Self-compacting concretes (SCC) were made with a maximum aggregate size of 10 or 16 mm and cement content of 350 kg/m³. The amount of limestone fine was raised in increments of 100 kg/m³ up to 300 kg/m³. The effects of fine material amount and maximum coarse aggregate size on spreading, flow, passing ability through the obstacles, segregation, and rheological properties of SCCs were determined. Although the mixtures' slump flow performances remained in the SF2 and SF3 classes according to EFNARC standards, longer V-funnel times and larger J-ring differences were obtained when compared to slump flow values, particularly for 16 mm aggregate size. The hardened state properties of concretes were examined by measuring the compressive and splitting tensile strengths, modulus of elasticity and Poisson ratio.

Keywords: SCC, passing ability, segregation, strength, Poisson ratio

ÖZET

Doğal kaynaklardan çıkarılan kum ve çakıl miktarı hızla tükendiği için kırmataş agregaların kullanımı sürdürülebilirlik açısından giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada hem kum hem de iri agrega ve toz malzeme olarak kırma kalker ve filler malzemesi kullanılmıştır. Tüm beton bileşenlerinin tanecikleri köşeli bir şekilde ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), maksimum agrega boyutu 10 veya 16 mm ve çimento içeriği 350 kg/m³ olacak şekilde hazırlanmıştır. Kireç taşı filleri miktarı 100 kg/m³'lük artışlarla 300 kg/m³'e kadar yükseltilmiştir. İnce malzeme miktarı ve maksimum iri agrega boyutunun KYB'lerin taze haldeki yayılma, akış, engeller arasından geçme, ayrışma ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Karışımların çökme akış performansları EFNARC standartlarına göre SF2 ve SF3 sınıflarında kalmasına rağmen özellikle 16 mm iri agrega boyutlu betonlar için çökme akış değerlerine göre daha uzun V-hunisi akış süreleri ve daha büyük J-halkası farklılıkları gözlenmiştir. Sertleşmiş haldeki özellikleri, basınç ve yarma-çekme dayanımları, elastisite modülü ve Poisson oranları ölçülerek incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: KYB, geçiş yeteneği, ayrışma, dayanım, Poisson oranı

INTRODUCTION

Sand and gravel aggregate extraction is the largest-volume mining operation in the world (Peduzzi, 2014). It is estimated that soon, the extraction rate of sand and gravel will exceed their regeneration rate (Bendixen et al., 2021). Sand and gravel are often obtained from riverbeds, seabeds, lakes, and floodplains, causing serious environmental problems. Therefore, the use of other aggregate options, such as crushed sand and recycled aggregates makes concrete more sustainable. Dune sand, which is abundant in the world, should also be investigated as another source of fine aggregates. On the other hand, in self-compacting concretes, the amount of fine aggregate should be increased along with the amount of fines. For this reason, using alternative sand in SCCs is critical.

Self-compacting concrete (SCC) has unique properties; it consolidates under its weight without the help of vibration (Okamura & Ouchi, 2003). SCCs exhibit higher flowability and passing ability through obstacles (steel bars) than normal vibrated concretes (NVC) and high segregation resistance. SCCs owe these properties to the powerful superplasticizer (SP) and the modification of mixing composition. The viscosity of the mixture should be increased to a moderate level to balance the segregation effect of powerful SP, either by increasing the fine material paste with a reduced water/fine material ratio or by using a viscosity modifying agent (VMA) (Nanthagopalan & Santhanam, 2009; Girish et al., 2010).

The number of studies on self-compacting concretes in which only crushed sand is used as fine aggregate is rare. There are several differences between crushed sand and natural sand. Crushed sand has angular particles, a rough surface texture, and the particles have different dimensions of length, width, and thickness, whereas natural sand particles are round in shape and their surfaces are smooth. Similar to river sand, dune sand particles have a rounded shape and smooth surface, but they have a much smaller size than river sand particles; their fineness modulus usually remains under 1.0 (Al-Harthy et al., 2007). When used in the production of SCC, it was observed that crushed sand requires a relatively higher amount of paste than river sand to obtain a certain level of slump flow (Nanthagopalan & Santhanam, 2011). This high paste volume was attributed to the difference in shape between the sands used. Crushed sand (CS), river sand (RS), and dune sand (DS) were used in SCCs as binary or ternary mixtures. Increasing CS in RS-CS binary and RS-CS-DS ternary systems decreased the slump flow and increased the V-funnel times (Bouziani, 2013). The effects of sand types on strength properties of SCCs were investigated by using the same type of sands in binary and ternary systems, and it was stated that the mixtures containing CS displayed the highest compressive strength, while those containing DS were the lowest (Bouziani, 2013; Benabed et al., 2012). In another study, Zeghichi et al. (2014) achieved high compressive and tensile strengths when DS was mixed with 50% CS.

Using crushed stone aggregate instead of gravel in concrete is a sustainable approach because gravel is a rapidly depleted material like natural sand. Gravel, crushed gravel, and crushed limestone were used in SCC as coarse aggregate and fresh and hardened concrete properties were compared (Khaleel et al., 2011). Slump flow, V-funnel, L-box, and U-box tests were carried out and it was reported that gravel concrete showed the best performance, followed by crushed gravel and crushed limestone due to the differences in shape and surface texture. However, they found the highest strength (compressive and flexural) and modulus of elasticity on concretes with crushed stone, followed by crushed gravel, with gravel having the lowest strength. Furthermore, they reported higher mechanical properties with a maximum aggregate size of 10 mm than with 20 mm.

For up to 10% and 15% LS replacement in self-compacting mortars, workability as measured by slump flow and V-funnel flow time showed slight improvement; however, workability declined beyond these rates (Benabed et al., 2012). In another study, LS was used by reducing crushed sand or as a cement substitute (Skender et al., 2021). When the percentage of LS was increased, the slump flow decreased, but the decrease was higher for LS-added mixtures than for LS-substituted mixtures. On the other hand, an increased amount of LS for SCCs has been reported to reduce the demand for superplasticizers required to achieve the target slump flow, regardless of their fineness (Zhu & Gibbs, 2005). Nikbin et al. (2016) investigated the effect of LS content on compressive strength of SCCs. They found that when the LS content was increased from 25% to 100%, the compressive strength increased by 20% and 38% for 0.6 and 0.47 w/c ratios, respectively. This increase was attributed to the increase in packing density and improvement in the bond between the aggregate and paste with increased powder. The SCCs prepared with the addition of LS obtained approximately 40% higher compressive strength than NVCs at the same w/c ratios (Zhu & Gibbs, 2005). Splitting tensile strength and modulus of elasticity of SCCs made with LS were compared with those of NVCs (Parra

et al., 2011). Average reductions of 15% in splitting strength and 2% in modulus were reported for SCC relative to NVC.

In this study, both coarse and fine aggregates and a powder as fine material are made of limestone by crushing or grinding processes; the grains are therefore angular and rough. In previous studies, the total amount of fine material was kept constant, and binary or ternary mixtures of crushed sand and river or dune sand were used in the production of SCCs. In this study, in addition to 350 kg/m^3 cement, the fine material was increased to 300 kg/m^3 in increments of 100 kg/m^3 , and another mixture without filler but with VMA additive was prepared. The maximum coarse aggregate size was chosen as 10 mm or 16 mm. Most of the tests given by EFNARC (2005), as well as rheological tests, have been performed on SCCs to determine fresh state performance. The compressive and splitting tensile strengths, the modulus of elasticity, and the Poisson's ratio were investigated in the hardened state.

EXPERIMENTAL STUDY

Materials

In the experiments, CEM I 42.5 R type cement was used in accordance with TS EN 197-1 (2012), the grade of which is given in Figure 1. LS (98.5% CaCO_3) with a maximum size of $100 \mu\text{m}$ and a specific gravity of 2.77 was used as the fine material, and the gradation curve and SEM image of the particles are shown in Figures 1 and 2, respectively.

SCCs were prepared with two types of limestone-based crushed stone as coarse aggregate, crushed stone 1 with a maximum size of 10 mm and a specific gravity of 2.72, and crushed stone 2 with a maximum size of 16 mm and a specific gravity of 2.71. The fine aggregate was limestone-based crushed stone sand with a specific gravity of 2.68. The mixing proportions of aggregates were determined by using the grading curve of Fuller parabola. The grading curves of the aggregates are given in Figure 1.

Polycarboxylate ether-based admixture with a density of 1.03 g/cm^3 was used as SP. Polysaccharide-based admixture with a density of 1.01 g/cm^3 was employed as VMA.

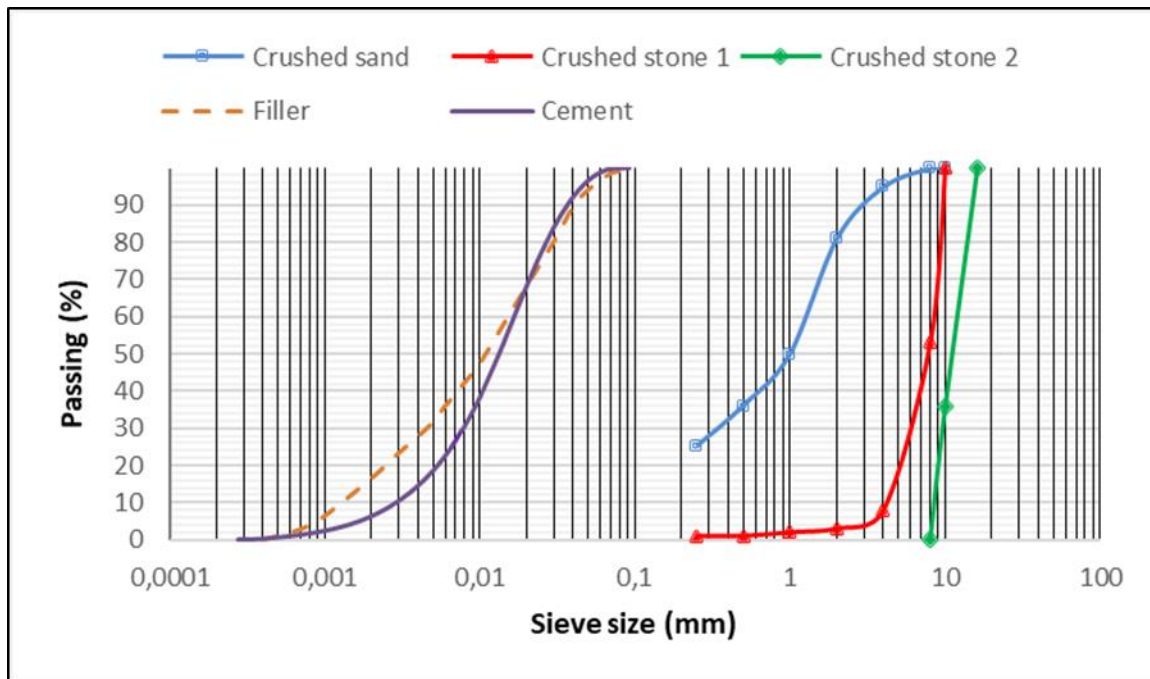


Figure 1. Grading Curves

Concrete Mixtures And Production

Cement content for all concrete mixes was 350 kg/m^3 . Fine material (LS) content other than cement was increased up to 300 kg/m^3 in 100 kg/m^3 increments. Another SCC was prepared without any additional fine material. The water/cement ratio for all mixtures was 0.48 and the SP content was adjusted to keep the slump flow within the SF2

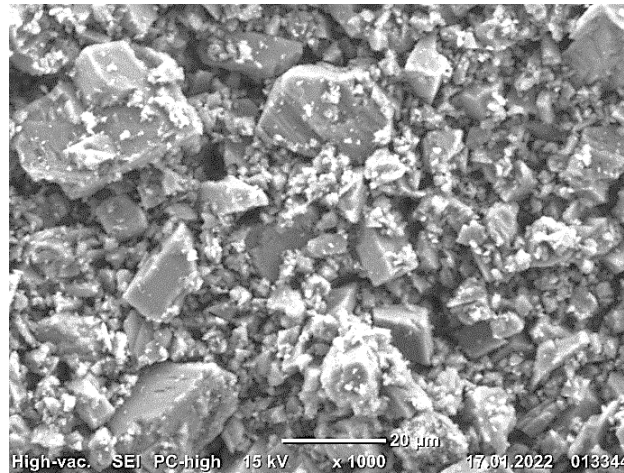


Figure 2. SEM Image of Limestone Powder

limits. For mixtures with a total fines content (including cement) of 350 kg/m^3 (for both 10 and 16 mm max. aggregate sizes) and 450 kg/m^3 (only for 16 mm max. aggregates), VMA was added to allow concrete to flow and prevent segregation. Mixing ratios of concretes are given in Table 1.

A pan mixer with a capacity of 50 dm^3 was used for concrete production. First, the aggregates and LS were mixed for 2 minutes, then $3/4$ of the mixing water was added and mixing was continued for another 2 minutes. After the cement addition, the ingredients were mixed for additional 1 minute, then SP, VMA (if necessary), and the remaining water were added, and finally, more mixing was applied for 3 minutes.

Table 1. Mixing Proportions of SCCs

Component	Materials proportions (kg/m^3)							
	Maximum aggregate size: 10 mm				Maximum aggregate size: 16 mm			
	LS0	LS100	LS200	LS300	LS0	LS100	LS200	LS300
Cement	350	350	350	350	350	350	350	350
Water	169	169	169	169	169	169	169	169
Limestone filler	0	100	200	300	0	100	200	300
Crushed sand	1184	1124	1063	1000	981	930	880	828
Crushed stone 1	676	642	607	571	469	445	421	397
Crushed stone 2	0	0	0	0	412	390	369	348
Superplasticizer	9.5	8.6	8.6	11.8	9.5	9.0	8.2	8.2
VMA	0,34	0	0	0	1,68	1,52	0	0
w/c	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
w/p*	0.48	0.38	0.31	0.26	0.48	0.38	0.31	0.26

*w/p: Water/powder ratio

Testing Procedures

Slump flow and T500 tests were performed on fresh concrete in accordance with TS EN 12350-8 (2011). V-funnel and J-ring tests were performed according to TS EN 12350-9 (2011) and TS EN 12350-12 (2011), respectively. In order to determine the segregation resistance of fresh concrete, sieve and penetration tests were applied according to

the modified form of TS EN 12350-11 (2011) and ASTM C1712 (2014), respectively. ASTM C1712 (2014) requires a weight of 45 g, but a weight of 54 g was used in this study, as suggested in other studies (Bui et al., 2002).

ICAR rheometer was used to measure the rheological performance of the SCCs (Figure 3). ICAR is based on the rotation of a vane and allows plotting shear stress versus rotational rate (Koehler & Fowler, 2004). It is possible to measure the static and dynamic yield stresses and plastic viscosity of concretes. The static yield stress was obtained from a stress growth test by rotating the vane at a low speed (0.025 rps) by determining the peak shear stress. In the flow curve test, shear stresses at decreasing speeds (0.5 to 0.05 rps in seven steps) were recorded after the vane was rotated at a high speed. The slope of the linear plotting stress versus rotational speed gives the plastic viscosity, and the intercept of the line corresponds to dynamic shear stress. In this study, negative dynamic yield stresses were obtained; therefore, only static yield stresses were presented.

After 90 days of water curing, compressive strength, and splitting tests were performed on 150x300 mm cylindrical specimens. The upper surfaces of the cylindrical specimens were ground to make them smooth and parallel to the lower surface. Three specimens were prepared and tested for each mixture. Longitudinal and lateral deformations were recorded during the compression test using two frames with LVDTs attached to the specimen (Figure 4).



Figure 3. ICAR Testing Instrument



Figure 4. Testing Frame for Compression Testing

TEST RESULTS AND DISCUSSION

Fresh Concrete Results

Slump Flow And T_{500} Tests

The results of the slump flow test are shown in Figure 5a. One of the aims of the study was to obtain SCCs of at least SF2 slump flow class; however, one concrete (16 mm size and 350 kg fine content) fell slightly below this class. For 350 kg of cementitious (without added fines) concrete, the addition of VMA was required for both aggregate sizes (Table 1). In addition, for the aggregate size of 16 mm, VMA was used to maintain flow and prevent segregation when the total fine material was 450 kg/m³. Figure 5a shows a slight increase in slump flow as the total fine content increases. Likewise, the slump flow increased as the paste increased (Nanthagopalan & Santhanam, 2009). However, for concrete with a maximum aggregate size of 16 mm, the slump flow decreased at a total powder content of 650 kg/m³ (Figure 5a).

Increasing the paste content in SCC improves flow property by reducing inter-particle friction (Girish et al., 2010). The paste in a concrete fills the voids between the aggregate grains and the excess covers the grains; the coating thickness depends on the amount of paste (Oh et al., 1999). Besides, a high paste thickness increases the distance between the particles; hence the friction between the particles reduces, which improves the slump flow of a concrete. For the concretes with smaller size aggregate, the surface area of the particles is larger than that of coarser particles, for this reason, the paste thickness becomes thicker for the concretes with the latter particles. This shows why the SCCs with 16 mm size have slightly larger slump flows than 10 mm for up to the maximum powder content. On the other hand, the flowing properties can increase up to a certain paste level, and beyond that a drop can be experienced (Girish et al., 2010). It seems that the SCCs with 10 mm coarse aggregate size have this critical paste content over

the maximum powder content used in this study (650 kg/m^3); however, for the 16 mm aggregate size it was less than the maximum powder content.

T_{500} flow rates remained within 3-4 s (Figure 5b), corresponding to viscosity class VS2 according to EFNARC (2005), except one mixture without LS, which showed slightly higher rate (6 s) than the others, probably due to the VMA it contained. It seems that there is no definite trend of T_{500} times with fine contents and maximum aggregate size. EFNARC (2005) advises this test to use as a way of confirming uniformity of a SCC from batch to batch.

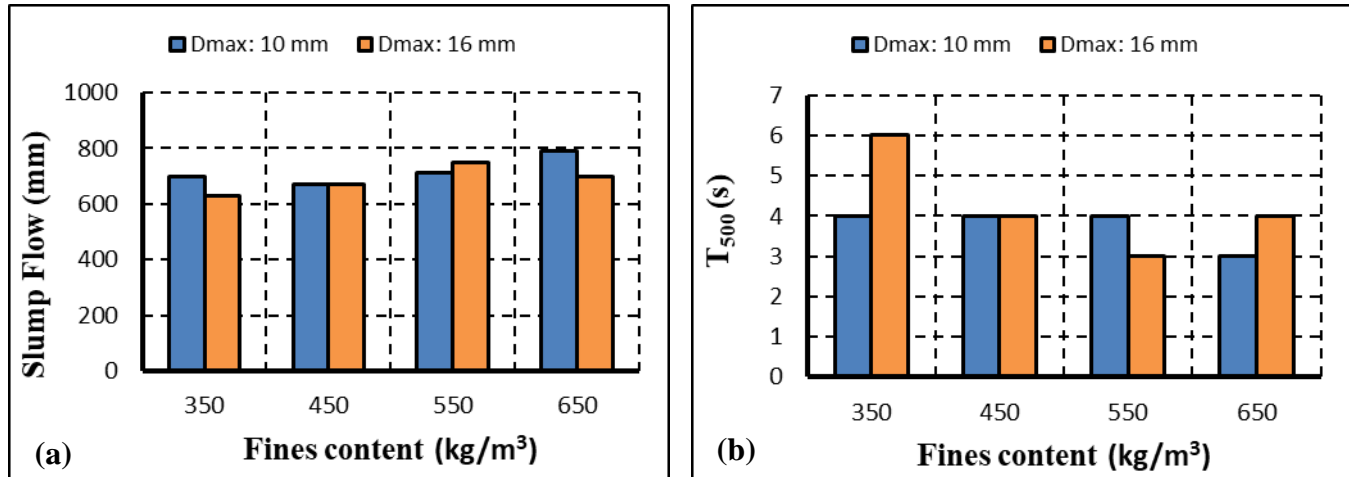


Figure 5. Variation of Slump Flow (a) and T_{500} (b) with Fines Content

V-Funnel Test

As shown in Figure 6, V-funnel flow rates were obtained between 15-25 s while staying within the limits of the VF2 viscosity class. Similarly, V-funnel times of 18-26.3 s have been reported for SCCs prepared with crushed sand (Gálvez-Moreno et al., 2016). It was stated that replacing the natural aggregate with crushed material did not have a significant effect on the slump flow value, but fine aggregates with a fraction of 0-2 mm had a greater effect on the V-funnel flow time (Carlsward et al., 2003). Figure 6 shows that V-funnel flow times of 16 mm concretes are generally longer than 10 mm concretes, possibly due to the arching effect of larger coarse aggregates (Nanthagopalan & Santhanam, 2009; Su et al., 2001). Also, LS, as well as all aggregates used in this study, have rough and angular surfaces, which can further increase the arching effect as a result of interlocking (Kwan & Ng, 2010). Fig. 6 also shows that increasing the LS content increased the V-funnel flow time due to the increase in the viscosity; because V-funnel test was also suggested to measure the viscosity (EFNARC, 2005). However, increasing the fine content to 650 kg/m^3 resulted in a decrease in the V-funnel time for both aggregate sizes due to the increased coating thickness of paste on the aggregate grains, and reduction of coarse aggregate content.

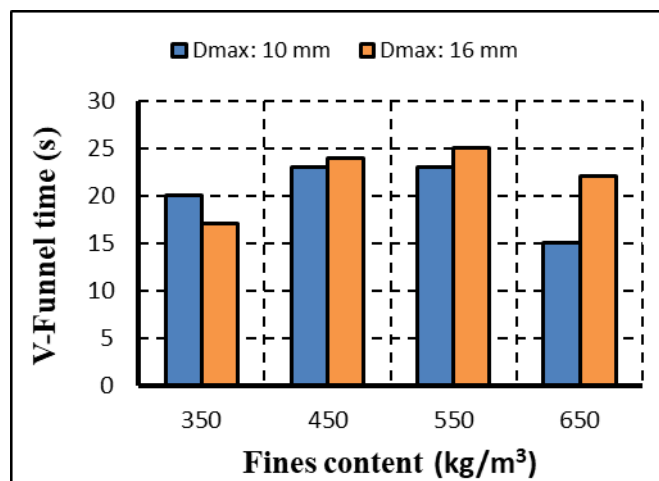


Figure 6. Variation of V-Funnel Flow Time with Fines Content

J-Ring Test

The differences between slump flow and J-ring spreads (J-ring blockage) are displayed in Figure 7a. This figure shows that 16 mm-sized SCCs have greater reduction in spread than 10 mm SCCs and exhibit a greater blocking effect. Figure 7a also shows that SCCs with a maximum aggregate size of 10 mm meet the criteria for “J-ring blockage ≤ 50 mm” (Hwang et al., 2006); however, the 16mm SCCs exceed the criteria limit for all fines content. The value obtained closest to the criterion limit for the aggregate size of 16 mm is 60 mm (instead of 50 mm), and it belongs to the fine grain content of 550 kg/m³. Likewise, J-ring blockages between 50-125 mm have been reported for SCCs prepared with crushed sand and crushed coarse aggregate (Gálvez-Moreno et al., 2016).

During the J-ring test, the difference between the heights of the concrete inside the bars and just outside the ring, defined as the blocking step, was measured and is given in Figure 7b. This figure shows that concretes with 16 mm aggregates remain in the ring in greater amounts than those with 10 mm, due to the difficulty of passing larger particles through obstacles. According to the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI) Interim Guidelines (2003), the blocking step for SCCs should not exceed 15 mm; however, Figure 7b indicates that only two SCCs with a maximum aggregate size of 10 mm and a total fines content of 550 and 650 kg/m³, respectively, meet this limit.

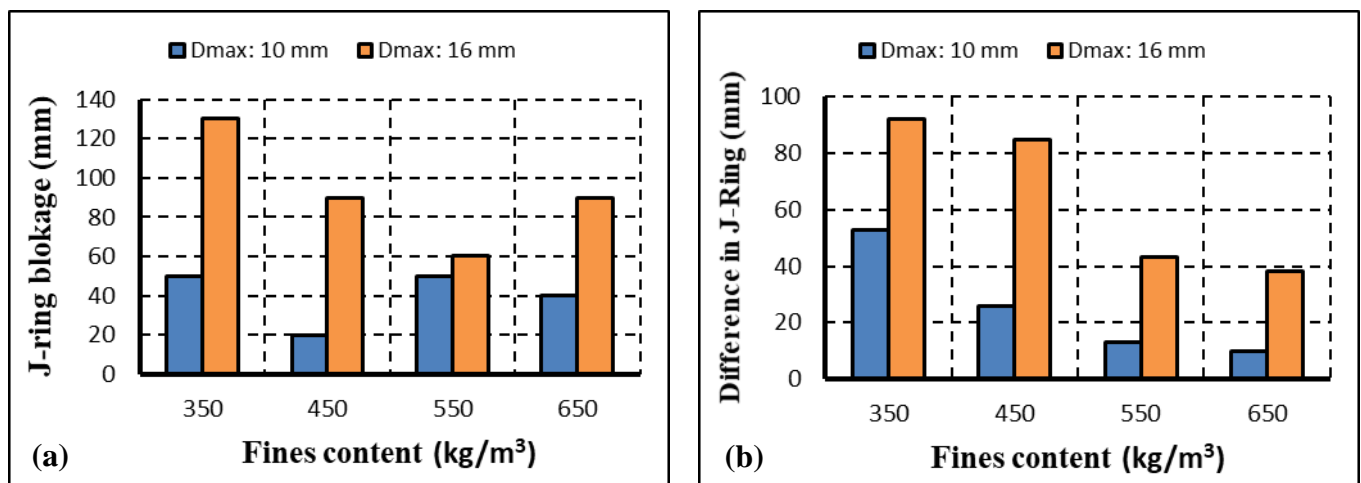


Figure 7. Variations of J-Ring Blokage (a) and Difference in J-Ring (b) with Fines Content

Figure 7b also shows that the higher the fine material content, the smaller the differences between the inner and outer parts. Similarly, poor filling rate (as well as passing rate) as measured by L-box has been reported for SCCs prepared with crushed sand and limestone filler (Necira et al., 2017).

As can be seen in Figures 7a and 7b, the mixture with 350 kg/m³ cement, without extra fines but containing VMA, showed the poorest J-ring test result when compared to the fines added mixtures, due to the lack of fines. Likewise, Georgiadis et al. (2010) obtained low L-box and slump flow values for concretes prepared with 374 kg/m³ cement dosage (without other fines) and VMA. In Figure 8, the variation of J-ring blockage with blocking step is plotted.

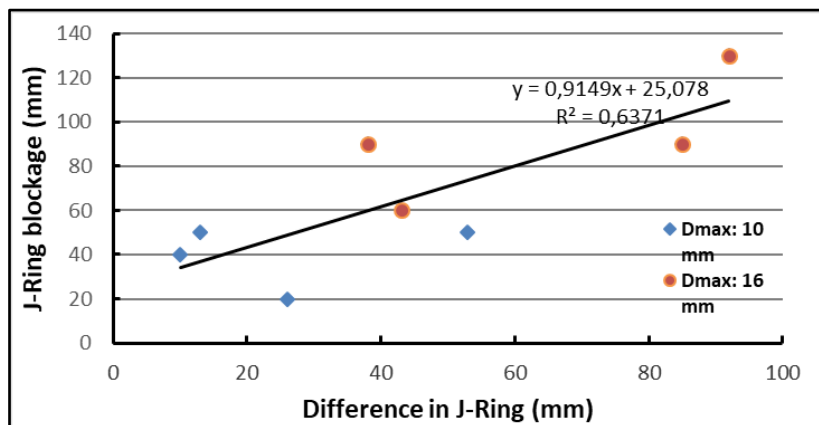


Figure 8. The Relationship Between J-Ring Blokage and Difference in J-Ring

A linear correlation was obtained with a coefficient of determination of $R^2=0.64$, although Wustholz (2003) reported a large scattering between these two variables. It can be concluded that SCCs prepared with limestone-based crushed aggregates (both fine and coarse) and LS can only show sufficient passing ability with small maximum coarse aggregate size ($D_{max} \leq 10$ mm) and high amount of fines (≥ 550 kg/m³), due to the angular shape and rough surface texture of particles. This is because an increased amount of fines decreases the volume of coarse aggregate and reduces the inter-particle friction (Girish et al., 2010; Koehler & Fowler, 2004).

Segregation Resistance

The segregation resistance of fresh concrete was measured by two methods: sieving and penetration. As shown in Figure 9a, sieving test results remained between 4.6-12.2%, corresponding to SR2 class according to EFNARC (2005). All penetration test results shown in Figure 9b remained below 8 mm, which is indicated as the non-segregation limit for SCCs (Carlswald et al., 2003). It has been suggested that SCCs containing crushed sand exhibit high segregation resistance due to the particle shape and surface texture (Zeghichi et al., 2014). Although there was no parallel trend between the results of the two methods tested, the concrete prepared with 550 kg/m³ LS and 16 mm aggregate size displayed maximum passing percentage and maximum penetration results.

In concretes, the drag force which keeps the grains in suspended position in the mortar are function of coarse aggregate particle size, the unit weight difference between the coarse aggregates and mortar, and the viscosity and the yield stress of the mortar (Navarrete and Lopez, 2016; Shen et al., 2009). For this reason, coarse aggregates of 16 mm settles more than 10 mm in SCCs, which causes more segregation in concretes with the former aggregates than the latter. In addition, the increase in powder content causes the aggregate particles to separate from each other and the coarser particles to settle more easily (Esmailkhanian et al., 2014). Moreover, increasing the paste will increase the amount of fine material passing through the sieve and make the penetration easier. On the other hand, due to keeping the water content constant and increasing the powder content, the w/p ratio decreased, and as a result, the viscosity increased, causing a decrease in segregation for the largest aggregate grains.

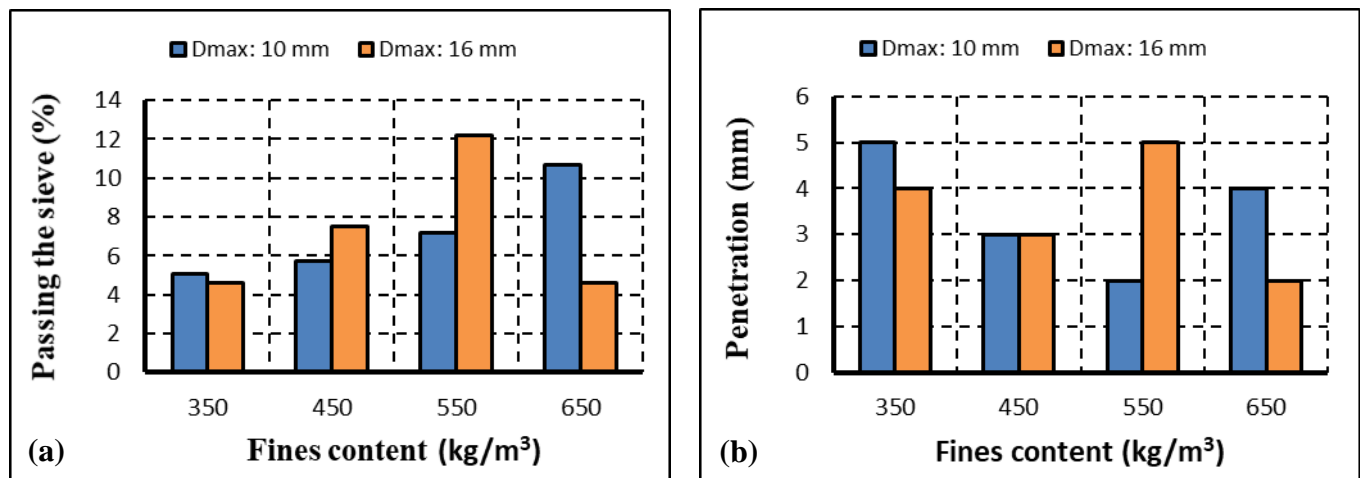


Figure 9. Segregation Resistance Measured by Sieving (a) and Penetration (b) Methods

Rheological Properties

Figures 10a and 10b show the variation of rheological properties, plastic viscosity, and static yield stress with fines content, respectively. The viscosity decreased when the fines content was increased from 350 to 450 kg/m³ for both coarse aggregate sizes. Fine materials, if they are not in excessive quantities, tend to lubricate a mixture, which makes it easier for larger particles to roll and slide over each other (Cepuritis et al., 2016; Alexander & Mindess, 2005). The presence of these particles in a mixture increases the workability and reduces the need for water. The viscosity change between two fines contents of 450 kg/m³ and 550 kg/m³ is small for both aggregate sizes. However, the viscosity increased at 650 kg/m³ fines amount, which indicates that this amount of fine powder is excessive for these concretes. It has been noted that a high amount of fine grains makes concrete sticky (Alexander & Mindess, 2005) and highly viscous and reduces mobility (Collepari et al., 2007). The yield stress results given in Figure 10b, on the other hand, showed a decrease after a higher fine grain content, 450 kg/m³, unlike the viscosity results, and remained at a similar level even at the highest fines content.

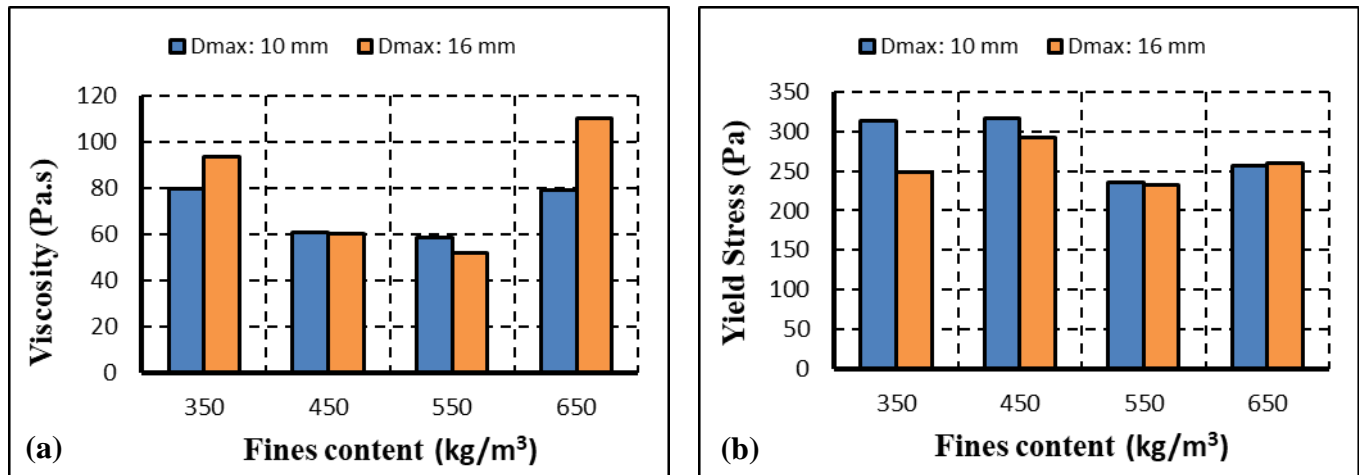


Figure 10. Variation of Rheological Parameters, (a) Viscosity and (b) Yield Strength with Fines Content

Mechanical Properties

Compressive Strength

The compressive strength of concrete, as is known, mainly depends on the w/c ratio. The w/c ratio was kept constant in the presented concretes; however, as shown in Figure 11a, the compressive strength increased slightly with the increase of fine grains. While the cement content was the same in all concretes, the LS content was increased up to 300 kg/m³. SCCs without LS and those with a coarse aggregate of 16 mm and a fine material of 450 kg/m³ contain VMA; however, it has been reported that VMA does not have a negative effect on strength characteristics (Isik & Özkul, 2014). It is known that LS is not a pozzolanic material but shows improvement in strength properties due to better particle packing, increased cement hydration rate (Zhu & Gibbs, 2005), limestone activity (Roziere, Granger, Turcry, & Loukili, 2007), and filling effect. Similarly, it was noted that increasing the LS leads to an increase in compressive strength, which is attributed to the improvements in the packing density and the bond between aggregate and paste (Nikbin et al., 2014-a).

Figure 11a shows that the increases in compressive strength for SCCs containing 300 kg/m³ LS (total fines of 650 kg/m³) compared to those without additional fines are 14% and 6.4%, for maximum aggregate sizes of 16 mm and 10 mm, respectively. Figure 15 also shows that for fines contents of 450 and 650 kg/m³, those of size 16 mm have strengths of 6.9% and 6% higher, respectively, than those of 10 mm, but, conversely, for fine grains of 550 kg/m³, that of size 10 mm have a strength of 2.9% lower than that of size 16 mm. There are conflicting results about the effect of large aggregate size on strength. Nikbin et al., (2014-b) reported a slight increase between the sizes of 9.5-19 mm, while Khaleel et al. (2011) found that SCCs with a maximum aggregate size of 10 mm have higher compressive and flexural strengths than those with a size of 20 mm. This was attributed to the formation of a higher bond strength between the aggregate and the paste due to the increased aggregate surface area in mixtures containing smaller-sized aggregates (Khaleel et al., 2011). On the contrary, the increase in strength with increasing aggregate size has been associated with the improvement of the concrete skeleton due to larger-sized aggregates (Nikbin et al., 2014-b).

Splitting Tensile Strength

The variation of the splitting strength given in Figure 11b shows a slight decrease (4.3% for 10 mm aggregate size and 6.8% for 16 mm) with the increase of limestone powder to 300 kg/m³. The lowest splitting strength was obtained for SCC with 450 kg/m³ fine material and 10 mm coarse aggregate, 7.2% lower than that without additional fine material. Conflicting results have been reported on this issue; for example, the tensile strength results of SCCs in splitting have been obtained up to 40% higher than predicted by the FIB Model Code 90 (Klug & Holschemacher, 2003) for NVC. Conversely, it has been reported that there is a 15% decrease in the splitting strength of SCCs compared to NVC (Parra et al., 2011). On the other hand, it has been shown that the volume of paste has a limited effect on strength (both compressive and splitting) and elastic modulus (Craeye, Van Itterbeek, Desnerck, Boel, & De Schutter, 2006). The slight change in these characteristics was attributed to the decrease in the volume of aggregate, which is the higher-strength component of concrete, and also to the decrease in ITZ, the weaker part of concrete (Roziere et al., 2007; Nikbin et al., 2014-a). These two opposite effects counteract each other and the change

in mechanical properties remains small. Figure 16 also depicts that the maximum aggregate size does not have a significant effect on the splitting tensile strength. Similarly, the analysis of the data obtained from forty-nine studies showed that the effect of coarse aggregate size or paste volume on the correlation between split tensile strength and compressive strength was not significant (Craeye et al., 2006).

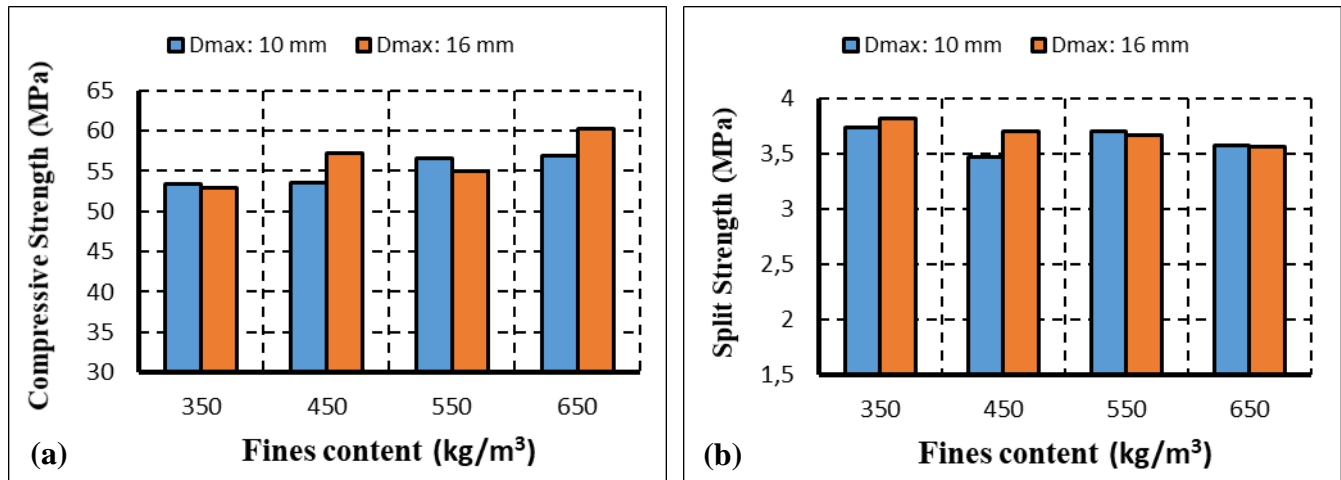


Figure 11. Variation of Compressive (a) and Splitting (b) Strengths with Fines Content

Modulus of Elasticity

The modulus of elasticity was calculated from the initial linear portion of the stress-strain curves and is given in Figure 12a. This differs from the approach proposed in ASTM C469 (2004), where at least three loads are required, and the slope between a stress equal to 40% of the ultimate stress and a strain of 50 microstrains is calculated as the modulus of elasticity. Figure 12a shows that the fine material content has little effect on the modulus of elasticity. By increasing the fines content from 350 kg/m³ to 450 kg/m³ for a maximum aggregate size of 10 mm, a slight decrease in the modulus of elasticity was observed, and in subsequent amounts of fine material it remains at a similar level as in the former concrete. Figure 12a also depicts that when the aggregate size is increased to 16 mm, the modulus increases by up to 3.8% compared to LS-free concrete for fines contents of 450 and 500 kg/m³, and then decreases to the level of LS-free concrete for 650 kg/m³. The test results of Das & Chatterjee (2012) showed that the ACI model, originally derived for NVC, underestimated the initial tangent modulus of elasticity of the SCC by about 9-12%. Similarly, the modulus of elasticity of the SCCs remained at the bottom of the region estimated by the FIB Model Code 90 (Klug & Holschemacher, 2003). A lower modulus of elasticity was obtained from the BIS model estimate, and these low values were attributed to the lower coarse aggregate content of the SCCs (Dinakar, Reddy, & Sharma, 2013). A database was analyzed and the modulus of elasticity of SCCs was found to be up to 20% lower than that of NVC at the same strengths (Holschemacher & Klug, 2002). Due to the assumption that aggregates are more rigid than paste, a decrease in the modulus of elasticity is predicted with a high amount of paste; on the other hand, paste with a high amount of LS also has a high rigidity (Craeye et al., 2006). However, there are studies showing that there is no difference between the moduli of elasticity of SCC and NVC at similar strengths (Persson, 2001). Figure 12a also shows that the modulus of elasticity values of SCCs with a size of 16 mm are higher than those of 10 mm. The difference was 5% in LS-free SCCs and up to 16% in SCCs with 450 kg/m³ of total fines. As the maximum size of the coarse aggregate increased, the modulus of elasticity of the NVC increased slightly, which was attributed to the higher stiffness of coarser aggregates (Rao & Prasad, 2002). Likewise, Nikbin et al. (2014-b) found a negligible increase in the modulus of elasticity with an increase in the maximum aggregate size. There are different results about the effect of the maximum size of coarse aggregates on the modulus of elasticity. Khaleel et al. (2011) compared the modulus of elasticity of SCCs prepared with two different maximum aggregate sizes and observed that concrete with a size of 10 mm had a higher modulus than 20 mm.

Poisson Ratio

As shown in Figure 12b, the Poisson ratios remained between 0.187 and 0.212, and the addition of LS decreased the ratio. SCCs with 16 mm aggregate size have 8.3% and 7.1% higher Poisson's ratios than 10 mm SCCs for fines content of 450 and 550 kg/m³, respectively. It is seen that for these concretes of 16 mm size, larger aggregate particles limit the lateral deformation more than those with 10 mm size. In contrast, Guo et al. (2009) found that the Poisson ratio was similar for both concrete and mortar, and therefore coarse aggregate volume had no effect on the Poisson

ratio. Das and Chatterjee (2012) obtained Poisson's ratios for SCCs between 0.21 and 0.23, which is close to the values obtained in this study. On the other hand, the Poisson ratios measured by Li and Li (2014) in SCCs are slightly smaller than those achieved in this study.

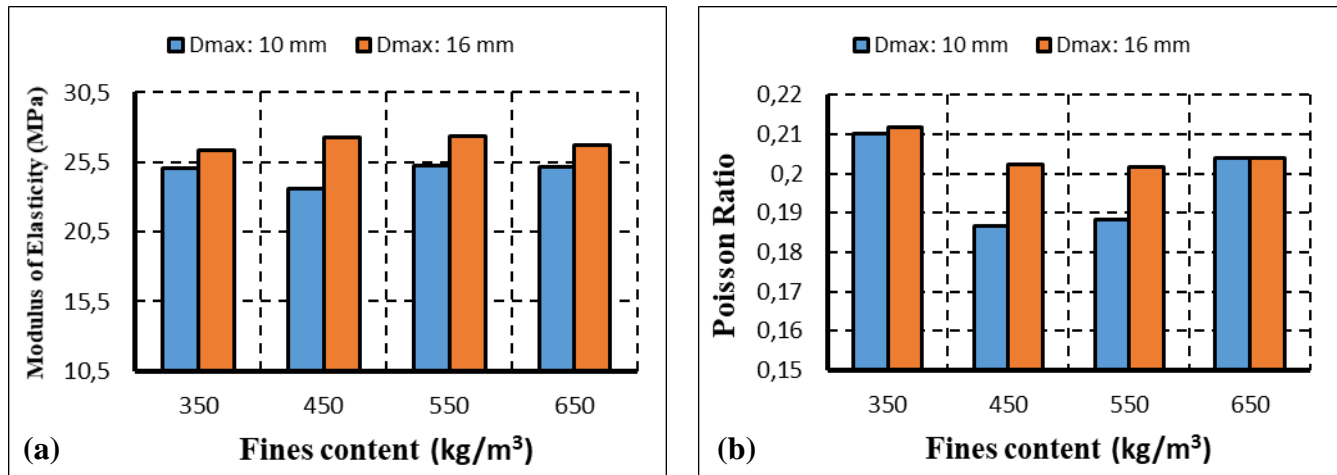


Figure 12. Variation of Modulus of Elasticity (a) and Poisson Ratio (b) with fines content

CONCLUSIONS

In this study, only manufactured aggregates, crushed stone coarse aggregate, crushed stone sand and limestone powder were used to produce more sustainable SCCs due to the high depletion of natural sand and gravel in the world. The following conclusions can be drawn from the study.

It is possible to produce flowable concrete in SF2 and SF3 classes by using only manufactured aggregates and LS. Slump flow increased with increasing the LS content in general due to increasing the paste thickness around the aggregate particles, which reduces the inter-particle friction. V-funnel flow times were within the limits of the VF2 class, showing a slow rate, most likely due to the angular shape and rough surface of the aggregate and LS particles. Increasing the LS content increased the flow time because of the increase in the viscosity of the mixture. When the J-ring results were compared, it was seen that SCCs prepared with 10 mm aggregate size were more successful in passing ability than those of 16 mm size, most probably due to the arching effect of the larger particles. All tested SCCs showed segregation resistance by both methods, sieving and penetration; however, the sieve segregation was higher for the maximum aggregate size of 16 mm than 10 mm in general. Plastic viscosity, one of the rheological properties measured, showed decrease up to a LS content of 550 kg/m³; however, it showed an increase for the highest LS content. The other rheological property, yield stress, exhibited a decrease after the LS content of 450 kg/m³, and remained approximately at the same level with increased LS.

Up to 14% increase in compressive strength with an increase in LS content was achieved, probably due to the better packing and filler effect, and the influence of coarse aggregate size was not found significant. On the contrary to compressive strength results, a slight decrease (4.3% for 10 mm aggregate size and 6.8% for 16 mm) in splitting tensile strength was obtained. SCCs with 16 mm coarse aggregate size exhibited higher modulus of elasticity than those of 10 mm size. The change in modulus with LS content is slight for SCCs with 16 mm aggregate size; however, up to 6% increase was obtained for those with 10 mm, when the LS content was increased from 450 kg/m³ to 650 kg/m³. The Poisson ratio remained between the 0.187 and 0.212 interval, showing no difference with respect to those of NVC found in the literature.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) for providing a fund (MAG-115M483) for this study. The authors also thank ITU. BAP (Project No. 39476) for their support.

REFERENCES

Alexander, P. & Mindess, P. (2005). Aggregates in Concrete. Taylor & Francis, Oxon, 2005.

- Al-Harthy, A.S., Abdel Halim, M., Taha, R., & Al-Jabri, K.S.(2007). The properties of concrete made with fine dune sand. *Construction and Building Materials*, 21, 1803–1808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>
- ASTM C469. (2004) Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM-C1712. (2014). Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test, Annual Book of ASTM Standards.
- Benabed, B., Kadri, E., Azzouz, L. & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, 34, 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>
- Bendixen, M., Iversen, L.L., Best, J., Franks, D.M., Hackney, C.R., Latrubesse, E.M., & Tusting, L.S. (2021). Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals: Conflicts, synergies, and pathways forward. *One Earth*, 4(8), 1095-1111. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.008>
- Bouziyani. T. (2013). Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach, *Construction and Building Materials*, 49, 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.039>
- Bui, V.K., Montgomery, D., Hinczak, I., & Turner, K. (2002). Rapid testing methods for segregation resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 1489-1496. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00811-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00811-6)
- Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S., & Oberg, P., (2003). Effects of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete. In Third RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, (pp. 143-153).
- Cepuritis, R., Jacobsen, S., Pedersen, B., & Mortsell, E. (2016). Crushed sand in concrete – Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology. *Cement and Concrete Composites*, 71, 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.004>
- Colleparidi, M., Colleparidi, S., & Troli. R. (2007). Properties of SSC and flowing concrete. In International Conference: Sustainable Construction Materials and Technologies. Special Papers Proceedings. Coventry, UK. (pp. 25-31).
- Craeye, B., Van Itterbeeck, P., Desnerck, P., Boel, V., & De Schutter, G. (2006). Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes. *Cement and Concrete Composites*, 28, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.011>
- Das, D. & Chatterjee, A. (2012). A comparison of hardened properties of fly-ash-based self-compacting concrete and normally compacted concrete under different curing conditions. *Magazine of Concrete Research*, 64(2), 129–141. <https://doi.org/10.1680/mac.10.00118>
- Dinakar, P., Reddy, M.K., & Sharma, M. (2013). Behaviour of self-compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash. *Materials and Design*, 46, 609–616. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.015>
- EFNARC. (2005) The European guidelines for self-compacting concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- Esmailkhanian, B., Khayat, K.H., Yahia, A., & Feys, D. (2014). Effects of mix design parameters and rheological properties on dynamic stability of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites*, 54, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.001>
- Gálvez-Moreno, D. Durán-Herrera, A., González-López, J.R., & Khayat, K.H. (2016). Robustness of Powder-Type SCC with Fly Ash and Limestone Crushed Aggregates. In Eighth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete-Flowing Toward Sustainability, Washington DC, USA, (pp. 107-120).
- Georgiadis, A.S., Sideris, K.K., & Anagnostopoulos, N.S. (2010). Properties of SCC Produced with Limestone Filler or Viscosity Modifying Admixture, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 352-360. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000030)
- Girish, S., Ranganath, R.V. Vengala, J. (2010). Influence of powder and paste on flow properties of SCC. *Construction and Building Materials*, 24, 2481–2488. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.008>

- Guo, L.-P., Carpinteri, A., Spagnoli A., & Wei, S. (2009). Effects of mechanical properties of concrete constituents including active mineral admixtures on fatigue behaviours of high performance concrete. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 33, 66–75. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2009.01416.x>
- Holschemacher, K. & Klug, Y. (2002). A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC. *LACER*, 7, 123-134.
- Hwang, S.-D., Khayat, K.H., & Bonneau, O. (2006). Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications. *ACI Materials Journal*, 103(2), 121-129. <http://doi.org/10.14359/15263>
- Isik, I.E. & Ozkul, M.H. (2014). Utilization of polysaccharides as viscosity modifying agent in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 72(15), 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.017>
- Khaleel, O.R., Al-Mishhadani, S.A., & Abdul Razak, H. (2011). The Effect of Coarse Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC). *Procedia Engineering*, 14, 805–813. [doi:10.1016/j.proeng.2011.07.102](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.102)
- Klug, Y. & Holschemacher, K. (2003). Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. In *Third RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, (pp. 596-605).
- Koehler, E.P. & Fowler, D.W. (2004). Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete. *Research Report ICAR –105-3F*, (306 p.).
- Kwan, A.K.H. & Ng, I.Y.T. (2010). Improving performance and robustness of SCC by adding supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 24, 2260–2266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.030>
- Li, Y. & Li, J. (2014). Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 511–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.010>
- Nanthagopalan, P. & Santhanam, M. (2009). Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of Self-Compacting. *Construction and Building Materials*, 23, 3443–3449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.029>
- Nanthagopalan, P. & Santhanam, M. (2011). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand. *Cement and Concrete Composites*, 33, 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.11.005>
- Necira, B., Guettala, A., & Guettala, S. (2017). Study of the combined effect of different types of sand on the characteristics of high performance self-compacting concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(17) 1-7. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1289829>
- Navarrete, I., & Lopez, M. (2016) Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy. *Construction and Building Materials*, 122, 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.066>
- Nikbin, I.M., Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Vaseghi Amiri, J., Rabbanifar, S., Rahmani, E., & Rahimi, S. (2014a). A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratio and powder content on mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 57, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.098>
- Nikbin, I.M., Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Vaseghi Amiri, J., Rahmani, E., Rabbanifar, S., & Eslami, M. (2014b). A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials and Design*, 59, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.054>
- Nikbin, I.M., Davoodi, M.R., Fallahnejad, H., Rahimi, S., & Farahbod, F. (2016). Influence of Mineral Powder Content on the Fracture Behaviors and Ductility of Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3), 04015147-1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001404)
- Oh, S.G., Noguchi, T., & Tomosava, F. (1999). Towards mix design for rheology of self-compacting concrete. In: *Proceedings of the First RILEM symposium on self-compacting concrete*, Stockholm, Sweden, (pp. 361–372).
- Okamura, H. & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>

- Parra, C., Valcuende, M., & Gomez, F. (2011). Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037>
- PCI Interim SCC Guidelines TR-6-03. (2003). Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants, (148 pp.).
- Peduzzi, P. (2014). Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*, 11, 208-218. DOI: 10.1016/j.envdev.2014.04.001
- Rao, G.A. & Prasad, B.K.R. (2002). Fracture energy and softening behavior of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 247–252. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00667-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00667-6)
- Roziere, E., Granger, S., Turcry, Ph., & Loukili, A. (2007). Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29, 626–636. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.010>
- Shen, L. Struble, L., & Lange, D., (2009) Modeling dynamic segregation of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 106(4), 375-380.
- Skender, Z., Bali, A., & Kettab, R. (2021). Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(10), 1852–1873. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1607564>
- Su, N., Hsu, K.-C., & Chai, H.-W. (2001) A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, 1799–1807. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00566-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00566-X)
- TS EN 197-1. (2012). Cement - Part1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. Turkish Standards Institute.
- TS EN 12350-8. (2011). Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test. Turkish Standards Institute.
- TS EN 12350-9. (2011). Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete - V-funnel test. Turkish Standards Institute.
- TS EN 12350-11. (2011). Testing fresh concrete - Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test. Turkish Standards Institute.
- TS EN 12350-12. (2011). Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test. Turkish Standards Institute.
- Wustholz, T. (2003). Fresh properties of self-compacting concrete (SCC). *Otto-Graf-Journal*, 14, 179-188.
- Zeghichi, L., Benghazi, Z., & Baali, L. (2014). The effect of the kind of sands and additions on the Mechanical behaviour of S.C.C. *Physics Procedia*, 55, 485 – 492. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.070>
- Zhu, W. & Gibbs, J.C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35, 1457–1462. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.001>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :24.04.2022
Kabul Tarihi :23.07.2022

Received Date :24.04.2022
Accepted Date :23.07.2022

LİNEER OLMAYAN SİSTEMLERİN KİMLİKLENDİRİLMESİ İÇİN KELEBEK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI KULLANILARAK İLERİ BESLEMELİ YAPAY SİNİR AĞININ EĞİTİMİ

TRAINING OF FEED FORWARD NEURAL NETWORK BY USING BUTTERFLY OPTIMIZATION ALGORITHM FOR IDENTIFICATION OF NONLINEAR SYSTEMS

Ceren BAŞTEMUR KAYA¹ (ORCID: 0000-0002-0091-3606)

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Nevşehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ceren BAŞTEMUR KAYA , ceren@nevsehir.edu.tr

ÖZET

Gerçek dünyada karşılaştığımız problemlerin pek çoğu lineer olmayan davranış sergilemektedir. Bu yüzden lineer olmayan problemlerin çözümü önemlidir. Bu problemlerin karakteristik yapısının lineer olmaması, onları karmaşık hale getirmektedir. Özellikle bu problemlerin kimliklendirilmesi için etkili yapay zekâ teknikleri gerekmektedir. Gerçek dünya düşünüldüğünde, var olan verilere göre bir model oluşturmak durumunda kalınabilir. Sahip olduğu güçlü yapısından dolayı, yapay sinir ağları (YSA) literatürde kullanılan önemli yapay zekâ tekniklerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. YSA ile etkili sonuçlar elde edebilmek için başarılı bir eğitim süreci şarttır. Bu çalışmada, lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi için ileri beslemeli yapay sinir ağının (İB-YSA) eğitiminde kelebek optimizasyon algoritmasının (KOA) performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, YSA'nın ağırlıkları KOA ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, İB-YSA'nın eğitiminde popülasyon büyüklüğü ve ağ yapısının etkisi detaylıca incelenmiştir. KOA'nın çözüm kalitesi ve yakınsama hızı açısından performansı değerlendirilmiştir. Uygulamalarda lineer olmayan dört sistem kullanılmıştır. Performans metriği olarak ortalama karesel hata tercih edilmiştir. Tüm sistemler için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesinde KOA tabanlı İB-YSA eğitim sürecinin etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kelebek optimizasyon algoritması, yapay sinir ağı, sistem kimliklendirme.

ABSTRACT

Many of the problems we encounter in the real world exhibit nonlinear behavior. Therefore, it is important to solve nonlinear problems. The nonlinearity of the characteristic nature of these problems complicates them. In particular, effective artificial intelligence techniques are required to identify these problems. Considering the real world, it may be necessary to create a model using known data. The artificial neural networks (ANNs) are one of the important artificial intelligence techniques used in the literature because of its strong structure. A successful training process is essential to obtain effective results with ANNs. In this study, the performance of butterfly optimization algorithm (BOA) was evaluated in training feed forward artificial neural network (FFNN) for the identification of nonlinear systems. In this context, the weights of the ANN were determined by BOA. At the same time, the effects of population size and network structure on the training of FFNN were studied in detail. The performance of the BOA in terms of solution quality and convergence speed was evaluated. In the applications, four nonlinear systems were used. The mean square error was preferred as the performance metric. When the results obtained for all systems were evaluated, it was observed that the FFNN training process based on BOA was effective in the identification of nonlinear systems.

Keywords: Butterfly optimization algorithm, artificial neural network, system identification.

ToCite: BAŞTEMUR KAYA, C., (2022). LİNEER OLMAYAN SİSTEMLERİN KİMLİKLENDİRİLMESİ İÇİN KELEBEK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI KULLANILARAK İLERİ BESLEMELİ YAPAY SİNİR AĞININ EĞİTİMİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 273-284.

GİRİŞ

Gerçek dünya problemlerinin çözümünde ve karmaşık mühendislik tasarımlarında pek çok parametrenin optimum değerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için türev tabanlı optimizasyon yaklaşımları uzun süredir kullanılmasına rağmen, sahip oldukları dezavantajlardan dolayı meta-sezgisel algoritmalar alternatif olarak geliştirilmiştir. Her meta-sezgisel algoritma doğadaki bir zeki davranışı modeller ve ilgili problemleri çözmeye çalışır. Meta-sezgisel yaklaşımlar; geliştirilmesinde kullanılan doğal fenomenler dikkate alınarak evrimsel algoritmalar, sürü zekâsı tabanlı algoritmalar, fizik tabanlı algoritmalar ve insan tabanlı algoritmalar olarak dört gruba ayrılabilir. Meta-sezgisel algoritmalar pek çok gerçek dünya probleminin çözümünde uzun süredir kullanılmaktadır (Aslan, 2022; Aslan & Demirci, 2020).

YSA, sınıflandırma, kümeleme, tahmin, örüntü tanıma ve kimliklendirme problemlerinin çözümünde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Tarım, finans, fen bilimleri, mühendislik, eğitim, enerji, sosyal bilimler, pazarlama ve yönetim YSA'nın kullanıldığı alanlardan bazılarıdır (Abiodun vd., 2018). YSA ile etkili bir modelleme gerçekleştirmek için etkili bir eğitim süreci gerekmektedir. Sahip olduğu avantajlar nedeniyle, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları YSA eğitiminde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Yapay arı koloni algoritması (YAK), parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSO), genetik algoritma (GA), armoni arama algoritması (AA), diferansiyel gelişim algoritması (DG) ve ateş böceği algoritması (AB) YSA eğitiminde yoğun kullanılan meta-sezgisel algoritmalarından bazılarıdır (Abd Elaziz vd., 2021; Akay vd., 2021; Hemeida vd., 2020).

KOA; YAK, PSO, GA, AA, DG ve AB algoritmaları ile kıyaslandığında daha güncel bir algoritmadır. YSA tabanlı çalışma sayısı diğer algoritmalara göre kısıtlıdır. Literatür genel olarak değerlendirildiğinde; KOA'nın pek çok gerçek dünya probleminin çözümünde kullanıldığı görülmektedir (Alawode vd., 2021; Arora & Singh, 2017; Assiri, 2021; Maheshwari vd., 2021; Zhi vd., 2020). Buna ek olarak, kısıtlı olmakla birlikte YSA ve KOA tabanlı çalışmalarda bulunmaktadır. Irmak ve Gülcü (Irmak & Gülcü), sınıflandırma problemlerinin çözümü için KOA kullanarak İB-YSA'nın eğitimini gerçekleştirmiştir. Önerdikleri yaklaşımın performansını BAT-MLP, SMS-MLP ve BP olarak adlandırdıkları yaklaşımlar ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri yaklaşımın performansının, diğer yaklaşımlardan daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir. Li ve ark. (Li vd., 2021) ağ trafiği verilerinin ayırt edici özelliklerini belirlemek için KOA ve YSA tabanlı bir yaklaşım kullanmıştır. Mahboob ve Moghaddam (Mahboob & Moghaddam, 2020) KOA ve İB-YSA tabanlı bir saldırı tespit sistemi önermiştir. Yogananda ve ark. (Yogananda vd., 2021), medikal verilerinin sınıflandırılması için KOA ve YSA tabanlı bir yaklaşım tanıtmıştır.

Gerçek dünyada pek çok problem lineer olmayan davranış sergilemektedir. Bu yüzden lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi önemlidir. Lineer olmayan sistemler statik veya dinamik davranışlar sergileyebilirler. Statik sistemler bir fonksiyona göre şekillenirken, dinamik sistemler ise geçmiş eylemlerden etkilenmektedir (Kaya, 2022). Lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi, yapısı gereği zor problemlerden biridir. Özellikle bir eğitim algoritmasının performansının değerlendirilmesi için lineer olmayan test sistemleri yoğun olarak kullanılmaktadır. YSA ve ANFIS eğitiminde de lineer olmayan sistemler belirtilen sebeplerden dolayı tercih edilmektedir (Karaboğa & Kaya, 2017; Kaya & Baştemur Kaya, 2021; Kaya, 2022).

YSA ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemleri gibi eğitim tabanlı modellerin performansının analiz edilmesinde lineer olmayan sistemler yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Karaboga & Kaya, 2019; Kaya & Baştemur Kaya, 2021). Özellikle lineer olmayan sistemlerin zor ve karmaşık yapıya sahip olması eğitim algoritmalarının başarısının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bununla birlikte, gerçek dünyadaki pek çok problem lineer olmayan davranış sergilemektedir. Algoritmaların sistem kimliklendirme çalışmalarında başarılı olması, farklı gerçek dünya problemlerinin çözümünde kullanılması için referans olabilir. Bu yüzden çalışma kapsamında problem grubu olarak lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi seçilmiştir. Bu çalışmada, lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi amacıyla KOA kullanılarak İB-YSA'nın eğitimi gerçekleştirilmektedir. Eğitim süreci ve kimliklendirmenin başarılı olması için farklı popülasyon büyüklükleri ve ağ yapılarının çözüme etkisi detaylıca incelenmiştir. Bu çalışma literatüre önemli katkılar sağlayacak olup, yenilik içermektedir.

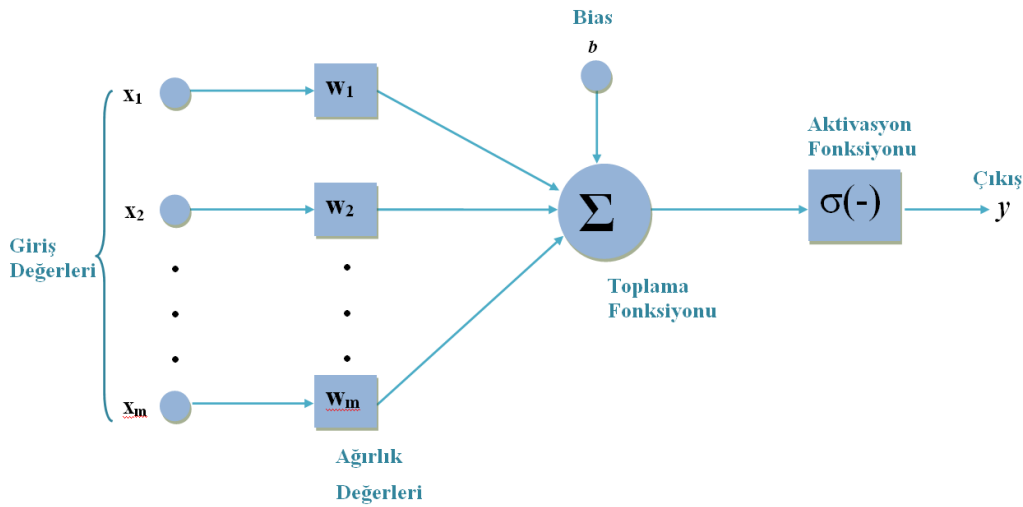
YAPAY SİNİR AĞI

Yapay zekâ tekniklerinden biri olan YSA, yapay nöronların birbirine bağlanmasından oluşur. Yapay bir nöronun genel yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Yapay bir nöron; girdiler, bias değeri, ağırlıklar, aktivasyon ve transfer fonksiyonundan oluşmaktadır. Nörondaki girdilerden bir çıktı elde edilir. Çıktı hesaplaması için Denklem (1)

kullanılmaktadır. Denklemdaki x giriş değeri, w girişe karşılık gelen ağırlık değerleri, b bias değeri, f aktivasyon fonksiyonu, y yapay nöronun çıktısına karşılık gelmektedir (Kaya & Baştemur Kaya, 2021; Kaya, 2022).

$$y = f\left(\sum_{i=1}^m w_i x_i + b\right) \quad (1)$$

İB-YSA girdi, gizli ve çıktı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. İB-YSA'da her nöronda Denklem (1) 'de belirtilen hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Böylelikle her nöron bir sonraki katmandaki nöronları etkiler. Aynı katmanda etkileşim bulunmamaktadır. İB-YSA'da da giriş değerlerine karşılık, çıkış değeri/değerleri elde edilmektedir. Sistem kimliklendirme problemlerinin çözümü için bir modelin oluşturulması gerekmektedir. Bu model ise eğitim süreci sonunda elde edilmektedir. Model oluşturulurken eğitim algoritması kullanılarak ağırlık ve bias değerleri sürekli güncellenerek ağ eğitilir. Eğitim süreci için eğitim veri seti kullanılmaktadır. Ağın öğrenme düzeyi, gerçek çıktı ile tahmin edilen çıktı arasındaki ilişkiyi ifade eden hata değeri ile ilgilidir. Başarılı bir eğitim süreci için hata değerinin düşük olması beklenen bir durumdur. Bunun için etkili bir eğitim algoritmasının kullanılması ve etkili bir eğitim sürecinin gerçekleşmesi gerekmektedir (Kaya & Baştemur Kaya, 2021; Kaya, 2022).



Şekil 1. Yapay Bir Nöronun Genel Yapısı

KELEBEK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Kelebekler yaşamlarını sürdürebilmek için duyu organlarından yararlanırlar. Duyular arasında en etkin olan ise koku almadır (Blair & Launer, 1997). Kelebeklerin zeki davranışlarının modellenmesiyle KOA geliştirilmiştir (Arora & Singh, 2019). KOA'da arama aracı olarak kelebekler kullanılır. Bir kelebeğin farklı durumlarda yaydığı kokuyu diğer kelebekler hissedebilir. Kelebeğin oluşturduğu bu sosyal ağ ile arama yapılır. KOA'da kelebeğin başka bir kelebek kokusunu alıp o yönde hareket etmesi küresel arama, herhangi bir koku almayı rastgele ilerlemesi ise yerel arama olarak isimlendirilir. KOA'da duysal yöntem (c), güç katsayısı (a) ve uyaran yoğunluğu (I) parametreleri ile algılama yöntemi belirlenir. Yöntem koku, ses, sıcaklık, ışık olabilir ancak KOA'da yöntem koku olarak alınır (Arora & Singh, 2019). Uyaran yoğunluğu uyarının büyüklüğünü simgeler. Güç katsayısı ise uyaran yoğunluğunun yükseltildiği katsayıdır. KOA'da koku (f) formülü Denklem (2)'de verilmiştir.

$$f = cI^a \quad (2)$$

f kokunun diğer kelebek tarafından ne kadar güçlü algılandığını ifade eder. a ve c $[0,1]$ aralığında alınabilir. KOA'da 1:Başlama, 2: Tekrarlama, 3: Son olmak üzere 3 aşama bulunmaktadır. Başlatma aşamasında tarafsız fonksiyon ve fonksiyonun çözüm aralığı, parametre değerleri tanımlanır. Optimizasyon için ilk kelebek popülasyonu oluşturulur. Kelebeklerin konumları, hesaplanan koku ve uygunluk değerleri ile arama aralığında rastgele oluşturulur. Oluşturulan yapay kelebeklerle tekrarlama aşamasına geçilir. Bu aşamada her tekrarlamada tüm kelebekler yeni konumlara hareket eder, uygunluk değerleri hesaplanır. Denklem (2) kullanılarak koku üretilir. Küresel arama aşamasında Denklem (3) kullanılarak kelebek en uygun çözüm g^* 'ye ulaşmaya çalışır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 * g^* - x_i^t) * fi \quad (3)$$

t yineleme sayısındaki i 'inci kelebek için çözüm vektörü x_i olarak alınarak denklemdeki x_i^t elde edilir. $r[0,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır. Yerel arama aşamasında Denklem (4) kullanılır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 * x_j^t - x_k^t) * fi \quad (4)$$

Arama uzayındaki j 'inci kelebek x_j^t , k 'inci kelebek x_k^t 'yi temsil eder. KOA'da küresel arama ile yerel arama arasında geçiş yapmak için p anahtar (değişim) olasılığı kullanılır. Durdurma kriterine ulaşıncaya kadar tekrarlar biter. En iyi uygunluk ile bulunan en iyi çözüm son aşamada sunulur. Algoritmanın yapısı Algoritma 1'de verilmiştir.

Algoritma 1. Kelebek Optimizasyon Algoritması (Arora & Singh, 2019)

1. Uygunluk fonksiyonu $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_{\dim})$, \dim =boyut parametrelerini belirle
2. n kelebeğin başlangıç popülasyonu oluştur $\mathbf{x}_i=(i=1, 2, \dots, n)$
3. x_i 'deki uyaran yoğunluğu I_i , $f(\mathbf{x}_i)$ kullanarak belirle
4. Sensör modalitesi c 'yi, güç katsayısı a 'yı ve değiştirme (anahtarlama) olasılığı p 'yi tanımla
5. **while** durdurma kriteri karşılanmadı **do**
6. **foreach** popülasyondaki her bf kelebeği için **do**
7. Denklem (2) kullanarak bf için koku hesapla
8. **endfor**
9. En iyi bf 'yi bul
10. **for** popülasyondaki her bf kelebeği için **do**
11. $[0,1]$ arasında rastgele bir r sayısı üret
12. **if** $r < p$ **then**
13. Denklem (3)'ü kullanarak en iyi kelebeğe/çözüme doğru ilerle
14. **else**
15. Denklem (4)'ü kullanarak rastgele hareket et
16. **endif**
17. **endfor**
18. a 'nın değerini güncelle
19. **endwhile**

SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi için KOA kullanılarak İB-YSA'nın eğitimi gerçekleştirilmektedir. Uygulama kapsamında dört adet lineer olmayan statik sistem (S1,S2,S3,S4) kullanılmıştır. Her uygulama için pek çok ağ yapısı denenerek etkili sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır. Buna ek olarak her uygulama en az 30 kere çalıştırılmıştır. Çözüm kalitesinin belirlenmesi için hata metriği olarak ortalama karesel hata (MSE) seçilmiştir. Popülasyon büyüklüğünün (n) 10, 20 ve 50 değerleri için sonuçlar elde edilmiştir. Eğitim sürecine ait durdurma kriteri olarak değerlendirme sayısı kullanılmıştır. Tüm sistemler için değerlendirme sayısı 20000 alınmıştır. Adil bir değerlendirme için, değerlendirme sayısı sabit kalmakla birlikte popülasyon büyüklüğü ve jenerasyon sayısı değişmiştir. $n=10$ olması durumunda, jenerasyon sayısı 2000 olarak alınmıştır. $n=20$ 'de jenerasyon sayısı 1000 olurken, $n=50$ olması durumunda jenerasyon sayısı 400 olmaktadır. YSA tabanlı kimliklendirme çalışmalarında eğitim süreçleri çoğunlukla uzun süreler almaktadır. Ayrıca, sonuçların anlamlılığının analizi için en az 30 kere çalıştırılmaktadır. Bu durum da işlem süresi daha fazla uzatmaktadır. Buna ek olarak, ilk 20000 değerlendirme de yakınsamanın genel olarak daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Değerlendirme sayısının belirlenmesinde, bu hususlar dikkate alınarak 20000 değeri belirlenmiştir. Anahtar (değişim) olasılığı (p) ise 0.8 alınmıştır. Güç katsayısı (a) ve duyuşal yöntem (c)'in değerleri ise sırasıyla 0.1 ve 0.01'dir.

Tablo 1. Uygulamalarda Kullanılan Statik Sistemler

Sistem	Denklem	Girişler	Çıkış	Veri Seti İçeriği (Eğitim /Test)	Aralık
--------	---------	----------	-------	----------------------------------	--------

S1	$y = 2 \sin(\pi x_1)$	x_1	80/20	[0,1]
S2	$y = \sin(x_1 x_2)$	x_1, x_2	80/20	[-2,2]
S3	$y = 1 + 0.3/(0.9 + x_1) + 0.5 \ln(1 + x_2) + 0.7 \cos(0.4 x_3)$	x_1, x_2, x_3	100/25	[0,1]
S4	$y = e^{2x_1 \sin(\pi x_4)} + \sin(x_2 x_3)$	x_1, x_2, x_3, x_4	100/25	[-0.25, 0.25]

Uygulamalarda kullanılan lineer olmayan statik sistemlere ait bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur. S1, S2, S3 ve S4 sisteminin giriş sayıları sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 şeklindedir. Tüm sistemler bir çıkışa sahiptir. Tüm sistemlerin denklemleri Tablo 1’de görülmektedir. İlgili sistemlerin kimliklendirilmesinin sağlanabilmesi için belirtilen aralıkta giriş seti oluşturulmuş ve girişlere karşılık bir çıkış seti elde edilmiştir. İlk iki sistem için 100 giriş-çıkış çiftinden oluşan bir veri seti oluşturulurken, son iki sistem için ise 125 giriş-çıkış çiftinden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Sistemlere ait veri setlerindeki veri sayılarının değişkenlik göstermesinde giriş sayıları ve aralık değerleri etkili olmuştur. Lineer olmayan statik sistemlerin YSA tabanlı kimliklendirilmesine yönelik önemli çalışmalardan biri Kaya ve Baştemur Kaya (2021) tarafından yapılmıştır. Bahsi geçen çalışmada çoğunlukla, veri setinin %80’i eğitim süreci için, kalan %20’lik veri ise test sürecinde kullanılmıştır. Bu çalışma dikkate alınarak, veri setinin %80’i eğitim sürecinde, %20’si ise test sürecinde kullanılmıştır. Test verileri belirlenirken, tüm veri setini kapsamaya dikkat edilmiştir. Bu sebeple test veri setinin belirlenmesinde, mod(i, 5) yaklaşımı uygulanmıştır. Burada i, veri setinin indisine karşılık gelmektedir. Yani veri seti baştan sona kadar taranmıştır. Her beş veriden ilk dört tanesi eğitim verisi, son bir tanesi ise test verisi olarak alınmıştır. Yani, eğer mod(i, 5)=0 ise, ilgili veri test veri setine dahil edilmiştir. Oluşturulan YSA modelinde her nöron için Sigmoid fonksiyon kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak ise Toplam seçilmiştir. Her nöron için bias değeri kullanılmıştır. Eğitim ve test sürecinde kullanılacak veri seti [0,1] aralığında ölçeklenmiştir.

S1 için gizli katmanda 3, 6, 9, 12 ve 15 nörondan oluşan ağ modellerinin performansları analiz edilmiştir. S1 için elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmaktadır. n=10 için en iyi eğitim hata değeri 1-9-1 ağ yapısı ile 0.02340 olarak bulunmuştur. Gizli katmandaki nöron sayısı 9 olana kadar performansın arttığı gözlemlenirken daha sonraki nöron sayısı artışlarında çözüm kalitesi azalmıştır. Eğitim sürecine ait standart sapma değeri de hata değerinde olduğu gibi 1-9-1 de daha etkilidir. n=10 için test hata değerinde en iyi sonuç 1-12-1 ile elde edilmiştir. 1-15-1 ağ yapısı dışında nöron sayısındaki artış çözüm kalitesini iyileştirmiştir. n=20’de eğitim ve test değerleri n=10’dan daha iyi olduğu görülmektedir. En iyi sonuçlar n=10’da olduğu gibi eğitim ve test süreci için sırasıyla 1-9-1 ve 1-12-1 ağ yapılarında elde edilmiştir. En iyi eğitim hata değeri 0.01316 iken, en iyi test hata değeri 0.01522 olmuştur. Genel olarak n=20’de etkili standart sapma değerlerine de ulaşılmıştır. n=50 için en iyi eğitim hata değeri 1-15-1 ile 0.01334 olarak bulunmuştur. Test için ise en etkili ağ yapısı 1-12-1 ile 0.01603 olarak elde edilmiştir. Tüm popülasyon büyüklükleri beraber değerlendirildiğinde en iyi çözüme n=20 ile ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 2. S1 İçin Elde Edilen Sonuçlar

Popülasyon Büyüküğü	Ağ Yapısı	Eğitim		Test	
		Hata	SS	Hata	SS
n=10	1-3-1	0.05351	0.02482	0.05869	0.02715
	1-6-1	0.04058	0.03240	0.04217	0.03406
	1-9-1	0.02340	0.02392	0.02677	0.02564
	1-12-1	0.02360	0.02799	0.02427	0.02793
	1-15-1	0.02764	0.03106	0.03068	0.03187
n=20	1-3-1	0.03608	0.02625	0.03613	0.02542
	1-6-1	0.02189	0.02183	0.02492	0.02330
	1-9-1	0.01316	0.01218	0.01584	0.01335
	1-12-1	0.01323	0.01118	0.01522	0.01249
	1-15-1	0.01887	0.02149	0.02121	0.02279
n=50	1-3-1	0.03205	0.02345	0.03585	0.02546
	1-6-1	0.02436	0.01736	0.02700	0.01720
	1-9-1	0.01881	0.01526	0.02197	0.01621
	1-12-1	0.01341	0.00991	0.01603	0.01033
	1-15-1	0.01334	0.01173	0.01621	0.01336

S2 için elde edilen sonuçlar Tablo 3’de sunulmuştur. En iyi ortalama eğitim ve test hata değerleri n=50 ile bulunmuştur. Elde edilen en iyi eğitim ve test hata değerleri sırasıyla 0.04974 ve 0.06319’dır. n=10 için en başarısız eğitim sonucu 2-3-1 ağ yapısı ile elde edilmiştir. Özellikle, düşük parametre sayısının modeli tanımlamada yeterli olmadığı ortaya çıkmıştır. n=10 için en iyi eğitim hata değeri 2-12-1 ile bulunurken, en iyi test hata değeri ise 2-6-1 ağ yapısına aittir. n=10’da gizli katmandaki nöron sayısının artmasının performansa etkisi değişkenlik göstermiştir. Yani, 2-6-1 ve 2-12-1 ile bulunan eğitim sonuçları 2-9-1’den daha iyidir. Bu yüzden kesin çıkarım yapılamamaktadır. n=20’de nöron sayısının artması eğitim ve test hatalarını zıt yönlü etkilemiştir. Özellikle 2-9-1 ağ yapısına kadar, nöron sayısının artışı eğitim hata değerini iyileştirirken, test hata değerini kötüleştirmiştir. n=20 için en iyi eğitim ve test hata değerleri sırasıyla 2-9-1 ve 2-15-1 ağ yapılarında elde edilmiştir. n=50’de genel olarak nöron sayısının artışı eğitim hata değerini iyileştirirken, test hata değerini kötüleştirmiştir.

Tablo 3. S2 İçin Elde Edilen Sonuçlar

Popülasyon Büyüküğü	Ağ Yapısı	Eğitim		Test	
		Hata	SS	Hata	SS
n=10	2-3-1	0.09039	0.02365	0.06898	0.01917
	2-6-1	0.07494	0.02870	0.06477	0.01214
	2-9-1	0.07826	0.02869	0.07146	0.01924
	2-12-1	0.07361	0.02865	0.07666	0.02987
	2-15-1	0.07677	0.02964	0.07662	0.03143
n=20	2-3-1	0.08498	0.01470	0.06832	0.01781
	2-6-1	0.05949	0.02070	0.07212	0.01683
	2-9-1	0.05553	0.02708	0.07439	0.01671
	2-12-1	0.05808	0.02755	0.07811	0.02168
	2-15-1	0.06054	0.02772	0.06701	0.01312
n=50	2-3-1	0.07979	0.01409	0.06319	0.01191
	2-6-1	0.06117	0.01879	0.06494	0.01600
	2-9-1	0.05698	0.01843	0.06737	0.02407
	2-12-1	0.04974	0.02154	0.07117	0.01580
	2-15-1	0.05395	0.01852	0.06379	0.01831

Tablo 4. S3 İçin Elde Edilen Sonuçlar

Popülasyon Büyüküğü	Ağ Yapısı	Eğitim		Test	
		Hata	SS	Hata	SS
n=10	3-3-1	0.02130	0.01161	0.03766	0.01960
	3-6-1	0.02409	0.01327	0.05013	0.03533
	3-9-1	0.02458	0.01460	0.04071	0.02647
	3-12-1	0.01803	0.01177	0.03578	0.02116
	3-15-1	0.01852	0.01056	0.03734	0.02131
n=20	3-3-1	0.01527	0.00429	0.03219	0.01690
	3-6-1	0.01301	0.00540	0.02753	0.01902
	3-9-1	0.01304	0.00795	0.02523	0.01367
	3-12-1	0.01331	0.00559	0.02454	0.01096
	3-15-1	0.01178	0.00366	0.02325	0.01046
n=50	3-3-1	0.01331	0.00377	0.02329	0.00729
	3-6-1	0.01114	0.00238	0.02268	0.00739
	3-9-1	0.01025	0.00221	0.02081	0.00865
	3-12-1	0.01049	0.00216	0.02125	0.00889
	3-15-1	0.01049	0.00158	0.02030	0.00671

S3 için bulunan sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir. n=20 ve n=50 ile elde edilen sonuçlar çoğunlukla n=10’a göre daha başarılıdır. n=10’da nöron sayısındaki artış hem eğitim hem de test sürecindeki sonuçları iyileştirmiştir. Eğitim ve test için en iyi hatalar 3-12-1 ağ yapısı ile sırasıyla 0.01803 ve 0.03578 olarak bulunmuştur. n=20’de nöron

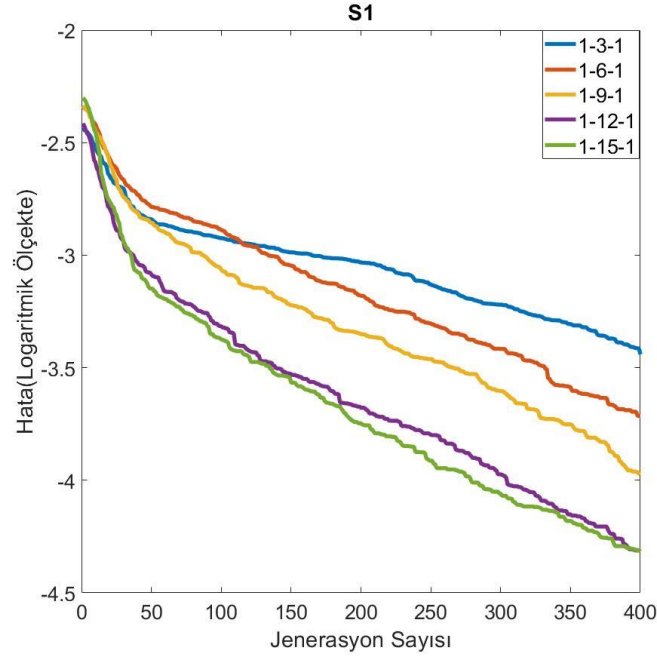
sayısındaki artışın çözüm kalitesini iyileştirdiği net bir şekilde görünmektedir. $n=20$ için en iyi hata değerleri 3-15-1 ağ yapısı ile bulunmuştur. Diğer popülasyon büyüklüklerinde olduğu gibi $n=50$ seçildiğinde, ağ yapısının büyümesi genellikle çözüm kalitesini iyileştirmektedir. $n=50$ 'nin eğitim sonuçlarına bakıldığında 3-9-1, 3-12-1 ve 3-15-1 ile birbirine yakın sonuçlar bulunmuştur. En iyi eğitim hata değeri ise 0.01025 olarak 3-9-1'e aittir. En iyi test hata değeri ise 3-15-1 ile 0.02030 olarak bulunmuştur.

S4 için elde edilen sonuçlar Tablo 5'de sunulmuştur. $n=10$ ve $n=20$ 'de nöron sayısındaki artış çoğunlukla, eğitim ve test sürecine ait çözüm kalitesini iyileştirmiştir. $n=50$ 'de ise değişken davranış sergilenmiştir. En etkili sonuçlar ise $n=20$ ve $n=50$ 'de elde edilmiştir. $n=10$ 'da en iyi eğitim ve test sonucu 4-12-1 ağ yapısı ile bulunmuştur. $n=20$ 'de bulunan en iyi eğitim ve test hata değerleri sırasıyla 0.00657 ve 0.00538'dir. $n=50$ için bulunan en iyi hata değerleri ise sırasıyla 0.00666 ve 0.00537'dir. $n=20$ ve $n=50$ 'nin en iyi sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.

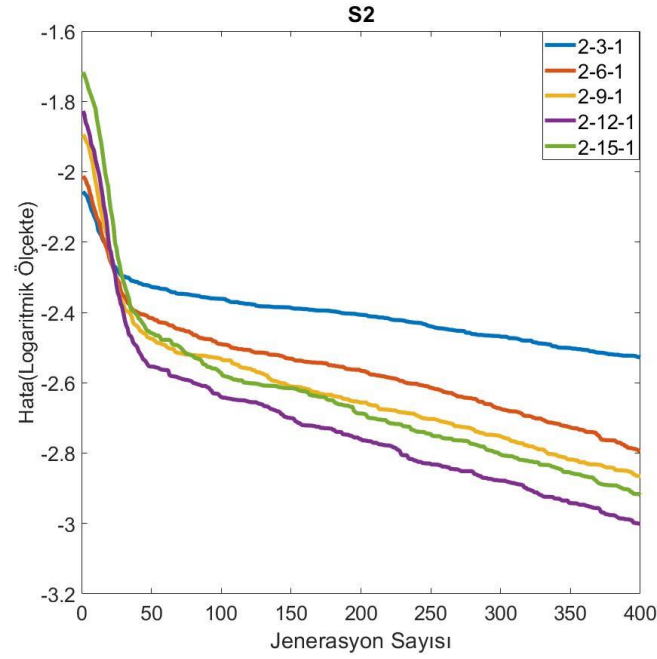
Tablo 5. S4 İçin Elde Edilen Sonuçlar

Popülasyon Büyüküğü	Ağ Yapısı	Eğitim		Test	
		Hata	SS	Hata	SS
n=10	4-3-1	0.00802	0.00138	0.00719	0.00223
	4-6-1	0.00793	0.00158	0.00703	0.00207
	4-9-1	0.00782	0.00125	0.00691	0.00154
	4-12-1	0.00703	0.00083	0.00580	0.00115
	4-15-1	0.00741	0.00090	0.00646	0.00137
n=20	4-3-1	0.00685	0.00118	0.00566	0.00147
	4-6-1	0.00658	0.00079	0.00552	0.00098
	4-9-1	0.00657	0.00081	0.00542	0.00102
	4-12-1	0.00662	0.00057	0.00541	0.00083
	4-15-1	0.00674	0.00065	0.00538	0.00072
n=50	4-3-1	0.00668	0.00060	0.00541	0.00076
	4-6-1	0.00666	0.00046	0.00564	0.00064
	4-9-1	0.00681	0.00072	0.00571	0.00117
	4-12-1	0.00669	0.00052	0.00552	0.00062
	4-15-1	0.00670	0.00038	0.00537	0.00070

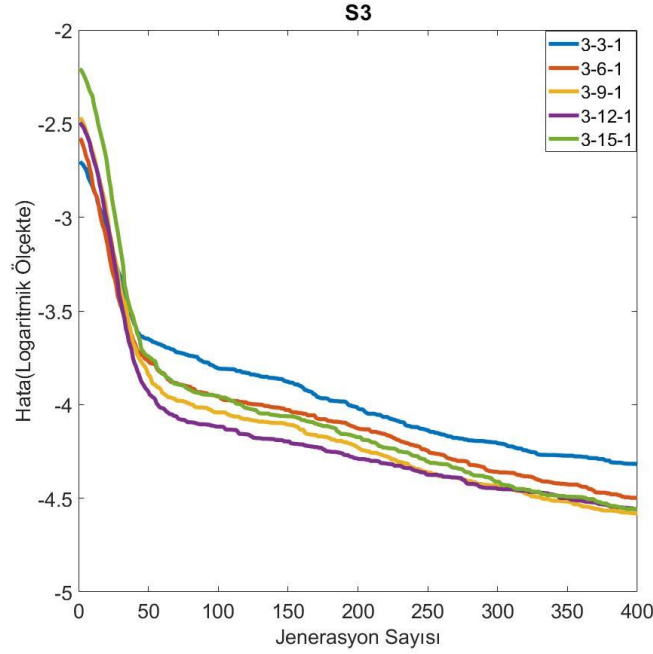
Algoritmanın performansını değerlendirmek için çözüm kalitesinin yanı sıra yakınsama hızı da önemli bir metriktir. Özellikle ağ yapıları performansı önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden tüm sistemler için ağ yapılarının yakınsama hızına etkisi incelenmiştir. $n=20$ ve $n=50$ için genel olarak daha etkili sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle eğitim ve test hata değerleri birlikte değerlendirildiğinde $n=50$ 'nin daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle $n=50$ 'ye göre grafikler oluşturulmuştur.



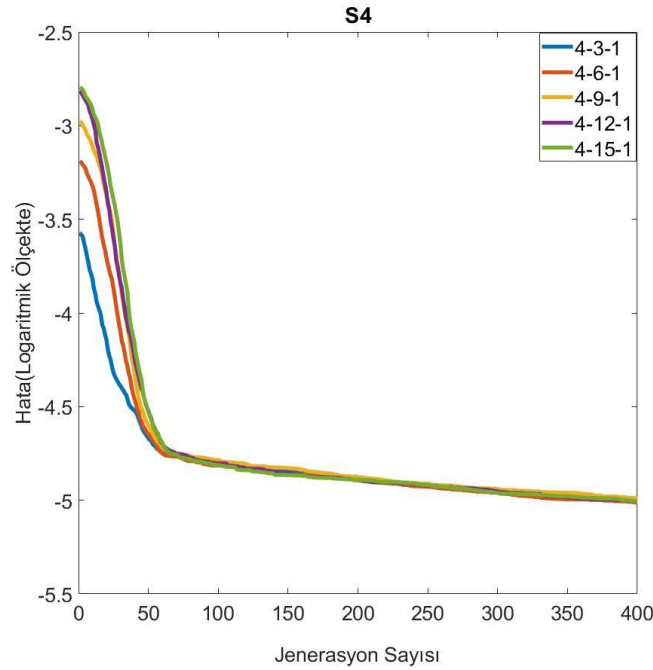
Şekil 2.S1 İçin Ağ Yapılarına Ait Yakınsama Grafiklerinin Karşılaştırması



Şekil 3.S2 İçin Ağ Yapılarına Ait Yakınsama Grafiklerinin Karşılaştırması



Şekil 4.S3 için Ağ Yapılarına Ait Yakınsama Grafiklerinin Karşılaştırması



Şekil 5.S4 için ağ yapılarına ait yakınsama grafiklerinin karşılaştırması.

S1 için ağ yapılarının yakınsamaya etkisi Şekil 2’de karşılaştırılmıştır. Özellikle 1-12-1 ve 1-15-1 ağ yapılarının yakınsama hızlarının birbirine yakın oldukları görülmektedir. Bununla birlikte nöron sayısındaki artış yakınsama hızını olumlu yönde etkilemiştir. Şekil 3’te S2’ye ait yakınsama grafiği sunulmuştur. En iyi yakınsama grafiğinin 2-12-1’e ait olduğu görülmektedir. Buna ek olarak 2-9-1 ve 2-15-1’in yakınsama hızları da birbirine yakındır. Şekil 4’te S3 sistemine ait yakınsama hızları verilmiştir. Jenerasyon sayısı yaklaşık olarak 200 değerine kadar 3-12-1’in yakınsama hızı diğerlerinden daha iyidir. Bu değerden sonra 3-12-1, 3-9-1 ve 3-15-1’in yakınsama hızları birbirine

yakın seyretmiştir. Şekil 5, S4'e ait yakınsama grafiğini vermektedir. Burada görüldüğü üzere tüm ağ yapılarının yakınsama hızı birbirine yakındır. Yani performansla ağ yapısının etkisi sınırlı düzeyde kalmıştır.

Tablo 6. KOA'nın Performansının Farklı Meta-Sezgisel Algoritmalar İle Karşılaştırılması

Sistem	HS		SCA		WOA		KOA (Önerilen)	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
S1	0.13050	0.12586	0.00589	0.00712	0.00806	0.01002	0.01341	0.01603
S2	0.21110	0.20232	0.03990	0.10223	0.04452	0.07880	0.04974	0.07117
S3	0.14054	0.17674	0.01131	0.02528	0.02622	0.05959	0.01049	0.02125
S4	0.07386	0.07413	0.00889	0.00803	0.00745	0.00760	0.00669	0.00552

Tablo 7. Algoritmaların Başarı Sıralamalarının Karşılaştırılması

Sistem	HS		SCA		WOA		KOA (Önerilen)	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
S1	4	4	1	1	2	2	3	3
S2	4	4	1	3	2	2	3	1
S3	4	4	2	2	3	3	1	1
S4	4	4	3	3	2	2	1	1
Toplam	16	16	7	9	9	9	8	6
		32		16		18		14

Tablo 6'da KOA'nın performansı meta-sezgisel algoritmalarla armoni arama (AA-HS), sinüs kosinüs algoritma (SKA-SCA) ve balina optimizasyon algoritması (BOA-WOA) ile karşılaştırılmıştır. Tüm algoritmalar için popülasyon büyüklüğü 50 ve jenerasyon sayısı 400 alınmıştır. Bununla birlikte, KOA'nın analiz çalışmalarında etkili olduğu tespit edilen ağ yapıları kullanılmıştır. Ağ yapılarının belirlenmesinde eğitim ve test süreçlerindeki performansları dikkate alınmıştır. Bu hususlar göz önünde bulundurularak gizli katmanda 12 nöron bulunan ağ yapıları kullanılmıştır. S1 ve S2 için en iyi eğitim hata değeri SCA ile bulunmuştur. S3 ve S4'de ise en iyi eğitim hata değeri KOA'ya aittir. Test sonuçlarında ise üstünlük KOA'ya aittir. S2, S3 ve S4'de en iyi test hata değerleri KOA ile elde edilirken, S1'de en iyi test sonucu SCA'ya aittir. Hem eğitim hem de testte en kötü sonuçlar HS ile bulunmuştur. WOA ise genel olarak 2. veya 3. sıralarda yer almıştır. Algoritmaların problemlere göre başarı sıralaması değişmektedir. En iyi algoritmanın hangisi olduğunu tespit etmek için Tablo 7'de algoritmaların başarı sıralaması karşılaştırılmıştır. Toplam skorlara göre en başarılı algoritma 14 puan ile KOA olmuştur. Sonrasında 16 puan ile SCA gelmektedir. SCA'yı 18 puan ile WOA takip etmektedir. En başarısız algoritma ise 32 puan ile HS olmuştur.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, lineer olmayan sistemlerin kimliklendirilmesi için gerçekleştirilen IB-YSA'nın eğitiminde KOA'nın performansı değerlendirilmiştir. Farklı popülasyon büyüklükleri ve ağ yapıları için sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmanın bazı kısıtlılıkları bulunmaktadır. Bunlar popülasyon büyüklüğü, ağ yapısı, değerlendirme sayısı ve kullanılan sistemler üzerinedir. Buradaki analizler sadece popülasyon büyüklükleri $n=\{10, 20, 50\}$ için geçerlidir. Ağ yapısının performans etkisinin olduğu bir gerçektir. Tüm alternatif ağ yapılarının denemesi, anlamlılığı artırmakla birlikte, uygulamada maliyeti artıran bir durumdur. Bu yüzden ağ yapıları üzerine kısıtlama uygulanmış ve gizli katmandaki nöron sayısının 3, 6, 9, 12 ve 15 olma durumlarına göre analizler gerçekleştirilmiştir. Diğer kısıtlılıklardan biri ise değerlendirme sayısıdır. Kullanılan sistemlerin zorluğuna ve eğitim algoritmasına göre değişmekle birlikte, değerlendirme sayısının artması çözüm kalitesini artırabilir. Bazı durumlarda ise belirli bir değerlendirme sayısından sonra çözüm iyileştirilemeyebilir. Değerlendirme sayısının büyük olması maliyet açısından dezavantajlı bir durumdur. Bu yüzden değerlendirme sayısı çalışmanın kısıtlılıklarından biridir. Çalışmada sadece dört adet statik özellikli lineer olmayan sistem kullanılmıştır. Çalışmadaki analizler bu sistemler özelinde gerçekleştirilmektedir.

Meta-sezgisel algoritmaların karmaşıklığı, birbirlerine avantaj veya dezavantaj sağlayan önemli kriterlerden biridir. Buna karşın, meta-sezgisel algoritmalar ile YSA eğitimi, çok uzun süreler almaktadır. Özellikle lineer olmayan

sistemlerin kimliklendirilmesinde, problem yapısı ve veri yoğunluğu bu süreyi daha da artırabilmektedir. Ayrıca istatistiksel analizlerin yapılabilmesi için her uygulama en az 30 kere çalıştırılmıştır. Bu şekilde çalışma süresi daha da artmaktadır. İlgili problemin çözümü için YSA eğitim sürecinde, genel olarak bütün meta-sezgisel algoritmalarda benzer bir dezavantaj yaşanmaktadır. Çalışma süresinin uzun olması, ilgili problemler için algoritma karmaşıklığını önemsiz kılmaktadır. Bu yüzden ilgili problemin çözümü için literatür değerlendirildiğinde, çoğunlukla algoritma karmaşıklığının karşılaştırma kriterleri arasında yer almadığı görülmektedir.

Eğitim sonuçları dikkate alındığında, popülasyon büyüklüğün çözümü etkilediği gözlemlenmiştir n=20 ve n=50 için elde edilen hata değerlerinin çoğunlukla n=10'dan daha başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Benzer durum test süreci içinde geçerlidir. Popülasyon büyüklüğü gibi ağ yapısı da çözüm kalitesini etkileyen hususlardan biridir. Özellikle gizli katmandaki nöron sayısının artması, eğitim sürecinde optimize edilecek parametre sayısını da artırmaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, genel olarak gizli katmandaki nöron sayısının 9-15 arasında olması çözüm kalitesini artırmaktadır. Bu durum yakınsama grafiklerinden de görülmektedir. Kullanılan sistem yapısı, elde edilen hata aralığını da doğrudan etkilemektedir. Zor problemlerin modellenmesi daha zor olmakla birlikte, hata değeri de daha yüksek olmaktadır. Daha iyi modelin oluşturulduğu sistemlerde ise hata oranı düşmektedir. Tüm sistemler değerlendirildiğinde e-02 ve e-03 seviyesinde hata değerleri elde edilmiştir. Değerlendirme sayısının artırılması, daha düşük hata değerlerinin elde edilmesini sağlayabilir. Mevcut değerlendirme sayısı dikkate alındığında, sistem kimliklendirme için gerçekleştirilen İB-YSA eğitiminde KOA'nın etkili olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, KOA'nın sistem kimliklendirme üzerine performansı değerlendirilmiştir. Bilindiği üzere, YSA pekçok alanda farklı problemlerin çözümünde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Gelecek çalışmalarda ekonomi, tıp, biyomedikal, enerji, sosyal bilimler, eğitim ve mühendislik gibi alanlardaki gerçek dünya problemlerinin çözümü ile KOA tabanlı YSA eğitiminin gerçekleştirilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

Abd Elaziz, M., Dahou, A., Abualigah, L., Yu, L., Alshinwan, M., Khasawneh, A. M., & Lu, S. (2021). Advanced metaheuristic optimization techniques in applications of deep neural networks: a review. *Neural Computing and Applications*, 33(21), 14079-14099.

Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4(11), e00938.

Akay, B., Karaboga, D., & Akay, R. (2021). A comprehensive survey on optimizing deep learning models by metaheuristics. *Artificial Intelligence Review*, 1-66.

Alawode, B. O., Salman, U. T., & Khalid, M. (2021). A Flexible Operation and Sizing of Battery Energy Storage System Based on Butterfly Optimization Algorithm. *Electronics*, 11(1), 109.

Arora, S., & Singh, S. (2017). Node localization in wireless sensor networks using butterfly optimization algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(8), 3325-3335.

Arora, S., & Singh, S. (2019). Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. *Soft Computing*, 23(3), 715-734.

Aslan, S. (2022). An immune plasma algorithm with a modified treatment schema for UCAV path planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 112, 104789.

Aslan, S., & Demirci, S. (2020). Immune plasma algorithm: a novel meta-heuristic for optimization problems. *IEEE Access*, 8, 220227-220245.

Assiri, A. S. (2021). On the performance improvement of Butterfly Optimization approaches for global optimization and Feature Selection. *PloS one*, 16(1), e0242612.

Blair, R. B., & Launer, A. E. (1997). Butterfly diversity and human land use: Species assemblages along an urban gradient. *Biological conservation*, 80(1), 113-125.

Hemeida, A. M., Hassan, S. A., Mohamed, A.-A. A., Alkhalaf, S., Mahmoud, M. M., Senjyu, T., & El-Din, A. B. (2020). Nature-inspired algorithms for feed-forward neural network classifiers: a survey of one decade of research. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(3), 659-675.

- Irmak, B., & Gülcü, Ş. Training of the Feed-Forward Artificial Neural Networks using Butterfly Optimization Algorithm. *MANAS Journal of Engineering*, 9(2), 160-168.
- Karaboğa, D., & Kaya, E. (2017). Training ANFIS by using the artificial bee colony algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(3), 1669-1679.
- Karaboga, D., & Kaya, E. (2019). Training ANFIS by using an adaptive and hybrid artificial bee colony algorithm (aABC) for the identification of nonlinear static systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(4), 3531-3547.
- Kaya, E., & Baştemur Kaya, C. (2021). A novel neural network training algorithm for the identification of nonlinear static systems: Artificial bee colony algorithm based on effective scout bee stage. *Symmetry*, 13(3), 419.
- Kaya, E. (2022). A comprehensive comparison of the performance of metaheuristic algorithms in neural network training for nonlinear system identification. *Mathematics*, 10(9), 1611.
- Li, Y., Ghoreishi, S.-m., & Issakhov, A. (2021). Improving the Accuracy of Network Intrusion Detection System in Medical IoT Systems through Butterfly Optimization Algorithm. *Wireless Personal Communications*, 1-19.
- Mahboob, A. S., & Moghaddam, M. R. O. (2020). An Anomaly-based Intrusion Detection System Using Butterfly Optimization Algorithm. 2020 6th Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS).
- Maheshwari, P., Sharma, A. K., & Verma, K. (2021). Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization. *Ad Hoc Networks*, 110, 102317.
- Yogananda, P., Babu, L. A., & Giri, A. A. (2021). Oppositional Butterfly Optimization Algorithm with Multilayer Perceptron for Medical Data Classification. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(10), 2721-2731.
- Zhi, Y., Weiqing, W., Haiyun, W., & Khodaei, H. (2020). Improved butterfly optimization algorithm for CCHP driven by PEMFC. *Applied Thermal Engineering*, 173, 114766.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.04.2022
Kabul Tarihi : 07.07.2022

Received Date : 25.04.2022
Accepted Date : 07.07.2022

SPI VE SPEI İLE SAMSUN İLİ KURAKLIK ANALİZİ

SAMSUN PROVINCE DROUGHT ANALYSIS WITH SPI AND SPEI

*Mehmet İshak YÜCE*¹ (ORCID: 0000-0002-6267-9528)

*Hafzullah AKSOY*² (ORCID: 0000-0001-5807-5660)

*Ali AYTEK*³ (ORCID: 0000-0002-4867-5598)

Musa EŞİT^{4*} (ORCID: 0000-0003-4509-7283)

*Fetihhan UĞUR*¹ (ORCID: 0000-0002-4748-0107)

*İslam YAŞA*¹ (ORCID: 0000-0002-4809-9471)

*Abduselam ŞİMŞEK*¹ (ORCID: 0000-0002-9845-2229)

*İbrahim Halil DEGER*⁵ (ORCID: 0000-0001-6360-3923)

¹Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

⁴Adıyaman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, Türkiye

⁵Hasan Kalyoncu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Musa EŞİT, mesit@adiyaman.edu.tr

ÖZET

Kuraklığın tanımlanması, izlenmesi ve karakterizasyonu; su kaynakları planlaması ve yönetiminde büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Samsun kent merkezinde bulunan 17030 no'lu meteoroloji istasyonundan 1938-2020 yılları arasında kaydedilen aylık yağış verileri ve Standart Yağış İndeksi (SPI) ile Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) kullanılarak kuraklık analizi yapılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında, iklim değişikliğinin yağış, sıcaklık, nispi nem ve buharlaşma verileri üzerindeki etkileri %95 güven aralığına göre incelenmiştir. Sıcaklık verisinde artan bir eğilim söz konusu iken, yağış, nispi nem ve buharlaşma verilerinde herhangi bir eğilim gözlemlenmemiştir. SPI ve SPEI arasında 1 aylık zaman serilerinde güçlü bir ilişki elde edilirken, 3-, 6-, 9-, 12 ve 24-aylık zaman serilerinde bu ilişki güçlü olsa da belirleme katsayısı olan R² değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Samsun ili için kuraklık kategorileri arasında en fazla normal kuraklık görülmesine rağmen, çok şiddetli kuraklık kategorisi ise en az paya sahiptir. İki indeks arasında çok az farklılık gözlemlenmiştir. Ancak, çok şiddetli kuraklık kategorisinde yapılan indeks karşılaştırmaya dayalı analizler SPI indeksinin, SPEI indeksine göre daha hassas sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. İki indeks ile elde edilen bulgulara göre, 1950 yılında hem kuraklık süresi bakımından hem de kuraklık şiddeti bakımından uzun süren bir kuraklık gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Eğilim, iklim değişikliği, kuraklık, Samsun, SPEI, SPI, trend

ABSTRACT

Identification, monitoring and characterization of droughts are crucially significant in water resource planning and management. In this study, drought analysis is utilized by using the Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and monthly rainfall data recorded between 1938-2020 for station 17030 which is located in Samsun province. Firstly, the effects of climate change on precipitation, temperature, relative humidity and evaporation are investigated based on 95% confidence interval. While there has been an increasing trend in temperature data, no trend has been observed in precipitation, relative humidity and evaporation data. While a strong relationship is obtained between SPI and SPEI in 1-month time series and even though this relationship is strong in 3-, 6-, 9-, 12- and 24-month time series with decreasing R² value. Among drought categories, the normal drought category is noted as the most common category while extreme drought is indicated as the least category for Samsun province. Little difference is observed between the two indices. However, two indices

ToCite: YÜCE, M. İ., AKSOY, H., AYTEK, A., EŞİT, M., UĞUR, F., YAŞA, İ., ŞİMŞEK, A., & DEGER, İ. H., (2022). SPI VE SPEI İLE SAMSUN İLİ KURAKLIK ANALİZİ . *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 285-295.

in the extreme drought category indicate that SPI is more sensitive than SPEI. According to the findings obtained by the two indices, a long-lasting drought is observed in 1950 both considering drought duration and drought severity.

Keywords: Trend, climate change, drought, Samsun, SPI, SPEI

GİRİŞ

Kuraklık, eski çağlardan beri insanlığın karşılaştığı en büyük doğal afetlerden biri olup, ancak diğer tüm tehlikelerden daha fazla insanı etkilemesinin yanı sıra tüm doğal afetler arasında en karmaşık yapıya sahiptir (Wilhite, 2000; Ashraf and Routray, 2013). Diğer ekstrem olayların (sel, hortum ve kasırgalar gibi) aksine, kuraklık yavaş ve istikrarlı bir şekilde gelişmekte olup başlangıcını ve sonunu belirlemek kolay değildir (WMO, 2016). Kuraklık, kurak ve yarı kurak bölgelerde daha yaygın ve şiddetli olmakla beraber haftalar, aylar, yıllar hatta on yıllar boyunca devam edebilir. Küresel iklimin sürekli ısınmasını, insanların hayatta kalmasını ve toplumun sürdürülebilir kalkınmasını ciddi şekilde etkileyen kuraklık olaylarının sıklığı ve yoğunluğu giderek artmaktadır (Thomas and Prasannakumar 2016). Wilhite ve Glantz (1985), kuraklığın genellikle bir alanın uzun süre yeterli yağış almaması ve su kıtlığına yol açması durumunda meydana geldiğine dikkat çekmiştir. Şiddetli kuraklığın sürekli olarak meydana geldiği bir bölgede, kuraklığı etkileyen faktörler ve fiziksel mekanizmalar esasen, ilk olarak geriye dönük su koruma projesi tesisleri ve yetersiz afet direnci; ikincil olarak su döngüsü sisteminin doğal düzenlenmesini, özellikle su döngüsünün ölçeğini, zamanını ve sıklığını değiştiren ciddi toprak erozyonuna ve bitki örtüsü tahribatına yol açan orman kaynaklarının ekolojik olarak aşırı kesilmesi, üçüncüsü, anormal atmosferik sirkülasyon düzensiz yağışlara yol açması faktörleri nedeniyle son derece karmaşıktır (Min et al., 2011). Ayrıca su kıtlığı, yüksek su kullanımı ve su kaynaklarının plansız kullanımı nedeniyle de kuraklık meydana gelmektedir.

Önceki araştırmalar, kuraklığın temel olarak yetersiz yağış ve sıcaklıktaki keskin artıştan kaynaklandığını göstermiştir (Liu et al., 2021). Bu nedenle, belirli bir bölge ve zaman ölçeğindeki kuraklık özellikleri, yağış ve sıcaklığa göre değerlendirilebilir ve kuraklığın sıklığını ve yoğunluğunu azaltmak için ilgili önlemler alınabilir (Wang et al., 2015). Genel olarak, kuraklık, genellikle bir sezon veya daha uzun süre boyunca ortalamanın altında sürekli bir su eksikliği ile ilgilidir (Dai, 2011; AghaKouchak and Nakhjiri 2012; Conostas et al., 2014). Örneğin, Wilhite ve Glantz (1985), Jeyaseelan (2003), AghaKouchak ve Nakhjiri (2012) gibi birçok bilim insanı, nedensel faktörlere dayalı olarak kuraklığı meteorolojik, hidrolojik, tarımsal ve sosyoekonomik olarak sınıflandırmıştır. Bu kuraklık türleri, yaygın olarak yağış eksikliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bunlar arasında meteorolojik kuraklık, tarımsal ve hidrolojik kuraklıkların daha olası oluşumlarına yol açan ana etkidir (Zhan et al., 2016; WMO 2016). Meteorolojik kuraklık kısa bir süre devam eder, ardından yetersiz yağış nedeniyle kuraklığın yol açacağı felaketler meydana gelmektedir. Bununla birlikte, yıllık yağış o bölgenin normal yağış miktarının %25'inden az olduğunda şiddetli bir meteorolojik kuraklık meydana gelir (Pal et al., 2000).

Kuraklık ciddi iklim olayı olduğundan, iklim değişikliğinin yağış, sıcaklık, buharlaşma gibi klimatolojik niceliklerin üzerindeki etkisinin ve bunun kuraklık üzerindeki yansımalarının bilinmesi de kuraklık analizleri için önem taşımaktadır, bu amaçla literatüre bakıldığında klimatolojik niceliklere ait trendlerin tespiti bir takım parametrik (F-testi, T-testi, lineer regresyon) ve parametrik olmayan (Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi, Standart Homojenlik Testi) gibi yöntemlerle tespit edilebilmektedir (Esit, 2021).

Kuraklık tekrarlayan bir iklim olayı olduğundan, sonucu tarımsal üretime büyük zarar vermesi, su arzının ve enerji üretimini azalması, kitlesel göç ve can kaybı ile kendini gösterir (Masih et al., 2014). Sheffield ve Wood (2008), Bannayan vd. (2010), Degefu ve Bewket (2015) gibi yazarlar, mekâna veya zamana bağlı olan kuraklık nedenlerinin ve çevre üzerindeki etkilerinin frekans, büyüklük, yoğunluk gibi nitelikleri tarafından belirlendiğini farklı şekilde göstermiştir. Son yıllarda kuraklık indeksleri ile ilgili bilimsel çalışmaların sayısı artmıştır. Ek olarak, kuraklığın değerlendirilmesi için farklı indeks yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Süre, şiddet, büyüklük vb. gibi kuraklık olaylarını doğru bir şekilde tespit etmek ve tahmin etmek için bugüne kadar kuraklıkla ilgili çeşitli indeksler önerilmiştir. Palmer kuraklık şiddet indeksi (PDSI), ilk olarak çeşitli iklimler altında nicelleştirilmiş kuraklık etkileri indeksi olarak kullanılmıştır (Palmer, 1965). Ancak bazı sınırlamalar, kalibrasyonlar ve mekansal karşılaştırılabilirlik nedeniyle araştırmacılar tarafından hala tartışılmaktadır (Mo and Chelliah, 2006; Vicente-Serrano et al., 2010; Dai, 2013;). Standart yağış indeksi (SPI), kuraklık olaylarını tanımlamak ve karşılaştırmak için farklı iklim bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (McKee et al., 1993). Bununla birlikte, buharlaşma-terleme nedeniyle su talebinin artmasına neden olan küresel sıcaklığın artması konusunda çok sayıda çalışma üzerinde anlaşmaya varılmıştır (Heim, 2017). Bu nedenle, standartlaştırılmış yağış buharlaşma indeksi

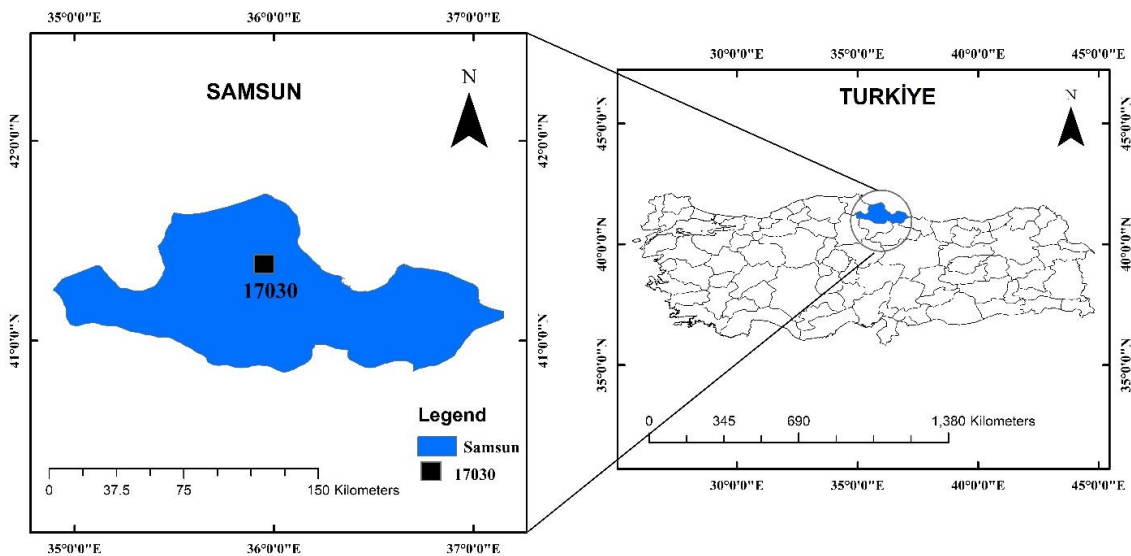
(SPEI), yağış ve potansiyel evapotranspirasyon (PET) dikkate alınarak geliştirilmiştir (Vicente-Serrano et al., 2008). Bir bölgeden diğerine değişen iklim değişkenliği nedeniyle kuraklık indekslerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Türkiye’de bu indeksleri kullanarak birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Aksoy vd. (2018) Edirne ili için SPI yöntemini kullanarak kuraklık şiddet-süre frekans eğrilerini elde etmişlerdir. Eris vd. (2020) ise Türkiye'nin Ege Bölgesi'ndeki Küçük Menderes Havzası üzerindeki meteorolojik kuraklığın mekansal-zamansal analizini birçok indeks kullanarak incelemişlerdir. Dabanlı vd. (2017) yaptığı çalışmada Türkiye'de uzun vadeli mekansal-zamansal kuraklık değişkenliğini SPI verilerini kullanarak analiz etmişlerdir. Mehr et al. (2020) SPI ve SPEI kullanarak iklim değişikliğinin meteorolojik kuraklık üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Yuce ve Esit (2021) Ceyhan havzasının kuraklık analizini 10 indeks kullanarak havza için en uygun kuraklık indeksinin değerlendirmesini yapmışlardır. Türkiye ile ilgili küçük ve büyük ölçekte birçok çalışma mevcuttur (Çavus & Aksoy, 2019; Yüce ve Eşit, 2020; Gumus et al., 2021; Simsek, 2021).

Samsun, Karadeniz bölgesinde bulunan ve su kaynaklarının, doğal güzelliklerin, biyolojik çeşitliliğin varlığı açısından zengin olan önemli illerdendir. Hem Kızılırmak hem Yeşilirmak havzalarında yer alan ve bu önemli ırmakların Bafra ve Çarşamba ovalarından Karadeniz’e ulaşmaları tarımsal bakımdan da Samsun ilini önemli hale getirmektedir (OKA, 2018) Samsun ilinin gerekse sahip olduğu zenginlikler gerekse de su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde korunak kullanılması açısından, iklim olaylarının sebep olduğu felaketlerin önceden doğru tahmin edilerek, önlemlerin alınmasını gerektirmektedir.

Bu çalışmada, Samsun kent merkezinde bulunan 17030 no’lu meteoroloji istasyonundan 1938-2020 yılları arasında kaydedilen aylık yağış verileri, SPI, SPEI indeksleri kullanılarak ve 1, 3, 6, 9, 12 ve 24 aylık zaman ölçekleri dikkate alınarak Samsun ili için detaylı bir kuraklık analizi yapılmıştır. İklim değişikliğinin etkilerinin araştırılabilmesi amacıyla, yağış, sıcaklık, buharlaşma ve nispi nem klimatolojik veri setlerine, parametrik olmayan Mann-Kendall ve Sen’in Eğim Testi metotları uygulanmıştır.

ÇALIŞMA BÖLGESİ VE YERİ

Karadeniz sahil şeridinin orta bölümünde Kızılırmak ve Yeşilirmak nehirlerinin Karadeniz’e döküldükleri deltalar arasında yer alan Samsun ili 9.083 km²’lik bir yüz ölçüme sahiptir. Coğrafi konum olarak 40° 50’ - 41° 51’ kuzey enlemleri, 37° 08’ ve 34° 25’ doğu boylamları arasında yer almaktadır (Sahin ve Yılmaz, 2009). Ancak sahil şeridi ve iç kesimlerinde iklim iki ayrı özellik gösterir. Sahil şeridinde (Merkez ilçe, Terme, Çarşamba, Bafra, Alaçam, 19 Mayıs, Tekkeköy ve Yakakent) Karadeniz ikliminin etkileri görülür. Bunun için sahil şeridinde yazlar sıcak, kışlar ılık ve yağışlı geçer. Kuzeyinde Karadeniz’in yer aldığı Samsun ilinin komşuları; güneyinde Tokat ve Amasya, doğusunda Ordu, Güney batısında Çorum, batısında ise Sinop illeridir. Samsun genellikle ılıman bir iklime sahiptir. Yılın en yüksek ve en düşük sıcaklığı sırasıyla 38,4 °C ve -2,4 °C olarak belirlenmiştir. Yıllık toplam yağış miktarı ise 779,7 kg/yıl’dır (Hekimoglu et al., 2007). Şekil 1’de Samsun ili ile ilgili bilgiler verilmiştir. Samsun ilinin aylık yağış, sıcaklık, nispi nem ve buharlaşma verilerine ait ortalama, standart sapma, değişim (Cv), çarpıklık (Cs) ve otokorelasyon (r1) katsayısı gibi istatistik bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Alanı

Tablo 1. Samsun Meteoroloji Gözlem İstasyonu ve İklim Verilerine Ait İstatistik Bilgiler

İstasyon	Parametre	İlk Gözlem Yılı	Son Gözlem Yılı	Enlem	Boylam	Ortalama	St. Sapma	Cv	Cs	r1
17030-Samsun	Yağış (mm)					59,91	40,38	0,67	1,37	0,14
	Sıcaklık (°C)	1938	2020	41,34	36,25	14,59	6,13	0,42	0,08	0,83
	Nispi Nem (%)					72,19	6,21	0,09	-0,25	0,49
	Buharlaşma (mm)					63,69	44,35	0,70	0,50	0,83

METODOLOJİ

Standart Yağış İndeksi (SPI)

McKee vd. (1993), SPI'yi, belirli bir zaman ölçeğinde gözlemlenen kümülatif yağışın uzun vadeli ortalamadan sapacağı standart sapmaların sayısı olarak tanımlamıştır. Tek bir sayısal değer olarak, SPI, belirgin şekilde farklı iklimlere sahip bölgeler arasında karşılaştırılabilir. Colorado İklim Merkezi, Batı Bölgesel İklim Merkezi ve Ulusal Kuraklık Azaltma Merkezi, ABD'deki kuraklığı izlemek için SPI'yi kullanır (Edwards and McKee, 1997). Kümülatif yağış normal olarak dağılmayacağından, McKee vd. (1993), kuraklık indeksini standartlaştırmak için verileri yaklaşık olarak normal dağılıma dönüştürmüştür. Thom (1958) iklim verilerine en uygun olasılık dağılımının Gama olduğunu bulmuştur. Pozitif SPI değerleri, ortalama yağıştan daha büyük, negatif değerler ise ortalama yağıştan daha düşük olduğunu göstermektedir. Kurak dönem, indeksin sürekli olarak negatif olduğu zaman periyodu olarak ifade edilir. Uzun süreli yağış geçmişine dayalı olarak, SPI, bir dönem, eksiklik veya fazlalık boyunca yağıştaki farkı, dönemin tarihsel ortalama yağış miktarına kıyasla nicelleştirir. Bu süre genellikle 3 ay ile 2 yıl arasında değişmektedir.

$$SPI = (P_i - P_m) / \sigma \quad (1)$$

burada: P_i , i yılının yağışı; P_m , çalışma döneminin ortalama yağış miktarıdır; σ standart sapmadır.

Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI)

SPEI, yaygın olarak kullanılan SPI kuraklık indeksinin bir uzantısıdır. SPEI, kuraklığın belirlenmesinde hem yağış hem de potansiyel evapotranspirasyonu (PET) hesaba katacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, SPI'den farklı olarak SPEI, artan sıcaklıkların su talebi üzerindeki ana etkisini yakalar. SPI gibi, SPEI de 1-48 ay arasında değişen bir zaman ölçeğinde hesaplanabilir (Vicente Serrano vd. 2010). Sıcaklık ve yağış gibi yalnızca sınırlı veriler mevcutsa, PET basit Thornthwaite yöntemiyle tahmin edilebilir. Bu basitleştirilmiş yaklaşımda rüzgâr hızı, yüzey nemi ve güneş radyasyonu gibi PET'i etkileyebilecek değişkenler hesaba katılmaz. Genellikle, daha fazla verinin mevcut olduğu durumlarda, kuraklık değişkenliğinin daha eksiksiz bir muhasebesini yapmak, PET'in daha karmaşık bir yöntemle hesaplanmasıyla mümkündür. Ancak, bu ek değişkenler büyük belirsizliklere sahip olabilir. SPEI, Eşitlik 2,3 ve 4 dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

Öncelikle PET, Penman-Monteith ve bu çalışmada kullanılan Thornthwaite yöntemi olmak üzere iki şekilde hesaplanmaktadır. Bir giriş parametresi olarak sadece hava sıcaklığına ihtiyaç duyan Thornthwaite yöntemi, eşitlik 3'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$PET = 16k \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (3)$$

Burada, T , ortalama aylık sıcaklık (°C), k , ölçme istasyonunun enlemine göre değerlendirilen bir faktör, I yıllık sıcaklık indeksi ve m , I ile ilgili bir katsayıdır (Yu et al., 2014). Hesaplanan "D" değerleri, farklı zaman ölçeklerinde eşitlik 4'teki gibi hesaplanır;

$$D_i^k = \sum_{j=0}^{k-1} (P_{n-1-j} - PET_{n-1-j}) \quad (4)$$

Burada, n hesaplama ayı, k (ay) toplamın zaman ölçeğidir. Tablo 2'de kuraklık kategorisi sınıflandırması verilmiştir.

Tablo 2. SPI ve SPEI İndekslerinin Kuraklık Kategorisi (Yuce ve Esit, 2021)

SPI/SPEI değerleri	Kuraklık Kategorisi
≥ 2	Çok şiddetli yağışlı
1,50 ~ 1,99	Çok yağışlı
1,00 ~ 1,49	Orta şiddetli yağışlı
0,99 ~ 0	Normal
0 ~ -0,99	Normale yakın kuraklık
-1,00 ~ -1,49	Orta şiddetli kuraklık
-1,50 ~ -1,99	Şiddetli kuraklık
≤ -2	Çok şiddetli kuraklık

Mann-Kendall Eğilim Testi

MK testi, bir zaman serisinde hidrometeorolojik değişimdeki eğilimi belirlemeye yönelik parametrik olmayan bir testtir ve sıralara dayalıdır (Mann, 1945; Kendal, 1975). Herhangi bir dağılıma uymadığından dolayı zaman serileri için en çok tercih edilen istatistiksel yöntemdir. MK test istatistiğinin Z değeri eşitlik 5-,6-,7 ve 8'deki formüllerle ifade edilir;

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_i^r t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Burada, x_j ve x_k , sırasıyla j ve k yılındaki yıllık değerler olup x_k , k zamanındaki veri noktasını temsil eder. Pozitif bir Z değeri artan bir trendi, negatif bir değer ise azalan bir trendi gösterir. Farklı anlamlılık seviyeleri için kritik test istatistiksel değerleri sırasıyla %90, %95 ve %99 olasılık seviyelerinde 1,645, 1,97 ve 2,57'dir (Yue et al., 1993).

Sen'in Eğim Testi

Sen (1968) tarafından geliştirilen Sen'in eğim testi, bir veri setindeki trendin eğimini hesaplayan parametrik olmayan bir testtir. Eşdeğerli zaman serileri için kullanılır. Her bir veri noktası için eğim farkı, değişen zaman başına hesaplanır. Trendin eğimi, aynı mevsimde veri çiftleri arasındaki tüm eğimlerin medyanı ile tahmin edilebilir. Tüm eğim çiftleri küçükten büyüğe sıralanır ve hesaplanan eğim sayısı (n) tek ise, ortanca eğim S eğimini verir. n çift ise, iki ortanca eğimin ortalaması alınır. Q zaman serisi içerisindeki veri, n veri sayısı ve T zamanı göstermek üzere Sen'in eğimini (S) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$S = \frac{Q_2 - Q_1}{T_2 - T_1} \quad (9)$$

$$S = \begin{cases} \frac{S_{n+1}}{2} & n = \text{çift} \\ \frac{S_n}{2} & n = \text{tek} \end{cases} \quad (10)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

Samsun İli için İklim Verilerinin Analizi

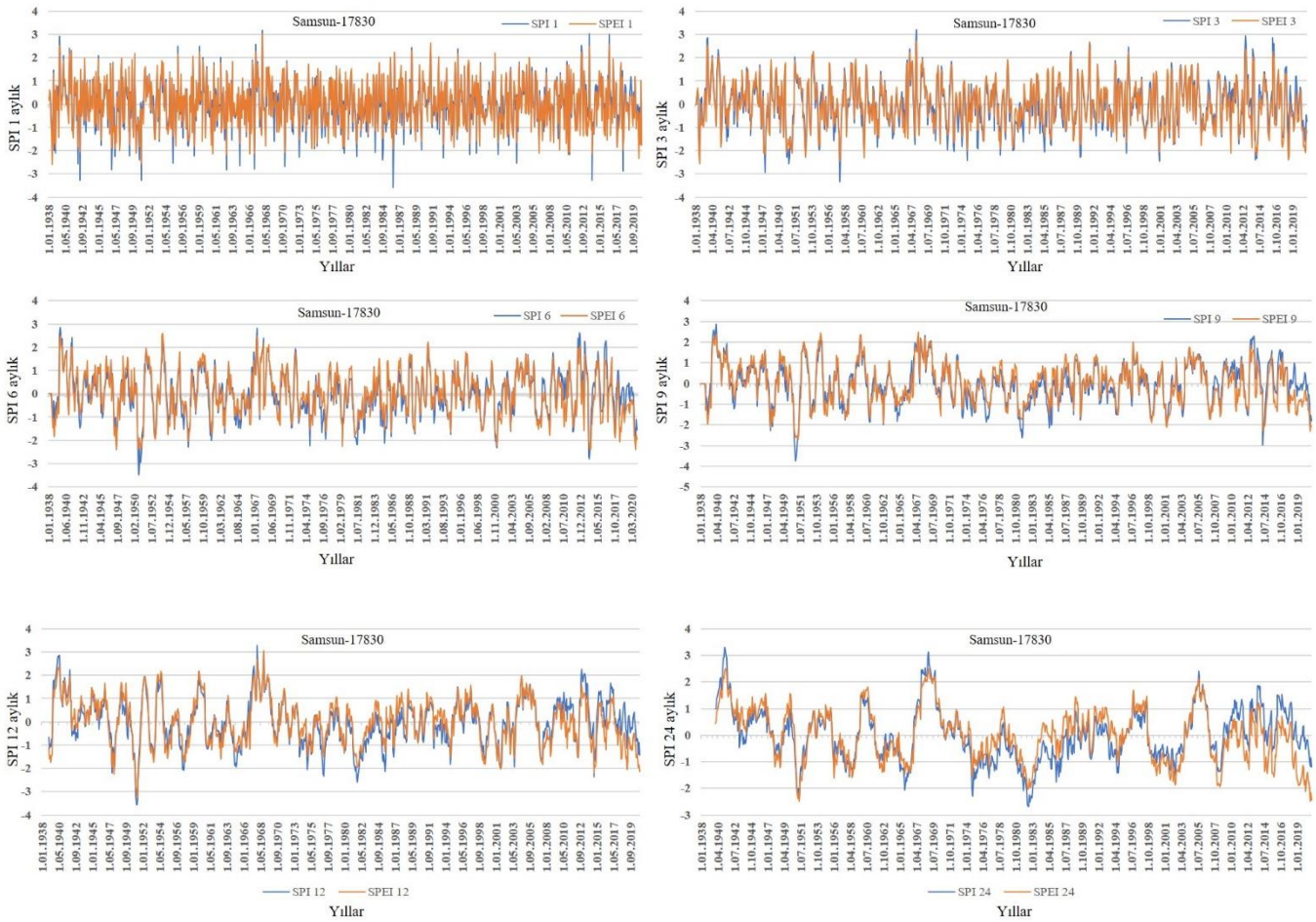
Bu çalışmada, Samsun ili için yağış, sıcaklık, nispi nem ve buharlaşma verileri 1938-2020 yılları arası incelenmiş olup Tablo 3'te gösterilmiştir. Yağış, bağıl nem ve buharlaşma verilerinde %95 (1,96) güven aralığında herhangi bir eğilim tespit edilmemiş olmasına rağmen, sıcaklık verilerinde ($z = 2,635$) aynı güven aralığında artan bir eğilim gözlemlenmiştir. Yağış ve bağıl nem parametrelerinde %95 güven aralığına göre eğilim tespit edilmemiş olsa da bu parametrelerde nispeten bir azalma görülmektedir. Buharlaşma parametresi ise, bu iki değerink aksine nispeten bir artış gözlemlenmiştir. Bu eğilimler Sen'in eğim yöntemi ile eğilimin derecesi ölçülmüştür. En düşük eğilimin derecesi buharlaşma parametresinde elde edilmiştir.

Tablo 3. Samsun İli için Mann-Kendall ve Sen'in Eğim Testi Analizi (%95 güven aralığı)

Testler	Samsun-17830			
	Yağış (mm)	Sıcaklık (°C)	Bağıl Nem (%)	Buharlaşma (mm)
Mann-Kendal	-0,118	2,635	-1,298	1,236
Sen'in Eğimi	-0,102	0,010	-0,021	0,005

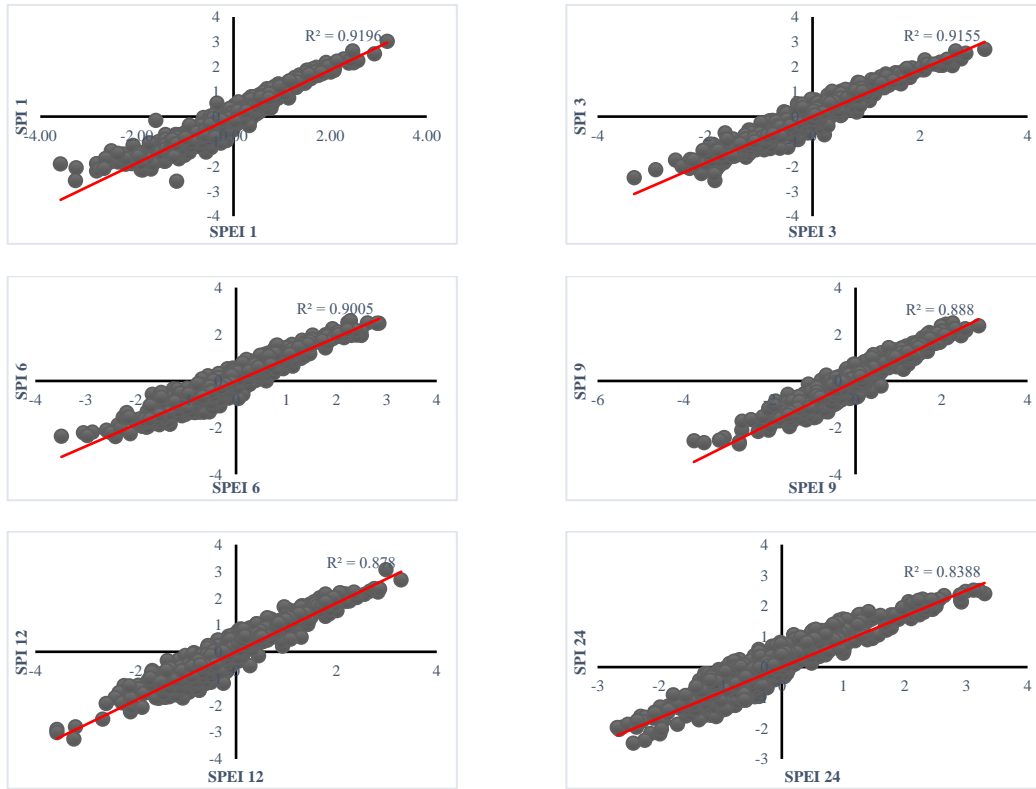
Kuraklık İndekslerinin Korelasyon Analizi

Samsun ilinin SPI ve SPEI kuraklık indekslerini uygulayarak 1, 3, 6, 9, 12 ve 24 aylık zaman serisi için analizleri yapılmıştır. Bu zaman serileri Şekil 2'de gösterilmiştir. 0 değerinin altında kalan aylar kurak dönemi temsil ederken, 0 değerinin üstünde kalan ise nemli olan ayları göstermektedir. Veri olarak SPI yalnız aylık yağış verileri kullanılarak hesaplanırken, SPEI hem yağış hem de sıcaklık verilerini hesaba katmaktadır. Her iki kuraklık indeksi 1938-2020 yılları arasında benzer bir ilişki gözlemlenmiştir.



Şekil 2. Samsun İlinin Farklı Zaman Ölçeğindeki İndekslerin Zaman Serisi

Her iki indeks için yapılan lineer korelasyonda güçlü bir ilişki ortaya çıkmıştır. Şekil 3'te her iki indeks arasındaki ilişki Samsun ili için gösterilmiştir. En yüksek belirleme katsayısı, R^2 değeri 1 aylık zaman serisinde 0,9117 değeri olarak saptanırken, en düşük değer 24 aylık zaman serisinde 0,8409 değeri olarak ölçülmüştür. 1 aylık SPI hesaplaması için örnek verilecekse, kasım ayının sonundaki 1 aylık bir SPI, o yılki Kasım ayı için 1 aylık yağış toplamını, kaydedilen tüm yılların Kasım yağış toplamı ile karşılaştırır. 1 aylık SPI kısa vadeli koşulları yansıttığından, uygulaması, özellikle büyüme mevsimi boyunca, kısa vadeli toprak nemi ve mahsul stresi ile birlikte meteorolojik kuraklık türleri ile yakından ilişkili olabilir. 3 aylık bir SPI, kısa ve orta vadeli nem koşullarını yansıtır ve mevsimsel bir yağış tahmini sağlar. 12 ve daha üstü zaman ölçeklerinin SPI'leri genellikle daha uzun zaman ölçeklerinde akarsu akışlarına, rezervuar seviyelerine ve hatta yeraltı suyu seviyelerine bağlıdır. Bu nedenle 1 aylık ve 24 aylık zaman ölçekleri için iki indeks arasındaki ilişki birbirinden farklı çıkmaktadır. Zaman ölçeği arttıkça R^2 değeri iki indeks için azaldığı görülmektedir.



Şekil 3. Samsun İli için Kuraklık İndeksleri Arasındaki İlişki

Samsun İlinin Kuraklık İncelenmesi

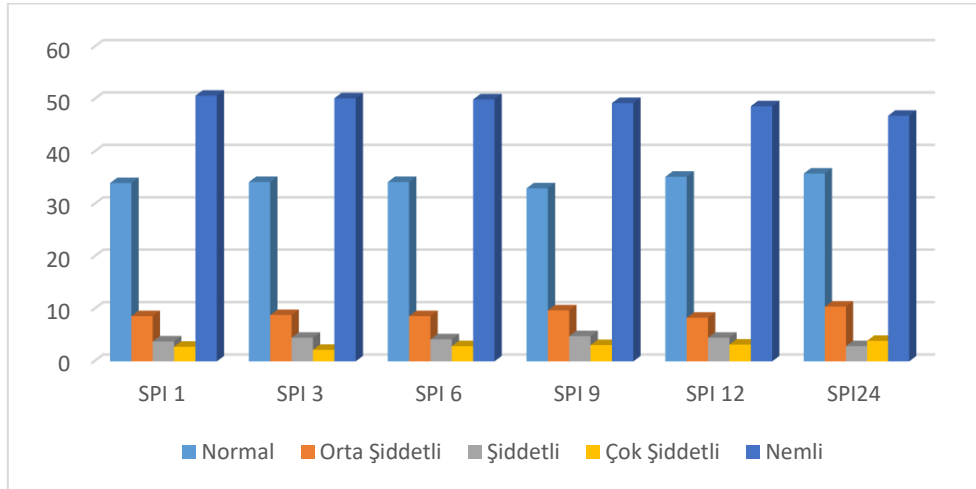
Samsun ili 1938-2020 yılları arası kuraklık analizi iki önemli indekse göre hesaplanmıştır. İki indeks kullanılmasının temel sebebi farklı parametreleri dikkate almasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4'te farklı kuraklık kategorilerine göre iki indeks karşılaştırılmıştır. Normal kuraklık kategorisi dikkate alındığında, 12 aylık SPI %35,24 değeriyle en yüksek 12 aylık SPEI %31,73 en düşük değere sahiptir. Kuraklık kategorileri arasında en fazla normal kuraklık gerçekleşmiştir. Çok şiddetli kuraklık ise en az paya sahiptir. Samsun ili genel olarak incelendiğinde iki indeks nemli kategori %50 değeri üstünde ölçülmüştür. Çok şiddetli kategoride SPI (%2,81-SPI 1) SPEI (%1,41-SPEI 1) indeksine göre daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Ancak Şiddetli kuraklık kategorisinde aynı durum söz konusu değildir. %3,82 değeriyle SPI-1 aylık şiddetli kuraklık gerçekleşmiş olduğu ölçülmüş olmasına rağmen, SPEI-1 aylık zaman serisinde bu değer %5,32 olarak hesaplanmıştır. Orta şiddetli kuraklık kategorisindeki durum, çok şiddetli kuraklık kategorisindeki durum ile aynıdır. Yine 24 aylık zaman serisini dikkate alındığında, orta şiddetli kuraklık SPI indeksine göre %10,44 olarak, SPEI indeksine göre ise %11,55 olarak analiz edilmiştir. Bu sonuçlara göre, SPI çok şiddetli kuraklık kategorisinde, SPEI indeksine göre daha hassas olduğu kanısına varılmıştır.

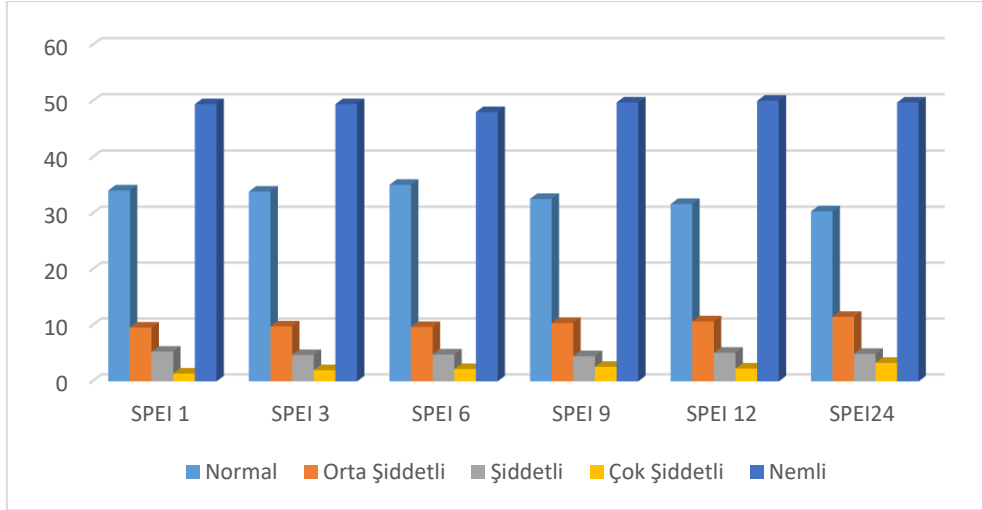
1938-2020 yılları arasında gerçekleşen kuraklık ve nemlilik sayıları Tablo 4'te verilmiştir. 1 aylık zaman serisi dikkate alındığında, Samsun ili için, normal kuraklık gerçekleşen kuraklık ayları birbirine yakın çıkmaktadır. Orta şiddetli kategoride 86 ay SPI indeksinde gerçekleşirken, 96 ay SPEI indeksine göre hesaplanmıştır. Şiddetli kategoride ise bu değerler SPI ve SPEI için sırasıyla 38 ve 53 ay olarak saptanmıştır. Farklı zaman serileri için (SPI 6 ay hariç) normal kategoride gerçekleşen kuraklık ayları SPI indeksinde daha fazla görülmüştür. Kurak olmayan zamanlar 1, 3 ve 6 aylık zaman serilerinde SPI indeksine göre daha fazla görülürken, 9, 12 ve 24 aylık zaman serilerinde ise SPEI indeksine göre daha fazla analiz edilmiştir. Kuraklık için şiddet ve süre büyük önem taşımaktadır. Kuraklık şiddeti, bir kuraklık başlangıcından kuraklık bitimine kadar olan sürede gerçekleşen kuraklığın toplamı olarak ifade edilmektedir. 1 aylık zaman ölçeğinde yapılan analizler, SPI indeksine göre, normal kuraklık kategorisinde en yüksek kuraklık şiddetinin 8,86 (8 ay) olarak 1950 yılında olduğunu, SPIE indeksine göre ise 1950 yılında 13,49 (14 ay) şiddetinde olduğunu ortaya koymuştur. 3 aylık zaman ölçeği için ise SPI indeksine göre 20,97 (13 ay) şiddetinde hesaplanmış olup, SPEI indeksine göre 21,96 (14 ay) şiddetine göre analiz edilmiştir.

Tablo 4. Farklı Zaman Ölçeğindeki İki İndeks için Geçerleşen Kuraklık Sayıları

	SPI					
	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 9	SPI 12	SPI 24
Normal	339	341	341	329	351	357
Orta Şiddetli	86	88	86	97	83	104
Şiddetli	38	45	42	48	45	29
Çok şiddetli	28	22	29	31	32	39
Nemli	505	500	498	491	485	467

	SPEI					
	SPEI 1	SPEI 3	SPEI 6	SPEI 9	SPEI 12	SPEI 24
Normal	340	338	350	325	316	303
Orta Şiddetli	96	98	97	104	107	115
Şiddetli	53	47	48	45	51	49
Çok şiddetli	14	20	22	26	23	33
Nemli	493	493	479	496	499	496





Şekil 4. İki İndeksin Farklı Kategorilere Göre Kuraklığın Dağılımı

SONUÇLAR

Bu çalışmanın genel amacı, Samsun ilinin farklı indeksler göz önünde bulundurularak farklı zaman ölçeklerinde kuraklık analizini detaylı bir şekilde yapmaktır. Çünkü, Samsun ili toprak, iklim, topoğrafya hidrolik yapılar gibi doğal kaynakların, üretime elverişli olması nedeniyle sebzeçilik ve meyvecilik, tarla bitkileri, su ürünleri ve hayvancılık alt sektörlerinin gelişmesi için cazibe merkezi olarak görülmektedir. Bu yüzden, Kuraklık incelemesini SPI (sadece yağış parametresi) ve SPEI (hem yağış hem de sıcaklık) indeksleri ile 1938-2020 yılları arası göz önünde tutularak yapılmıştır. Öncelikle, iklim değişikliğinin yağış, sıcaklık, nispi nem ve buharlaşma parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. %95 güven aralığına göre, yağış, nispi nem ve buharlaşma verilerinde herhangi bir eğilim tespit edilmezken, sıcaklık verisinde artan yönde bir eğilim tespit edilmiştir. İkinci olarak, detaylı bir şekilde iki indeksin ilişkisi Samsun ili özelinde irdelenmiştir. Kuraklık kategorileri arasında en fazla normal kuraklık gerçekleşmesine rağmen, çok şiddetli kuraklık ise en az paya sahiptir. Samsun ili genel olarak incelendiğinde iki indeks nemli kategori %50 değerine yakın ölçülmüştür. 1950 yılında uzun süren bir kuraklık saptanmıştır. Bu sonuçlara göre, SPI çok şiddetli kuraklık kategorisinde, SPEI indeksine göre daha hassas sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Böylelikle Samsun ili için yapılan bu kuraklık analizinin hem il hem de bulunduğu havza genelinde farklı kuraklık indeksleriyle, farklı veri setleriyle veya farklı kuraklık tahmin yöntemleriyle yerel makamlar veya bilimsel alanda yapılacak olan kuraklık analizlerine ışık tutması beklenmektedir.

KATKI BELİRLEME

Bu çalışma, Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (TUJJB), Türkiye Ulusal Meteorolojik ve Hidrolojik Afetler Programı (TUMEHAP) tarafından desteklenen, TUJJB-TUMEHAP-2020-02 nolu “Kopula Fonksiyonları Kullanılarak Orta Fırat, Kızılırmak ve Yeşilirmak Havzalarının Kuraklık Risk Haritalarının Çıkarılması” adlı proje kapsamında yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- AghaKouchak, A., & Nakhjiri, N. (2012). A near real-time satellite-based global drought climate data record. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044037. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044037>
- Aksoy, H., Önöz, B., Çetin, M., Yüce, M.İ., Eriş, E., Selek, B., Aksu, H., Burgan, H.İ., Eşit, M., Orta, S., Çavuş, Y. (2018). Edirne için Kuraklık Şiddet-Süre-Frekans Eğrileri. *HİDRO'2018: Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu*, 27-29 Eylül 2018, Beytepe, Ankara
- Ashraf, M., & Routray, J. K. (2013). Perception and understanding of drought and coping strategies of farming households in north-west Balochistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 5, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.05.002>
- Bannayan, M., Sanjani, S., Alizadeh, A., Lotfjadi, S. S., & Mohamadian, A. (2010). Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. *Field crops research*, 118(2), 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.04.011>

- Constas, M., Frankenberger, T., & Hoddinott, J. (2014). Resilience measurement principles: Toward an agenda for measurement design. *Food Security Information Network, Resilience Measurement Technical Working Group, Technical Series*, 1.
- Cavus, Y., & Aksoy, H. (2019). Spatial drought characterization for Seyhan River basin in the Mediterranean region of Turkey. *Water*, 11(7), 1331.
- Dabanlı, İ., Mishra, A. K., & Şen, Z. (2017). Long-term spatio-temporal drought variability in Turkey. *Journal of Hydrology*, 552, 779-792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.038>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat. Clim. Change* 3, 52–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- Degefu, M. A., & Bewket, W. (2015). Trends and spatial patterns of drought incidence in the omo-ghibe river basin, ethiopia. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(2), 395-414. <https://doi.org/10.1111/geoa.12080>
- Edwards, D.C. & McKee, T.B. (1997) Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple times scales. *Atmospheric Science Paper*, 634, 1-30.
- Eris, E., Cavus, Y., Aksoy, H., Burgan, H. I., Aksu, H., & Boyacioglu, H. (2020). Spatiotemporal analysis of meteorological drought over Kucuk Menderes River Basin in the Aegean Region of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1515-1530. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03384-0>
- Esit, M. (2021). Copula based bivariate drought frequency analysis in the Ceyhan Basin, Turkey. *Doktora Tezi. Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Gaziantep, 378s
- Gumus, V., Simsek, O., Avsaroglu, Y., & Agun, B. (2021). Spatio-temporal trend analysis of drought in the GAP Region, Turkey. *Natural Hazards*, 109(2), 1759-1776. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04897-1>
- Heim, R.R. (2017). A Comparison of the Early Twenty-First Century Drought in the United States to the 1930s and 1950s Drought Episodes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98, 2579–2592. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0080.1>
- Hekimoglu B., & Altındeger M., & Demirbas A, R. (2007). Samsun ilinin fiziki durumu ve avantajlari. https://samsun.tarimorman.gov.tr/Belgeler/Yayinlar/Kitaplarimiz/samsun_ilinin_fiziki_durumu_ve_avantajlari.pdf
- Jeyaseelan, A. T. (2003). Droughts & floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*, 291.
- Kendall M. G. (1975). Rank Correlation Methods, 4th edn and 5th edn. *Charles Griffin*: London. ISBN-13: 978-0195208375.
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q., & Wang, J. (2021). Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11(1), 1-14.
- Mann H. B. (1945). Non parametric tests again trend. *Econometrica* 13:245–259.
- Masih, I., Maskey, S., Mussá, F. E. F., & Trambauer, P. (2014). A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3635-3649.
- Mckee T.B, Doesken N.J., & Kleist J., (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA, 179-184.
- Mehr Danandeh, A., Sorman, A. U., Kahya, E., & Hesami Afshar, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 254-268.
- Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334), 378-381. <https://doi.org/10.1038/nature09763>
- Mo, K.C., & Chelliah, M. (2006). The modified Palmer Drought Severity Index based on the NCEP North American regional reanalysis. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 45, 1362–1375. <https://doi.org/10.1175/JAM2402.1>

- Orta Karadeniz Kalkınma Ajansı (2018) Samsun İli Orman Ve Su İşleri Eylem Planı <https://oka.ka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/orman-ve-su-isleri-eylem-plani-5-79.pdf>
- Pal, J. S., Small, E. E., & Eltahir, E. A. (2000). Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D24), 29579-29594. <https://doi.org/10.1029/2000JD900415>
- Palmer, W.C., (1965). Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce, *Weather Bureau*.
- Şahin, K., & Yılmaz, A. (2009). Samsun İlinde Doğal Kaynaklara Dayalı Turizm Arzı ve Planlanması. *Journal of International Social Research*, May 1; 2(7).
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics*, 31(1), 79-105. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0340-z>
- Simsek, O. (2021). Hydrological drought analysis of Mediterranean basins, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(20), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08501-5>
- Thom, H.C.S. (1958). A Note on the Gamma Distribution. *Monthly Weather Review*, 86 (4): 117-122. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1958\)086<0117:ANOTGD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1958)086<0117:ANOTGD>2.0.CO;2)
- Thomas, J., & Prasannakumar, V. (2016). Temporal analysis of rainfall (1871–2012) and drought characteristics over a tropical monsoon-dominated State (Kerala) of India. *Journal of Hydrology*, 534, 266-280. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.013>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wang, Q., Shi, P., Lei, T., Geng, G., Liu, J., Mo, X., & Wu, J. (2015). The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI. *International Journal of Climatology*, 35(13), 3760-3769. <https://doi.org/10.1002/joc.4244>
- Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions. *Published in Drought: A Global Assessment, Vol. I, edited by Donald A. Wilhite*, chap. 1, pp. 3–18 (London: Routledge, 2000).
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- World Meteorological Organization (WMO) (2016). Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events —TT-DEWCE WMO 4/14/2016. *World Meteorological Organization*, Geneva .
- Yu, M., Li, Q., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., & Heim, R. R. (2014). Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951–2010?. *International Journal of Climatology*, 34(3), 545-558. <https://doi.org/10.1002/joc.3701>
- Yuce, M. I., & Esit, M. (2021). Drought monitoring in Ceyhan Basin, Turkey. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1932616>
- Yüce, M. & Eşit, M. (2020). Ceyhan havzasının kuraklık risk haritasının SPI ve SPEI metotları ile belirlenmesi. *Su Kaynakları*, 5 (2) , 1-8. <https://dergipark.org.tr/en/pub/su/issue/56995/728965>
- Yue, Y.S., Zou, S., Whittemore, D. (1993), Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas, *Journal of Hydrology*, 150(1), 61-80. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90156-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90156-4)
- Zhan, W., Guan, K., Sheffield, J., & Wood, E. F. (2016). Depiction of drought over sub-Saharan Africa using reanalyses precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(18), 10-555. <https://doi.org/10.1002/2016JD024858>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.04.2022
Kabul Tarihi : 26.07.2022

Received Date : 29.04.2022
Accepted Date : 26.07.2022

BODRUM KATLARDA RİJİT BODRUM PERDE TASARIMININ YAPI DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

THE INFLUENCE OF BASEMENT RIGID WALL DESIGN ON STRUCTURAL BEHAVIOR

*İsmail ÜNSAL*¹ (ORCID: 0000-0002-6324-7209)
Mehmet Fatih ŞAHAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-3334-3945)

¹ Adıyaman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet Fatih ŞAHAN, fatihshahan@gmail.com

ÖZET

Bu çalışma, binaların bodrum katlarının sırasıyla bir, iki, üç ve dört tarafında rijit bodrum perdesi olmasının yapısal davranış üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Bu amaçla ele alınan 13 katlı betonarme bir konut binası için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) verilen dört farklı taşıyıcı sistem tipi esas alınmıştır. Salt çerçevesel, salt perdeli ve iki adet çerçevesel-perdeli olmak üzere dört farklı taşıyıcı sistem tipi oluşturulmuştur. Bu dört taşıyıcı sistem tipi ve beş farklı bodrum perde yerleşim durumu için toplam yirmi adet model tasarlanmıştır. Modeller arasındaki davranış farkları; perde taban momentleri, eşdeğer deprem kuvvetleri, yapı periyotları, deprem deplasmanları, burulma düzensizliği, hasar durumları, radye tasarımı ve maliyet gibi parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Dört cephede perde yerleştirilerek oluşturulan rijit bodrum katın kritik kattaki hasar miktarını artırdığı tüm taşıyıcı sistem tiplerinde gözlenmiştir. Tüm modeller için kritik katlardaki en az hasar bodrum perdesiz modellerinde görülmüştür. Tüm modellerde en yüksek radye temel maliyeti bodrum perdesiz modeller için elde edilirken en düşük radye temel maliyeti ise 4 cepheden bodrum perdeli olan rijit bodrum kata sahip modeller için elde edilmiştir. Radye temel ve üstyapı maliyetleri birleştirilerek elde edilen toplam kaba yapı maliyetleri ise tüm modellerde oldukça yakın sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: TBDY 2018, betonarme taşıyıcı sistemler, rijit bodrum kat, bodrum kat perdeleri

ABSTRACT

This study investigated the effect of the presence of rigid walls on one, two, three, and four sides of a building's basement on structural behavior. For this purpose, four different structural system types given in the Turkish Building Earthquake Code (TBEC-2018) were taken as the basis for a 13-story reinforced concrete residential building. Four different structural system types were created, which comprised of frames only, of shear walls only, and two combinations of frames and shear walls. A total of twenty models were designed based on four different structural system types and five different basement wall configurations. Models' behavioral differences were evaluated in equivalent earthquake forces, base moment of shear walls, structural periods, and earthquake displacements for structural stiffness, torsional irregularity, damage conditions, raft design, and cost. It has been observed in all structural system models in the study that the rigid basement floor created by placing rigid walls on four sides increases the amount of damage on the critical floor. The minor damage on critical floors was seen in models without basement walls for all models. The highest raft foundation cost was obtained for the models with no basement wall in all models. In contrast, the lowest raft foundation cost was obtained for the models with a rigid basement floor with basement walls on four sides. Total rough construction costs, obtained by combining the raft foundation and superstructure costs, were close to all models.

Keywords: TBEC 2018, reinforced concrete structural systems, rigid basement floor, basement walls

GİRİŞ

Depremler tüm dünyada sürekli biçimde büyük can ve mal kayıplarına yol açan doğal afetler olarak gündemden düşmemektedir. Bu bağlamda dünyada ve Türkiye’de hemen her yıl orta veya ağır hasar oluşturan çok sayıda deprem yaşanmaya devam etmektedir (Ünsal vd., 2020). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem–Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (Koeri, 2021) tarafından paylaşılan bilgilere göre tüm dünyada meydana gelen depremlerin sayısı büyüklüklerine göre, 7–7.9 arası büyüklük için yıllık ortalama 18, 6–6.9 arası büyüklük için yıllık ortalama 120, 5–5.9 aralığı için 800, 4–4.9 aralığı için tahmini 6.200 ve 3–3.9 aralığı için ise tahmini 49.000 olarak verilmektedir (Ünsal ve Şahan, 2021). Bu durum ülkemizde depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunun önemini sürekli olarak gündemde tutmaktadır.

Bu çalışma bina türü yapıların bodrum katlarına yerleştirilen bodrum perdelerinin yapı davranışına etkisini irdelemek üzere hazırlanmıştır. Bilindiği gibi bodrum kat perdeleri uygulamada, bazen eğimli arazilerde bodrum katı binanın dışındaki doğal zeminden korumak amacıyla bir veya iki cephesinde, bazen rijit bodrum kat oluşturmak amacıyla binanın dört cephesinde ve bazen de ticari amaçlarla bir cephe boş bırakılarak binanın sadece üç cephesinde inşa edilmektedirler. Bodrum perdelerinin bodrum kattaki bu farklı yerleşim durumlarının yapıların gerek doğal gerekse deprem davranışı üzerinde bir takım olumlu veya olumsuz etkilerinin olması beklenmelidir.

Değer ve Gökçeoğlu (2021) çalışmalarında bodrum kattaki perde yerleşiminin yüksek bina tasarımına etkisini irdelemişlerdir. 26 katlı mevcut bir binayı ele alarak binanın depreme dayanıklı tasarımlarını, farklı bodrum perde yerleşimleri için TBDY-2018 ‘e (AFAD, 2018a) uygun şekilde, sonlu elaman programlarını kullanarak tamamlamışlardır. Bina tasarım yöntemlerini ve eleman boyutlarını, donatı oranlarını ve ilgili inşaat maliyetlerini karşılaştırmışlardır. Bodrum katta asimetrik olarak yerleştirilen bodrum perdeleri binanın burulma davranışı açısından belirgin şekilde olumsuzluk teşkil etmiştir. Bodrum perdelerin ilave edildiği modelde periyotta ve görelî kat ötelemesi gibi yapısal tepkilerde azalma görülmüştür. Ancak, yapı genelinde belirgin kuvvet talebi artışı veya donatı değişimi görülmemiştir. Bu durumu, yapıya ekledikleri perde miktarının taşıyıcı sistemde mevcut olan perdelerle kıyasla az olması ile açıklamışlardır.

Özuygur ve Dilsiz (2021) rijit bodrumlu binaların TBDY-2018’e göre tasarımına yönelik bir değerlendirme yaptıkları çalışmalarında, deprem yönetmeliği gereği üstyapı ve rijit bodrumun deprem hesabında farklı analiz modellerinin kullanılmasının ve bodrum katların tasarımında bu kuvvetlerin birleştirilmesinin zaman alıcı, karmaşık ve hataya müsait bir süreç olduğunu belirterek sayısal analiz sonuçlarına dayalı olarak, rijit bodrumlu binaların modelleme ve tasarımına yönelik bazı öneriler sunmuşlardır. İnceledikleri binaların analiz sonuçlarından elde ettikleri kat kesme kuvvetlerindeki farklılıklardan yola çıkarak bodrum kat ve üstyapıyı ayırmadan tüm binanın gerçek kütleleriyle modellenerek üst bölüm davranışının incelenmesini önermişlerdir.

Erdim (2018) çalışmasında betonarme binalarda rijit bodrum kat sayısının yapısal davranışa etkisini araştırmıştır. Betonarme perdeli, betonarme çerçevesiz perdeli ve betonarme çerçevesiz sistemlerden oluşan 40, 20 ve 7 katlı binaların 7,5,3 ve 1 rijit bodrum kata göre modelleyerek yapı davranışı ile ilgili karşılaştırmalar yapmıştır. Üstyapıdaki 40, 20 ve 7 olan kat adetlerini sabit tutup rijit bodrum kat adedini arttırdığında yer değiştirmelerde ihmal edilebilecek kadar düşük değerlerde farklar elde etmiştir. Rijit bodrum katın içerisine üst katlara devam etmeyen betonarme perde veya kolon eklenmesi durumunda bina rijitliğinin değişebileceğini vurgulayarak değişik bina tipleri için bu hesapların yapılmasını önermiştir.

Bu çalışmada, yukarıda özetlenen çalışmalardan farklı olarak, sadece rijit bodrum kat oluşturmakla kalınmamış ve binaların bodrum katlarında sırasıyla bir, iki, üç ve dört cepheye yerleştirilen bodrum perdelerinin olması durumu ile hiç bodrum perdesi olmaması durumunun yapı davranışına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada yüksek binalar yerine, ülkemizde orta yoğunluklu imar alanlarında sıklıkla inşa edilmekte olan 13 katlı betonarme bir konut binası ele alınmıştır. Erdim’in (2018) çalışmasında önerdiği gibi değişik bina tiplerini de dikkate almak üzere, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) verilen dört farklı taşıyıcı sistem tipi esas alınmıştır. Bunlar, süneklik düzeyi yüksek olan salt çerçevesiz, salt perdeli ve plandaki perde oranı düşük ve yüksek olan iki adet çerçevesiz-perdeli taşıyıcı sistem olarak belirlenmiştir. Bu şekilde dört farklı taşıyıcı sistem tipi ve beş farklı bodrum perde yerleşim durumu için toplam yirmi adet model hazırlanmıştır. Yapı davranışı, her bir taşıyıcı sistem tipinin bodrum perdesi yerleşimine bağlı olarak üretilmiş olan alt modelleri için kendi arasında karşılaştırılarak irdelenmiştir.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, temel üstü kotundan itibaren yüksekliği 42.5 m olan konut tipi bir bina, TBDY-2018’de verilen 4 farklı taşıyıcı sistem tipi esas alınarak, bodrum katlar sırasıyla bir, iki, üç ve dört cepheden rijit perdelerle çevrelenmiş olarak modellenmiştir. Ayrıca bodrum perdesi kullanılmadan da birer model hazırlanmıştır. Böylece, 4 farklı taşıyıcı sistem türü kullanılarak 5 farklı bodrum perdesi yerleşimi ile toplam 20 adet alt model hazırlanmıştır. Bodrum perdelerinin farklı taşıyıcı sistem tipleri üzerindeki etkilerini incelemek üzere deprem yönetmeliğinin 4. Bölümünde süneklilik düzeyi yüksek sistemler için Tablo 4.1’de verilmiş olan A11 (salt çerçeve sistem), A13 (salt boşluksuz perdeli sistem) ile 2 adet A15 (çerçeve sistem) esas alınmıştır. A13 taşıyıcı sisteminde toplam perde alanının kat alanına oranı yaklaşık olarak X ve Y yönleri için 0.017’dir. A15 sistemi ise, toplam perde alanının kat alanına oranı (X ve Y yönlerinin her ikisi için de) yaklaşık 0.007 ve 0.012 olmak üzere iki farklı şekilde (A15_1 ve A15_2) modellenmiştir.

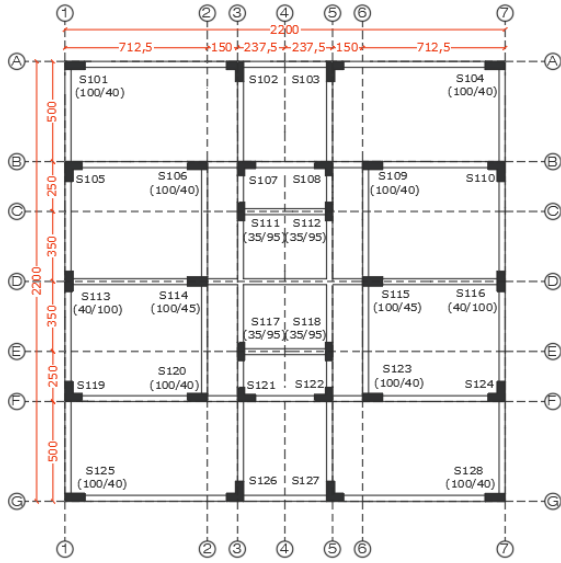
Bu çalışmada taşıyıcı sistem tüplerini birbiri ile kıyaslamak amaçlanmamıştır. Rijit bodrum perdelerinin yapı davranışına etkisini irdelemek üzere her bir taşıyıcı sistem için, içerdikleri bodrum perdelerine göre üretilmiş olan 5 ayrı alt model kendi içinde karşılaştırılmaktadır. Bu taşıyıcı sistemlerin birbiri ile kıyaslanması konusu diğer bir çalışmada oldukça detaylı bir şekilde kaleme alınmıştır (Ünsal vd. 2022).

Modeller A11_0B, A11_1B, A11_2B, A11_3B ve A11_4B şeklinde isimlendirilmiş olup A11_0B ismi, A11 taşıyıcı sisteminin rijit bodrum perdesi olmayan modelini temsil etmektedir. Diğer modeller ise sırasıyla bir, iki, üç ve dört cephede rijit bodrum perdesi bulunduğu anlamına gelmektedir. Her bir taşıyıcı sistemi tanımlamak için benzer bir yol izlenmiştir. Örnek olarak A15_1_3B modeli, A15_1 taşıyıcı sisteminin 3 cephesinde rijit bodrum perdesi bulunan modelini tanımlamaktadır.

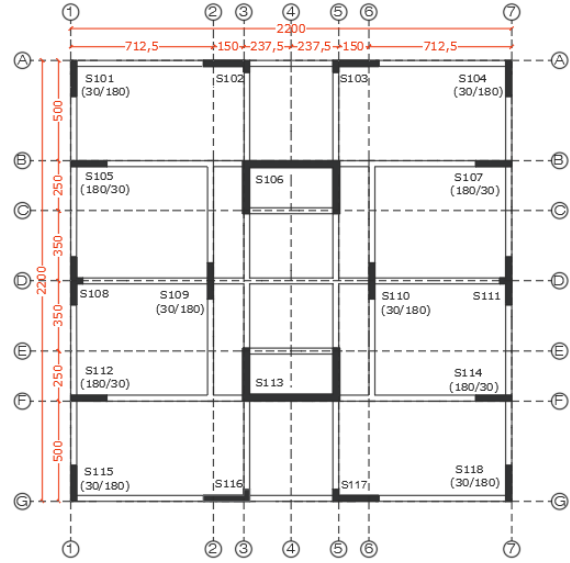
Zemin Parametreleri için Adıyaman ilinde ZD zemin sınıfı için hazırlanmış olan 10 farklı zemin veri raporu ve geoteknik rapor incelenerek ortalama değerler (Temel taşıma gücü tasarım dayanımı $q_t=29 \text{ t/m}^2$ ve Zemin yatak katsayısı $K_0 = 1800 \text{ t/m}^3$) olarak esas alınmıştır. Deprem tasarım sınıfı ise $DTS=1$ olup AFAD’ın yayınlamış olduğu deprem tehlike haritalarından (AFAD, 2018b) $S_{DS} = 0.785$ olarak elde edilmiştir. Modeller STA4-CAD bilgisayar programında (STA4CAD, 2022) hazırlanmıştır. Modellerin kat yükseklikleri tüm modellerde aynı olup bodrum ve zemin kat için 3.5 m iken normal katlarda 3.2 m ve asansör dairesi için 2.3m’dir. Ağırlık bilgileri Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda her bir taşıyıcı sistem tipinin alt modellerinde, her bir cepheye eklenen bodrum perdesinden sonra ağırlığın artmakta olduğu gözlenmektedir. Taşıyıcı sistem tiplerine ait normal kat kalıp planları Şekil 1’de verilmiş olup, bu sistem tiplerinin alt modellerini oluşturan ve bodrum perdesi yerleşimlerine göre türetilmiş olan modellerin bodrum kat kalıp planlarının çalışmada görsel olarak paylaşılmasına gerek duyulmamıştır.

Tablo 1. Modellerin Ağırlık Bilgileri

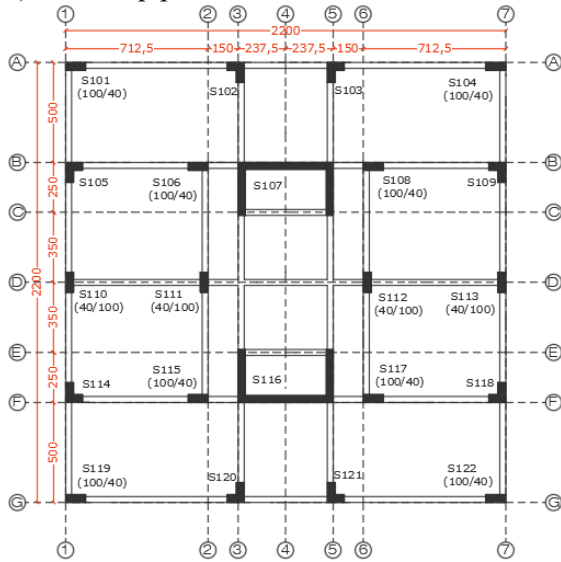
Model	Ağırlık (ton)	Model	Ağırlık (ton)	Model	Ağırlık (ton)	Model	Ağırlık (ton)
A11_4B	7,277.14	A13_4B	7,445.10	A15_1_4B	7,556.97	A15_2_4B	7,466.59
A11_0B	7,123.86	A13_0B	7,306.25	A15_1_0B	7,383.38	A15_2_0B	7,304.61
A11_1B	7,156.64	A13_1B	7,346.72	A15_1_1B	7,425.75	A15_2_1B	7,342.67
A11_2B	7,197.89	A13_2B	7,375.55	A15_1_2B	7,470.16	A15_2_2B	7,385.57
A11_3B	7,238.90	A13_3B	7,416.04	A15_1_3B	7,512.56	A15_2_3B	7,423.36



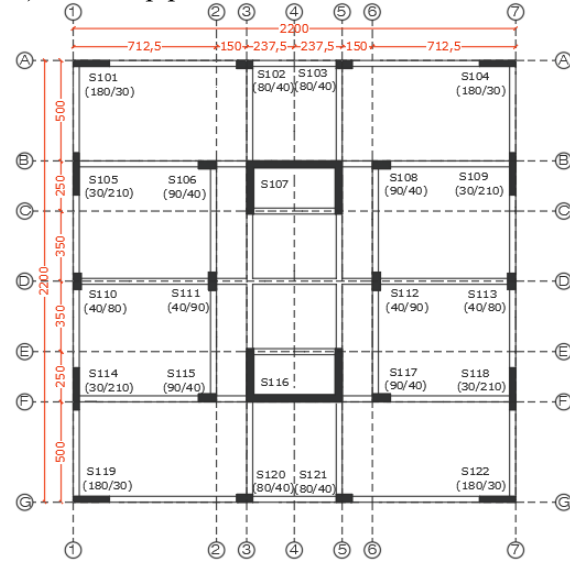
a) A11 kalıp planı



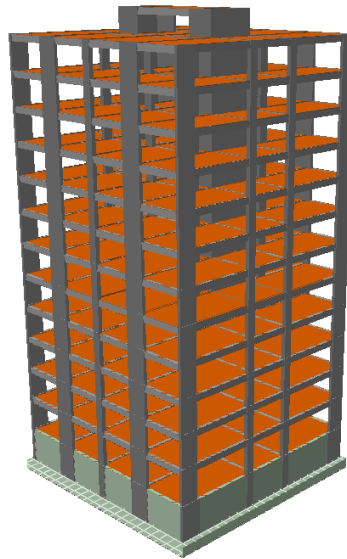
b) A13 kalıp planı



c) A15_1 kalıp planı



d) A15_2 kalıp planı



e) A15_2 perspektif görünüşü

Şekil 1. Modellerin Normal Kat Kalıp Planı ve Perspektif Görselleri

R değeri deprem yönetmeliğine uygun şekilde salt çerçevesel sistem olan A11 için 8 alınmıştır. Deprem yönetmeliği gereği, binanın tamamında deprem etkisiyle oluşacak devrilme momentinin en az 1/6'sı kenar aks perdeleri tarafından karşılanmalıdır. Burada ele alınan perdeli sistemlerde bu şart sağlanamadığından yine yönetmelik gereği, R değerleri 4/5 oranında azaltılarak salt perdeli A13 sistemi için 4.8, A15_1 ve A15_2 için ise 5.6 olarak alınmıştır. Dayanım fazlalığı katsayısı benzer şekilde yönetmelik gereği A11 sistemi için 3, diğer modeller için 2.5 olarak esas alınmıştır. Tüm modellerde radye temel kalınlığı 100 cm olup zemin gerilmesi ve zımbalama dayanımları karşılanacak şekilde modellenerek yapı – temel etkileşimli şekilde analiz edilmiştir. Tüm modellerde gerek temeller gerekse üstyapılar Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiştir.

Çalışmada dolgu duvarların yatay yük kapasitesi göz önüne alınarak analizler yapılmıştır. Dolgu duvarlar, kolon giriş birleşim bölgelerine etkiyen yatay yükleri diyagonal olarak diğer düğümlere aktarmaktadırlar. Böylece taşıyıcı sistem daha fazla enerji tüketerek daha sünek davranabilmektedir (Kumbasaroglu, 2020).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Perde Taban Momentlerindeki Değişimler

Tabanında en büyük momentin olduğu tek bir deprem perdesindeki momentin, bina tabanında oluşan toplam taban devrilme momentine oranı Tablo 2'de tüm modeller için verilmiştir. Tablo 2'de A11 taşıyıcı sistemine ait modellerde deprem perdesi bulunmadığı gerekçesiyle, X ve Y doğrultularındaki perde taban momentinin toplam taban devrilme momentine oranı hesap edilmemiştir.

Tüm modellerde en büyük momentler asansör perdelerinin tabanında elde edilmiştir. Sırasıyla bodrum perdesiz, 1 cepheden perdeli ve 2 cepheden perdeli olan 0B, 1B ve 2B modellerinde perde taban momentleri bodrum kattan alınmıştır. Sırasıyla 3 ve 4 cepheden perdeli olan 3B ve 4B modellerinde bodrum rijitliği sağlandığı için yönetmelik gereği deprem hesabı değiştiğinden bu modellerde perde taban momentleri zemin kattan alınmıştır. Bu nedenle 0B, 1B ve 2B modellerini kendi içinde kıyaslamak daha uygun olacaktır. Bu modellerde rijit bodrum perdesi oranı arttıkça deprem perdelerinin üzerine aldığı moment azalmaktadır. Bu ilişki perdeli olan her 3 taşıyıcı sistem tipi için geçerlidir (A13, A15_1 ve A15_2). Benzer ilişkinin 3B ve 4B modelleri arasında da görüldüğü söylenebilir.

Tablo 2. En Büyük Perde Taban Momenti (tm) ile En Büyük Perde Taban Momentinin Toplam Taban Devrilme Momentine Oranı.

Model	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
X Yönü	-	-	-	-	-
Y Yönü	-	-	-	-	-
Model	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
X Yönü	2959-0.286	3370-0.298	3297-0.288	3616-0.281	3015-0.296
Y Yönü	2092-0.223	2484-0.240	2887-0.219	2833-0.216	2111-0.224
Model	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
X Yönü	2803-0.270	3085-0.272	3047-0.266	2999-0.260	2750-0.268
Y Yönü	1654-0.187	1992-0.207	1845-0.190	1821-0.185	1663-0.189
Model	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
X Yönü	2758-0.279	3007-0.278	2960-0.271	2925-0.266	2732-0.279
Y Yönü	1585-0.185	1909-0.204	1756-0.186	1735-0.182	1588-0.186

Bu bölümde ayrıca, tüm perdelerin tabanında oluşan toplam taban momentlerinin bina tabanında oluşan toplam devrilme momentine oranı da irdelenmiş olup ilgili sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Bodrum katın rijitliği arttıkça tüm deprem perdelerinin depremden aldıkları payın (taban momentlerinin) azaldığı 0B, 1B ve 2B modellerinin tamamı için söylenebilir. 3B ve 4B modelleri arasında ise bu anlamda önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir.

Tablo 3. Toplam Perde Taban Momentinin Toplam Taban Devrilme Momentine Oranı.

Model	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
X Yönü	-	-	-	-	-
Y Yönü	-	-	-	-	-
Model	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
X Yönü	0.91	0.90	0.90	0.84	0.90
Y Yönü	0.84	0.85	0.80	0.79	0.84
Model	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
X Yönü	0.50	0.50	0.50	0.46	0.50
Y Yönü	0.37	0.41	0.38	0.37	0.37
Model	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
X Yönü	0.62	0.61	0.61	0.57	0.61
Y Yönü	0.62	0.63	0.60	0.58	0.62

Deprem Kuvvetlerindeki Değişimler

Tablo 4'te mod birleştirme yönteminden elde edilen ve eşdeğer deprem yükü oranında artırılmış taban kesme kuvvetleri verilmiştir. 3B ve 4B modellerinde bodrum rijitliği sağlandığı için yönetmelik gereği deprem hesabı değiştiğinden 0B, 1B ve 2B modellerini kendi içinde, 3B ve 4B modellerini de kendi içerisinde kıyaslamak daha uygun olacaktır. Rijit bodruma sahip olmayan 0B, 1B, 2B grubu için çerçeve içeren A11, A15_ ve A15_2 sistemlerinde taban kesme kuvveti değişimleri artan eğilimde yaklaşık %1 mertebelerindedir. Salt perdeli A13 sisteminde ise bodrum kattaki rijit perdelerin sayısının artmasının X ve Y yönündeki taban kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve bu artışın sırasıyla %14 ve %28 değerlerine kadar yükseldiği görülmektedir. Zaten rijit bodrum kata sahip olan 3B ve 4B grubunda ise, bu değişimler %1'in altında kalmaktadır.

Taban kesme kuvvetinin bina ağırlığına oranları salt çerçevesel modellerde yaklaşık %3, perde içeren modellerde ise yaklaşık %4-5 mertebelerinde elde edilmiş olup bodrum rijitliğinin bu parametre üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu gözlenmektedir.

Tablo 4. Taban Kesme Kuvvetleri ve Bina Ağırlığına Oranı.

Karşılaştırılan Büyüklükler	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(X)}$) (ton)	220.58	222.88	224.40	226.37	219.51
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(Y)}$) (ton)	218.32	220.86	223.11	224.53	219.45
($V_{TE}^{(X)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%3.03	%3.11	%3.13	%3.14	%3.03
($V_{TE}^{(Y)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%3.00	%3.07	%3.12	%3.12	%3.03
	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(X)}$) (ton)	395.24	395.53	402.11	452.47	388.96
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(Y)}$) (ton)	350.18	353.12	451.17	452.95	351.26
($V_{TE}^{(X)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%5.31	%5.41	%5.47	%6.13	%5.25
($V_{TE}^{(Y)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%4.70	%4.83	%6.14	%6.13	%4.73
	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(X)}$) (ton)	392.92	393.41	399.08	401.52	388.55
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(Y)}$) (ton)	328.89	328.69	332.37	338.14	327.86
($V_{TE}^{(X)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%5.20	%5.32	%5.37	%5.37	%5.17
($V_{TE}^{(Y)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%4.35	%4.44	%4.48	%4.53	%4.36
	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(X)}$) (ton)	375.75	377.19	382.96	385.48	372.30
Taban Kesme Kuvveti ($V_{TE}^{(Y)}$) (ton)	318.94	319.02	323.36	327.67	318.61
($V_{TE}^{(X)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%5.20	%5.16	%5.22	%5.22	%5.02
($V_{TE}^{(Y)}$)/Bina Ağırlığı Oranı	%4.35	%4.37	%4.40	%4.44	%4.29

Yapı Rijitliği

Burada her bir taşıyıcı sistem tipine ait modellerin rijitlikleri, Tablo 5'te verilen doğal titreşim periyotları ile Tablo 6'da ve Şekil 2'de verilen maksimum deprem deplasmanları üzerinden değerlendirilmiştir. Bodrum katta rijit bodrum perdesi oranı arttıkça beklendiği gibi yapı rijitliği de artmakta dolayısıyla yapı periyotları da azalmaktadır. 0B, 1B ve 2B grubu için periyottaki bu azalma oranı her iki yön için de %3-9 arasında değişirken 3B, 4B grubu için oldukça minimal seviyede kalmakta olup özellikle Y yönü için periyotların hemen hemen değişmediği söylenebilir.

Tablo 5. Doğal Titreşim Periyotları.

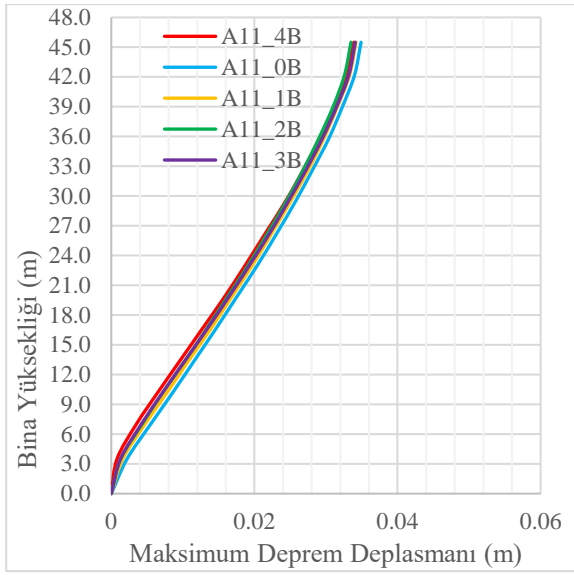
Karşılaştırılan Büyüklükler	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
Doğal Titreşim Periyodu (T_x)	1.519 s	1.598	1.579	1.542	1.527
Kütle Katılım Oranı (M_{xr})	%73.6	%79.2	%74.6	72.9	74.3
Doğal Titreşim Periyodu (T_y)	1.532 s	1.616	1.614	1.571	1.537
Kütle Katılım Oranı (M_{yr})	%73.8	%79.3	%78.8	72.7	75.0
	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
Doğal Titreşim Periyodu (T_x)	1.516	1.606	1.587	1.552	1.539
Kütle Katılım Oranı (M_{xr})	70.0	73.86	73.21	70.39	70.7
Doğal Titreşim Periyodu (T_y)	1.658	1.751	1.711	1.691	1.650
Kütle Katılım Oranı (M_{yr})	71.7	75.96	73.37	72.84	71.9
	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
Doğal Titreşim Periyodu (T_x)	1.283	1.357	1.346	1.318	1.306
Kütle Katılım Oranı (M_{xr})	72.5	76.5	75.9	72.9	73.2
Doğal Titreşim Periyodu (T_y)	1.514	1.601	1.571	1.552	1.519
Kütle Katılım Oranı (M_{yr})	72.9	77.5	75.4	74.8	73.4
	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
Doğal Titreşim Periyodu (T_x)	1.350	1.426	1.413	1.384	1.369
Kütle Katılım Oranı (M_{xr})	71.75	75.5	74.9	72.8	72.6
Doğal Titreşim Periyodu (T_y)	1.556	1.641	1.607	1.596	1.558
Kütle Katılım Oranı (M_{yr})	72.3	76.8	74.8	74.2	72.7

Tablo 6. Maksimum Deprem Deplasmanları (metre).

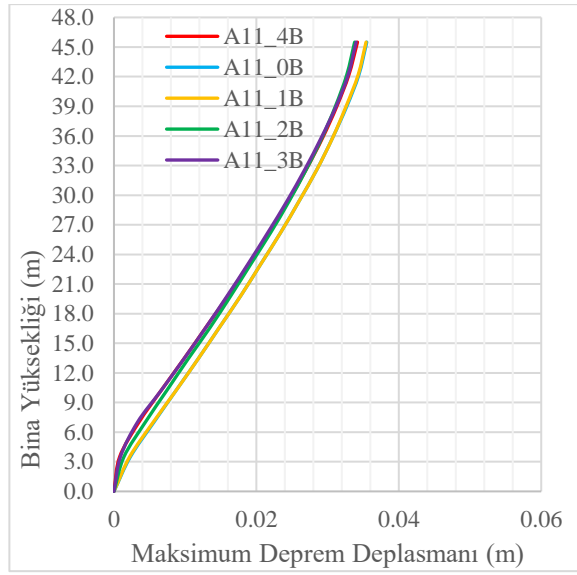
Kat	A11_4B		A11_0B		A11_1B		A11_2B		A11_3B	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
12. Asansör D.	0.0339	0.0342	0.0349	0.0355	0.0342	0.0354	0.0335	0.0338	0.0341	0.0340
11. Normal Kat	0.0329	0.0330	0.0340	0.0344	0.0333	0.0343	0.0326	0.0327	0.0332	0.0329
Zemin Kat	0.0035	0.0035	0.0055	0.0056	0.0047	0.0055	0.0043	0.0044	0.0042	0.0033
Bodrum Kat	0.0008	0.0008	0.0022	0.0023	0.0016	0.0022	0.0013	0.0014	0.0013	0.0009
	A13_4B		A13_0B		A13_1B		A13_2B		A13_3B	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
12. Asansör D.	0.0640	0.0647	0.0672	0.0681	0.0665	0.0836	0.0721	0.0815	0.0643	0.0642
11. Normal Kat	0.6040	0.0619	0.0636	0.0654	0.0629	0.0802	0.0682	0.0781	0.0608	0.0615
Zemin Kat	0.0049	0.0051	0.0069	0.0076	0.0066	0.0082	0.0065	0.0077	0.0056	0.0051
Bodrum Kat	0.0014	0.0013	0.0028	0.0028	0.0025	0.0027	0.0022	0.0024	0.0018	0.0013
	A15_1_4B		A15_1_0B		A15_1_1B		A15_1_2B		A15_1_3B	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
12. Asansör D.	0.0439	0.0491	0.0460	0.0513	0.0458	0.0503	0.0444	0.0498	0.0446	0.0492
11. Normal Kat	0.0418	0.0473	0.0439	0.0495	0.0437	0.0485	0.0423	0.0480	0.0425	0.0474
Zemin Kat	0.0045	0.0047	0.0061	0.0068	0.0059	0.0060	0.0053	0.0057	0.0052	0.0048
Bodrum Kat	0.0013	0.0012	0.0027	0.0027	0.0024	0.0020	0.0019	0.0018	0.0018	0.0013
	A15_2_4B		A15_2_0B		A15_2_1B		A15_2_2B		A15_2_3B	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
12. Asansör D.	0.0475	0.0515	0.0498	0.0535	0.0495	0.0524	0.0481	0.0522	0.0480	0.0515
11. Normal Kat	0.0450	0.0494	0.0473	0.0515	0.0470	0.0504	0.0456	0.0502	0.0456	0.0494
Zemin Kat	0.0045	0.0045	0.0061	0.0065	0.0059	0.0057	0.0052	0.0055	0.0051	0.0046
Bodrum Kat	0.0013	0.0012	0.0026	0.0025	0.0024	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0012

Tablo 6 ve Şekil 2’de maksimum deprem deplasmanları verilmiştir. A13 haricindeki tüm modellerde maksimum tepe deplasmanındaki artış bodrum perdesi bulunmayan modellerde en yüksek olup 4 cepheden rijit perdeli bodruma sahip olan modellere kıyasla bu artış %3-5 mertebelerindedir. Salt perdeli A13 modellerinde ise bodrum perdesi bulunmayan modellere kıyasla maksimum artış 2B ve 1B olan modellerde X ve Y yönleri için sırasıyla %13 ve %29 olarak hesap edilmiştir.

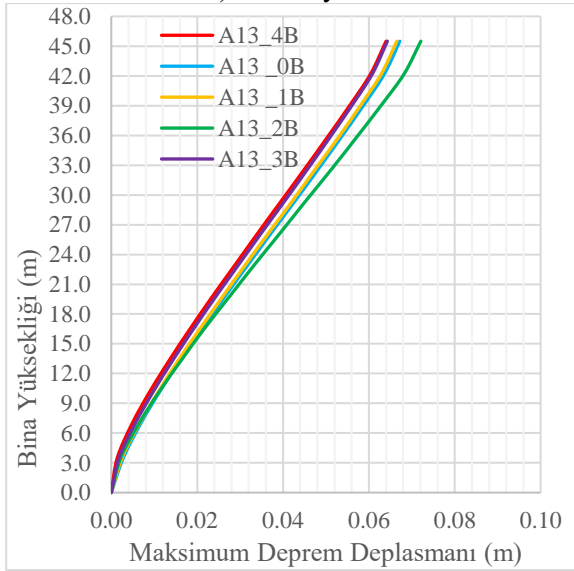
Tablo 6’daki deplasman değerleri incelendiğinde, perde içeren sistemlerden (A13, A15 1, A15 2) üretilen modellere ait deplasman değerlerinin, salt çerçevesi sistemden (A11) türetilen modellerin deplasman değerlerinden daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olup, bu husus TBDY 2018 yönetmeliğinde perdeler için verilmiş olan etkin kesit rijitlik çarpanlarının kolonlar için verilen etkin kesit rijitlik çarpanlarından daha düşük olması ile açıklanabilir (Ünsal vd. 2022; Ünsal ve Şahan, 2021).



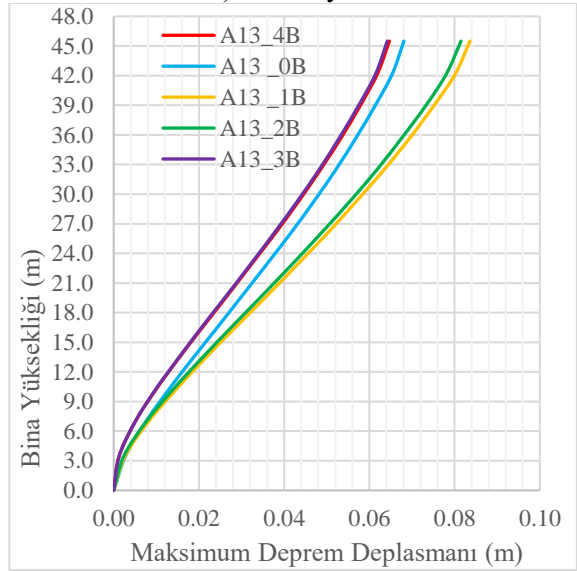
a) A11 X yönü



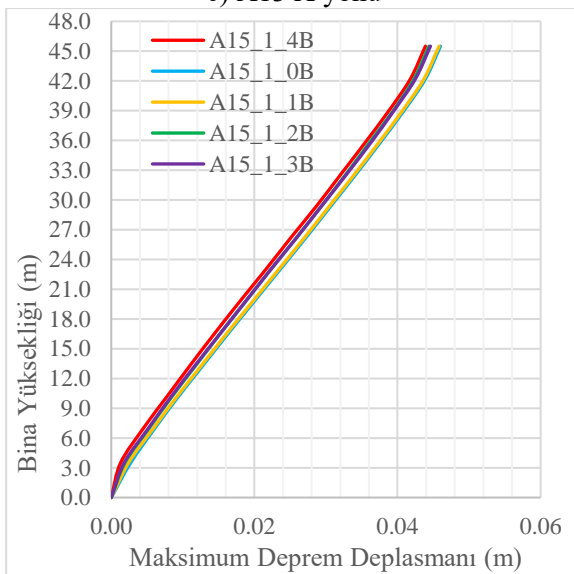
b) A11 Y yönü



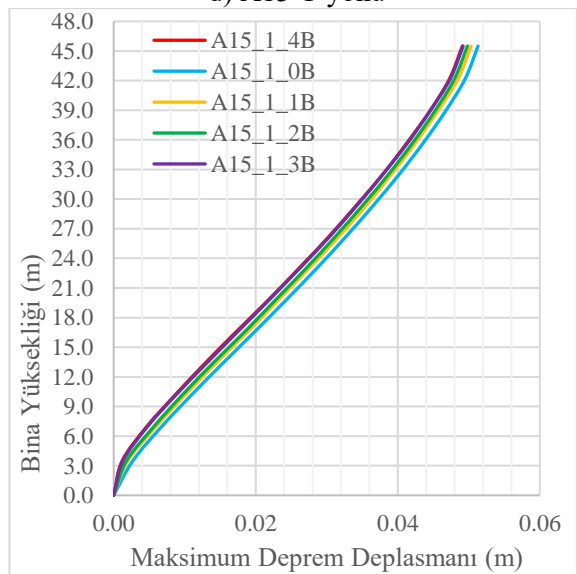
c) A13 X yönü



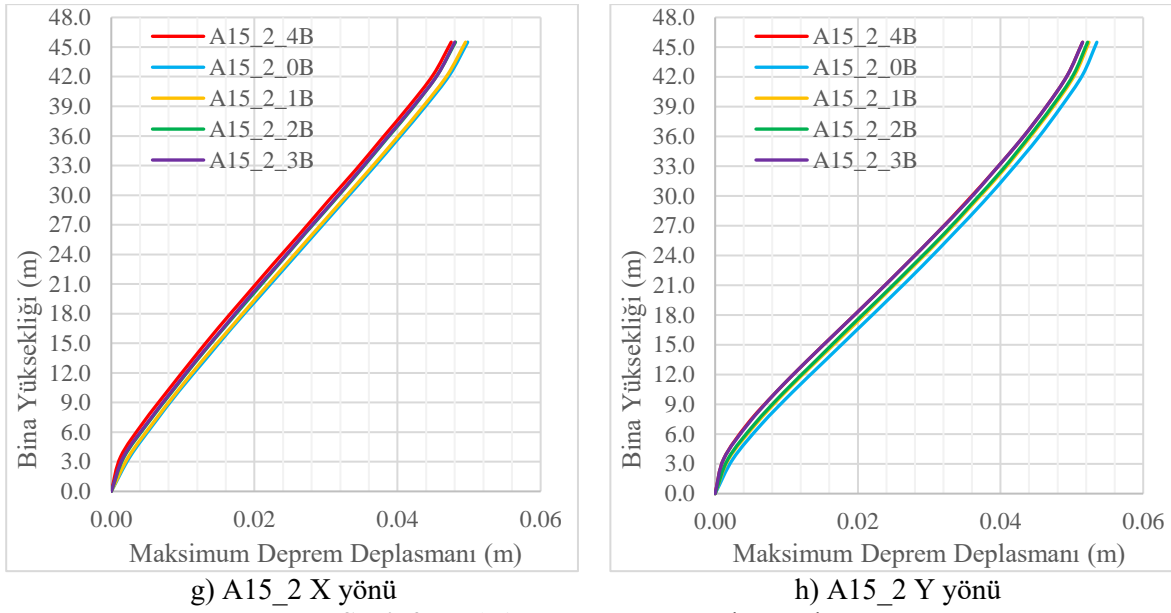
d) A13 Y yönü



e) A15_1 X yönü



f) A15_1 Y yönü



Şekil 2. Maksimum Deprem Deplasmanları

Tablo 7’de, yapı modellerinde oluşan görelî kat ötelemelerinin ve ikinci mertebe gösterge değerlerinin bodrum perdelerinin mevcut olup olmamasından pek etkilenmediği gözlenmektedir.

Tablo 7. Görelî Kat Ötelemeleri ve İkinci Mertebe Göstergeleri

Karşılaştırılan Büyüklükler	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0033	0.0032	0.0033	0.0033	0.0032
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(X)}$)			<0.008		
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0033	0.0033	0.0033	0.0032	0.0033
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(Y)}$)			<0.008		
En Büyük İkinci Mertebe	0.0280	0.0300	0.0290	0.0290	0.0280
Gösterge Kontrolü ($\theta_{II,max}^{(X,Y)}$)			<0.090		
	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0034	0.0034	0.0034	0.0038	0.0033
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(X)}$)			<0.008		
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0036	0.0036	0.0046	0.0045	0.0035
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(Y)}$)			<0.008		
En Büyük İkinci Mertebe	0.0310	0.0330	0.0320	0.032	0.0031
Gösterge Kontrolü ($\theta_{II,max}^{(X,Y)}$)			<0.125		
	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(X)}$)			<0.008		
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0031	0.0032	0.0032	0.0032	0.0031
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(Y)}$)			<0.008		
En Büyük İkinci Mertebe	0.026	0.028	0.027	0.027	0.026
Gösterge Kontrolü ($\theta_{II,max}^{(X,Y)}$)			<0.107		
	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(X)}$)			<0.008		
En Büyük Etkin Görelî Kat	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033
Ötelemesi Kontrolü ($\delta_{i,max}^{(Y)}$)			<0.008		
En Büyük İkinci Mertebe	0.027	0.029	0.029	0.028	0.028
Gösterge Kontrolü ($\theta_{II,max}^{(X,Y)}$)			<0.107		

Burulma Düzensizliği

Bodrum katta asimetrik olarak yerleştirilen rijit bodrum perdelerinin yapıda meydana getirebileceği burulma etkilerini irdelemek üzere Tablo 8’de burulma düzensizliği katsayıları (η_{bi}) verilmiştir. Deprem yönetmeliğinde izin verilen maksimum sınırın ($\eta_{bi} < 1.20$) aşıldığı durum sadece salt çerçeve sistem modellerinden A11_1B modelinde görülmüştür. Burada bodrum kata 1 cephede yerleştirilen rijit bodrum perdesinin çerçeve yapınının bodrum ve zemin katlarını az da olsa burulmaya zorladığı ($\eta_{bi} = 1.239$) anlaşılmaktadır. Perde içeren hiçbir modelde bu sınır aşılamamıştır. Modellerin bodrum kat kalıp planındaki rijitlik merkezinin koordinatları (X_r ve Y_r) Tablo 9’da verilmiştir. Ağırlık merkezi koordinatları X_r ve Y_r tüm modeller için 11.0 metre olup simetrik modellerde rijitlik merkezi koordinatları da bu değeri almaktadır.

Tablo 8. Burulma Düzensizliği Katsayıları.

Karşılaştırılan Büyüklükler	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
En Büyük Burulma	1.094	1.104	1.239	1.187	1.104
Düzensizliği Katsayısı (η_{bi})			>1.200		
	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
En Büyük Burulma	1.099	1.106	1.180	1.172	1.127
Düzensizliği Katsayısı (η_{bi})			<1.200		
	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
En Büyük Burulma	1.108	1.116	1.178	1.165	1.122
Düzensizliği Katsayısı (η_{bi})			<1.200		
	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
En Büyük Burulma	1.098	1.103	1.161	1.138	1.112
Düzensizliği Katsayısı (η_{bi})			<1.200		

Tablo 9. Bodrum Kat Kalıp Planındaki Rijitlik Merkezi Koordinatları (metre)

Model	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
X_r	11.0	11.0	4.56	2.83	11.0
Y_r	11.0	11.0	11.0	4.19	4.03
Model	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
X_r	11.0	11.0	4.52	4.49	11.0
Y_r	11.0	11.0	11.0	6.70	6.26
Model	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
X_r	11.0	11.0	4.03	4.04	11.0
Y_r	11.0	11.0	11.02	6.24	5.99
Model	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
X_r	11.0	11.0	4.41	4.35	11.0
Y_r	11.0	11.0	11.0	6.70	6.32

Dayanım ve Süneklik

Deprem yönetmeliğinde konut binaları için hedeflenmiş olan performans düzeyi Kontrollü Hasar (KH) DD-2 deprem yer hareketi seviyesinde tüm modeller için sağlanmıştır. Performans analizleri doğrusal hesap yöntemi ile dayanıma göre tasarım (DGT) yaklaşımına uygun olarak yapılmıştır. Elde edilen hasar durumları kolon ve perdeler için Tablo 10-13’de kirişler için ise Tablo 14-17’de verilmiştir. Salt çerçeve A11 taşıyıcı sistemi haricinde ileri hasar (İH) bölgesine geçen düşey eleman bulunmamaktadır.

Tamamen çerçevelerden oluşan A11 taşıyıcı sisteminden türetilen alt modellerde yönetmelik gereği taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=8$ olarak öngörüldüğünden, bu modellerde deprem etkilerinin $1/8$ ’inin (%12.5) eleman dayanımları ile karşılanması beklenirken, deprem etkilerinin $7/8$ ’lik (%87.5) kısmı ise sistemin sünekliği sayesinde hasar alarak enerji tüketimi şeklinde karşılanacaktır. Tamamen perdelerden oluşan A13 sisteminin alt modellerinde ise $R=4.8$ alındığından dayanımla karşılanması öngörülen kısım deprem etkilerinin yaklaşık %21’i, süneklik sayesinde hasar alarak enerji tüketimi şeklinde karşılanması beklenen kısım ise deprem etkilerinin yaklaşık %79’udur. Perdeli-çerçeve A15_1 ve A15_2 taşıyıcı sistemlerinin alt modellerinde $R=5.6$ olduğundan bu oranlar her iki taşıyıcı sistem için de aynı olup sırasıyla yaklaşık %18 ve %82 civarındadır.

A11 taşıyıcı sisteminin tüm modelleri için hasarın en fazla olduğu kritik katlar zemin katlar olarak görülmektedir. Bodrum perdesi olmayan 0B modelinde (İH) düzeyine geçen düşey eleman bulunmazken, bodrum perdeli modellerin

tamamında İH düzeyinde elemanlar olduğu gözlenmektedir. Bu taşıyıcı sistem tipi için en az hasarın ve dolayısıyla en iyi deprem performansının bodrum perdesiz olan A11_0B modeli için elde edildiği söylenebilir (İH oranı %0). En fazla hasar ise burulmanın da etkisiyle 1 cepheden bodrum perdeli A11_1B modelinde gözlenmektedir (İH oranı %10.3).

Salt perdeli A13 taşıyıcı sisteminin tüm modelleri için en fazla hasar zemin ve çatı katlarında görülmüştür. Bodrum perdesi olmayan bu taşıyıcı sistem tipi için zemin katta en az hasarın ve dolayısıyla en iyi deprem performansının bodrum perdesiz olan A13_0B modeli için elde edildiği söylenebilir (belirgin hasar BH oranı %31.6). En fazla hasar ise 1 cepheden bodrum perdeli A13_1B modelinde gözlenmektedir (BH oranı %66.2). A13 sisteminin tüm alt modellerinin tüm katlarında SH ve/veya BH oranının %100 olduğu gözlenmektedir.

Çerçevesiz-perdeli A15_1 ve A15_2 tipi taşıyıcı sistemlerinde ise en az hasar yine bodrum perdesiz modeller için (A15_1_0B ve A15_2_0B) elde edilmiş olup BH oranı sırasıyla %36.1 ve %34.1 olarak hesaplanmıştır. En fazla hasarlar ise rijit bodrum kata sahip olan 3 ve 4 cepheden bodrum perdeli 3B ve 4B modellerinde görülmüştür. A15_1 için maksimum hasar A15_4B modelinde %67.5 BH oranı ile ve A15_2 için ise A15_3B modelinde %68 BH oranı ile elde edilmiştir. A15_1 ve A15_2 sistemlerinin tüm alt modellerinin tüm katlarında SH ve/veya BH oranının %100 olduğu gözlenmektedir.

Kiriş hasarlarının tüm modeller için de tüm katlara benzer oranlarda yayıldığı gözlenmiştir. Bu durumun deprem yönetmeliğinde verilen kapasite tasarımı ilkelerine ve önerilen enerji tüketim modeline uygun olduğu söylenebilir.

Tablo 10. A11 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Düşey Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kolon - Perde Hasar Yüzdeleri	A11_4B			A11_0B			A11_1B			A11_2B			A11_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-
11. Normal Kat	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-
10. Normal Kat	100	-	-	94.3	5.7	-	90.8	9.2	-	100	-	-	94.6	5.4	-
9. Normal Kat	73.8	26.2	-	77.5	22.5	-	50.9	49.1	-	86.8	13.2	-	76.6	26.4	-
8. Normal Kat	45.3	54.7	-	44.8	55.2	-	32.7	67.3	-	73.4	26.6	-	45.0	55.0	-
7. Normal Kat	25.7	74.3	-	25.4	74.6	-	14.6	85.4	-	33.7	66.3	-	25.5	74.5	-
6. Normal Kat	19.1	80.9	-	25.1	74.9	-	12.8	87.2	-	25.4	74.6	-	18.8	81.2	-
5. Normal Kat	14.7	85.3	-	14.2	85.8	-	8.5	91.5	-	25.1	74.9	-	14.5	85.5	-
4. Normal Kat	10.6	89.4	-	14.0	86.0	-	6.9	93.1	-	16.1	83.9	-	10.3	89.7	-
3. Normal Kat	4.2	95.8	-	3.9	96.1	-	2.6	97.4	-	7.3	92.7	-	4.1	95.9	-
2. Normal Kat	1.4	98.6	-	2.6	97.4	-	1.3	98.7	-	2.7	97.3	-	1.3	98.7	-
1. Normal Kat	-	94.7	5.3	0	100	-	-	94.2	5.8	1.3	98.7	-	-	94.5	5.5
Zemin Kat	-	92.0	8.0	0	100	-	-	89.7	10.3	-	91.6	8.4	-	91.5	8.5
Bodrum Kat	99.8	0.20	-	10.4	89.6	-	1.7	98.3	-	83.0	17.0	-	99.5	0.5	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 11. A13 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Düşey Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kolon - Perde Hasar Yüzdeleri	A13_4B			A13_0B			A13_1B			A13_2B			A13_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-
11. Normal Kat	43.7	56.3	-	41.9	58.1	-	32.6	67.4	-	33.1	66.9	-	43.6	56.4	-
10. Normal Kat	51.5	48.5	-	54.6	45.4	-	51.1	48.9	-	51.7	48.3	-	51.4	48.6	-
9. Normal Kat	54.3	45.7	-	53.6	46.4	-	54.0	46.0	-	54.5	45.5	-	54.2	45.8	-
8. Normal Kat	49.9	50.1	-	49.3	50.7	-	49.7	50.3	-	50.1	49.9	-	49.8	50.2	-
7. Normal Kat	52.6	47.4	-	49.8	50.2	-	50.2	49.8	-	50.5	49.5	-	52.5	47.5	-
6. Normal Kat	75.4	24.6	-	59.4	40.6	-	50.5	49.5	-	50.8	49.2	-	75.2	24.8	-
5. Normal Kat	78.6	21.4	-	75.1	24.9	-	51.1	48.9	-	51.3	48.7	-	78.5	21.5	-
4. Normal Kat	88.0	12.0	-	78.4	21.6	-	52.4	47.6	-	52.5	47.5	-	88.0	12.0	-
3. Normal Kat	88.9	11.1	-	88.2	11.8	-	56.7	43.3	-	56.6	43.4	-	88.8	11.2	-
2. Normal Kat	87.1	12.9	-	89.2	10.8	-	61.4	38.6	-	68.1	31.9	-	92.7	7.3	-
1. Normal Kat	96.8	3.2	-	91.8	8.2	-	42.4	57.6	-	38.4	61.6	-	96.7	3.3	-
Zemin Kat	47.4	52.6	-	68.4	31.6	-	33.8	66.2	-	38.3	61.7	-	46.6	53.4	-
Bodrum Kat	98.6	1.4	-	65.2	24.8	-	83.9	16.1	-	79.0	21.0	-	97.2	2.8	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 12. A15_1 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Düşey Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kolon - Perde Hasar Yüzdeleri	A15_1_4B			A15_1_0B			A15_1_1B			A15_1_2B			A15_1_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-
11. Normal Kat	63.3	36.7	-	72.2	27.8	-	83.7	16.3	-	85.8	14.2	-	63.3	36.7	-
10. Normal Kat	69.6	30.4	-	81.3	18.7	-	80.9	19.1	-	91.3	8.7	-	69.5	30.5	-
9. Normal Kat	57.0	43.0	-	60.8	39.2	-	66.7	33.3	-	72.9	27.1	-	56.9	43.1	-
8. Normal Kat	48.1	51.9	-	47.4	52.6	-	47.6	52.4	-	47.8	52.2	-	48.1	51.9	-
7. Normal Kat	48.3	51.7	-	47.6	52.4	-	47.9	52.1	-	48.1	51.9	-	48.3	51.7	-
6. Normal Kat	48.6	51.4	-	47.7	52.3	-	48.1	51.9	-	48.2	51.8	-	46.8	53.2	-
5. Normal Kat	49.2	50.8	-	48.0	52.0	-	48.5	51.5	-	48.7	51.3	-	49.1	50.9	-
4. Normal Kat	50.4	49.6	-	48.8	51.2	-	49.5	50.5	-	49.8	50.2	-	50.4	49.6	-
3. Normal Kat	48.3	51.7	-	44.0	56.0	-	45.0	55.0	-	48.8	51.2	-	46.7	53.3	-
2. Normal Kat	47.5	52.5	-	42.6	57.4	-	45.8	54.2	-	48.3	51.7	-	47.4	52.6	-
1. Normal Kat	53.0	47.0	-	46.9	53.1	-	50.5	49.5	-	51.6	48.4	-	52.4	47.6	-
Zemin Kat	32.5	67.5	-	63.9	36.1	-	50.4	49.6	-	49.7	50.3	-	34.0	66.0	-
Bodrum Kat	99.9	0.10	-	64.0	36.0	-	62.2	37.8	-	93.7	6.3	-	99.7	0.3	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 13. A15_2 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Düşey Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kolon - Perde Hasar Yüzdeleri	A15_2_4B			A15_2_0B			A15_2_1B			A15_2_2B			A15_2_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	100	0.0	-	100	0.0	-	100	0.0	-	100	0.0	-	100	0.0	-
11. Normal Kat	26.6	73.4	-	29.8	70.2	-	29.4	70.6	-	29.6	70.4	-	25.4	74.6	-
10. Normal Kat	49.0	51.0	-	64.5	35.5	-	70.5	29.5	-	70.5	29.5	-	48.5	51.5	-
9. Normal Kat	46.7	53.3	-	49.8	50.2	-	60.3	39.7	-	60.3	39.7	-	46.3	53.7	-
8. Normal Kat	44.7	55.3	-	52.6	47.4	-	59.6	40.4	-	61.6	38.4	-	44.4	55.6	-
7. Normal Kat	50.3	49.7	-	56.4	43.6	-	56.2	43.8	-	60.0	40.0	-	50.0	50.0	-
6. Normal Kat	53.6	46.4	-	54.5	45.5	-	52.7	47.3	-	54.4	45.6	-	53.4	46.6	-
5. Normal Kat	57.4	42.6	-	56.4	43.6	-	56.6	43.4	-	56.6	43.4	-	57.3	42.7	-
4. Normal Kat	64.7	35.3	-	63.5	36.5	-	64.0	36.0	-	64.0	36.0	-	64.6	35.4	-
3. Normal Kat	66.7	33.3	-	65.0	35.0	-	65.7	34.3	-	65.8	34.2	-	66.7	33.3	-
2. Normal Kat	69.7	30.3	-	67.4	32.6	-	68.4	31.6	-	68.5	31.5	-	69.6	30.4	-
1. Normal Kat	74.1	25.9	-	70.5	29.5	-	72.0	28.0	-	72.3	27.7	-	73.9	26.1	-
Zemin Kat	32.2	67.8	-	79.1	20.9	-	54.1	45.9	-	53.4	46.6	-	32.0	68.0	-
Bodrum Kat	99.9	0.1	-	65.9	34.1	-	46.2	53.8	-	74.2	25.8	-	75.8	24.2	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 14. A11 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Kiriş Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kiriş Hasar Yüzdeleri	A11_4B			A11_0B			A11_1B			A11_2B			A11_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	100	-	-	100	-	-	83.3	16.7	-	100	-	-	100	-	-
11. Normal Kat	100	-	-	77.3	22.7	-	54.5	45.5	-	78.3	21.7	-	52.2	47.8	-
10. Normal Kat	60.9	39.1	-	-	100	-	-	100	-	13.0	87.0	-	-	100	-
9. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
8. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
7. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
6. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
5. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
4. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
3. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
2. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
1. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Zemin Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Bodrum Kat	100	-	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 15. A13 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Kiriş Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kiriş Hasar Yüzdeleri	A13_4B			A13_0B			A13_1B			A13_2B			A13_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
11. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
10. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
9. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
8. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
7. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
6. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
5. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
4. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
3. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
2. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
1. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Zemin Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Bodrum Kat	100	-	-	-	100	-	-	100	-	8.3	91.7	-	25.0	75.0	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 16. A15_1 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Kiriş Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kiriş Hasar Yüzdeleri	A13_4B			A13_0B			A13_1B			A13_2B			A13_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
11. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
10. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
9. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
8. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
7. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
6. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
5. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
4. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
3. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
2. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
1. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Zemin Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Bodrum Kat	100	-	-	-	100	-	-	100	-	31.2	68.8	-	18.7	81.3	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Tablo 17. A15_2 Sistemi İçin Performans Analizi Sonucunda Kiriş Elemanlarda Elde Edilen Hasar Durumları

Kiriş Hasar Yüzdeleri	A13_4B			A13_0B			A13_1B			A13_2B			A13_3B		
	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH	SH	BH	İH
12. Asansör D.	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
11. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
10. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
9. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
8. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
7. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
6. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
5. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
4. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
3. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
2. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
1. Normal Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Zemin Kat	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-
Bodrum Kat	82.3	7.7	-	-	100	-	-	100	-	12.5	87.5	-	12.5	87.5	-

SH: SINIRLI HASAR, BH: BELİRGİN HASAR, İH: İLERİ HASAR

Radye Temelde ve Üstyapıda Maliyet Değişimleri

Kabayapı maliyetinin en belirleyici iş kalemleri olan demir, beton ve kalıp maliyetleri Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nca yayınlanan Birim Fiyatlar (ÇŞİDB, 2022) esas alınarak Tablo 18'de verilmiştir. Tablo 19'da ve Şekil 3-5'te modeller için hesaplanan kaba yapı yaklaşık maliyetleri özetlenmiştir.

Tablo 18. Betonarme Demiri, Hazır Beton ve Betonarme Kalıbı için Poz Numaraları ve Birim Fiyatları.

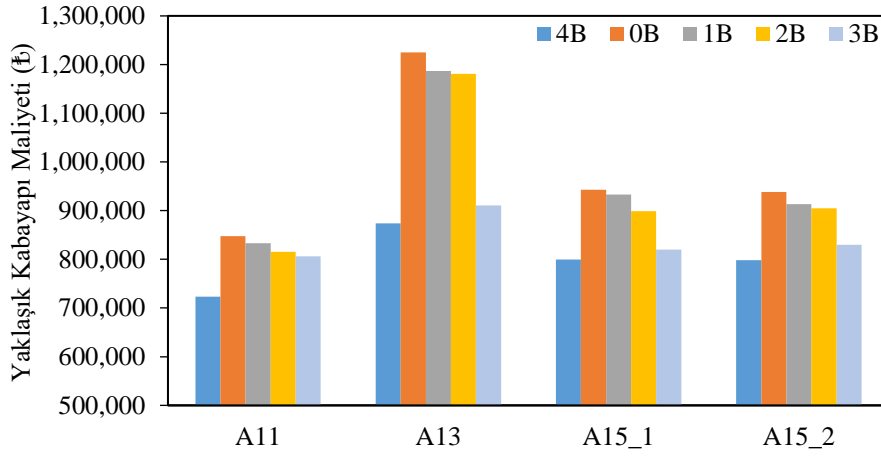
İş Kalemleri	Poz No	Birim Fiyat (₺)
Betonarme İnce Demiri 8-12mm (ton)	15.160.1003	13,678.13
Betonarme Kalın Demiri 14-28mm (ton)	15.160.1004	13,630.00
C35/45 Hazır Betonu (m ³)	15.150.1007	627.71
Düz Yüzeyle Bet. Kalıbı (m ²)	15.180.1003	129.53

Tablo 19. Kabayapı Yaklaşık Maliyetleri

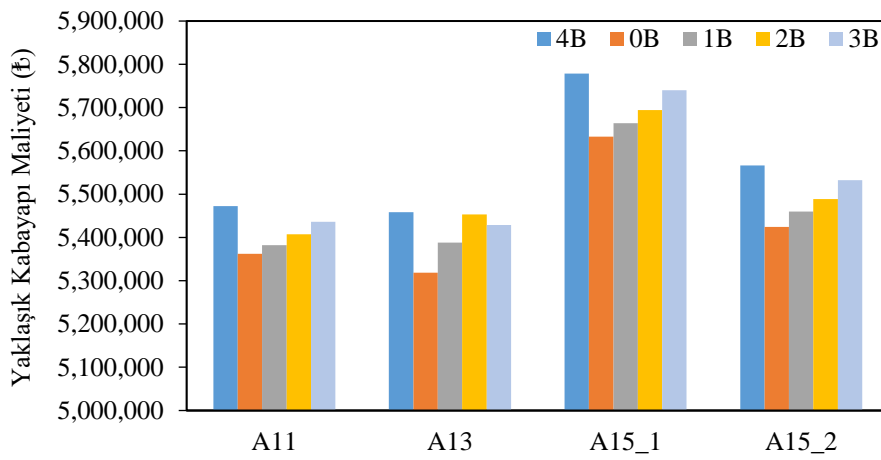
İş Kalemleri	A11_4B	A11_0B	A11_1B	A11_2B	A11_3B
Üstyapı	5,362,409.3	5,382,249.1	5,407,100.0	5,435,936.9	5,472,680.6
Radye Temel	847,837.0	833,398.8	815,662.9	806,455.4	723,062.9
TOPLAM (₺)	6,210,246.3	6,215,647.9	6,222,762.9	6,242,392.3	6,195,743.5
İş Kalemleri	A13_4B	A13_0B	A13_1B	A13_2B	A13_3B
Üstyapı	5,318,519.0	5,388,120.1	5,453,044.3	5,428,559.7	5,458,018.8
Radye Temel	1,225,269.4	1,187,199.6	1,180,876.1	910,748.4	873,857.8
TOPLAM (₺)	6,543,788.3	6,575,319.7	6,633,920.4	6,339,308.1	6,331,876.6
İş Kalemleri	A15_1_4B	A15_1_0B	A15_1_1B	A15_1_2B	A15_1_3B
Üstyapı	5,633,139.0	5,664,177.0	5,694,135.4	5,740,201.6	5,778,424.9
Radye Temel	943,128.4	932,773.2	899,070.4	819,944.6	799,740.8
TOPLAM (₺)	6,576,267.3	6,596,950.1	6,593,205.8	6,560,146.2	6,578,165.6
İş Kalemleri	A15_2_4B	A15_2_0B	A15_2_1B	A15_2_2B	A15_2_3B
Üstyapı	5,424,188.7	5,459,727.2	5,488,301.7	5,532,018.3	5,566,121.9
Radye Temel	938,152.4	913,275.0	905,097.0	829,565.4	798,172.3
TOPLAM (₺)	6,362,341.1	6,373,002.3	6,393,398.7	6,361,583.6	6,364,294.2

Şekil 3 ve Şekil 4'te bodrum kattaki bodrum perdesi yerleşiminin radye temel ve üstyapı maliyetlerine etkisi verilmiştir. Tüm modellerde en yüksek radye temel maliyeti bodrum perdesiz modeller için elde edilirken en düşük radye temel maliyeti ise rijit bodrum kata sahip olan 4B modelleri için elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, rijit bodrum perdelerinden oluşan rijit bodrum katın üstyapıdan gelen deprem etkilerini temele ve dolayısıyla zemine daha düzenli bir şekilde aktarabilmesi ile açıklanabilir. Alt modeller arasındaki en düşük ve en yüksek maliyet farkı A11, A15_1 ve A15_2 taşıyıcı sistemleri için yaklaşık olarak %17 civarında olurken A13 sistemi için bu oran %40 değerlerine ulaşmıştır. Şekil 4'te verilen üstyapı maliyet grafiğinde ise radye temeldeki durumun tersine bir durum gözlenmektedir. Cephelere yerleştirilen bodrum perdelerin maliyetlerinin üstyapı maliyetlerini artırması beklenen bir durumdur.

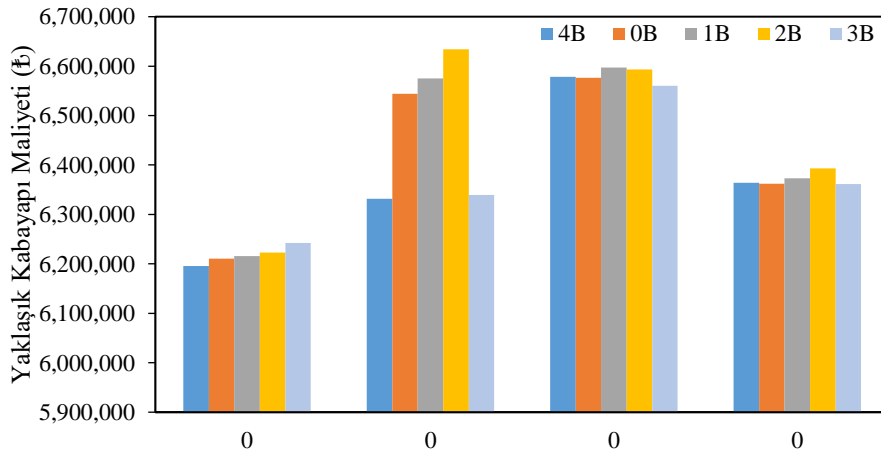
Radye temel ve üstyapı maliyetleri birleştirilerek elde edilen grafik Şekil 5'te verilmiştir. Bodrum kattaki bodrum perdesi yerleşiminin toplam kaba yapı maliyetine etkisi A11, A15_1 ve A15_2 taşıyıcı sistemlerinde oldukça sınırlı oranda kalmış olup %1'in altındadır. A13 sisteminde ise bu oran %5'e yaklaşmış olup bu sistemde en düşük maliyet rijit bodrum kata sahip olan A13_4B modeli için elde edilmiştir.



Şekil 3. Radye Temel Yaklaşık Kabayapı Maliyetleri



Şekil 4. Üstyapı Yaklaşık Kabayapı Maliyetleri



Şekil 5. Yaklaşık Toplam Kabayapı Maliyetleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 13 katlı konut tipi bir bina, TBDY-2018’de verilen 4 farklı taşıyıcı sistem tipi esas alınarak, bodrum katlar sırasıyla bir, iki, üç ve dört cepheden rijit perdelerle çevrelenmiş olarak modellenmiştir. Ayrıca bodrum perdesi kullanılmadan da birer model hazırlanmıştır. Böylece, 4 farklı taşıyıcı sistem türü ve 5 farklı bodrum perdesi yerleşimi olmak üzere toplam 20 adet model hazırlanmıştır. Bodrum katlardaki rijit bodrum perdesi yerleşimlerinin yapı davranışı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Salt çerçeveseli (A11), salt perdeli (A13), perde oranı farklı iki adet çerçeveseli-perdeli (A15_1 ve A15_2) taşıyıcı sistemleri, sırasıyla bodrum perdesiz (0B), bir cepheden bodrum perdeli (1B), iki cepheden bodrum perdeli (2B), üç cepheden bodrum perdeli (3B) ve dört cepheden bodrum perdeli (4B)

olmak üzere 5 farklı şekilde modellenmiştir. Yapı davranışını irdelemek üzere her bir taşıyıcı sistem türü kendi arasında karşılaştırılmıştır. Çalışmada ele alınan modeller kapsamında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

En büyük momentleri üzerine alan deprem perdeleri incelendiğinde, bodrum kattaki rijit bodrum perdesi miktarı arttıkça deprem perdelerinin üzerine aldığı momentlerin azaldığı, büyük ebatlı deprem perdelerinin aşırı yüklenmesinin engellenerek daha dengeli bir yük dağılımı gerçekleştiği gözlenmiştir. Böylece bir veya birkaç deprem perdesinin deprem etkisi altında aşırı yüklenerek aniden devreden çıkması ve rijitlik merkezinin değişerek sistemin burulmaya çalışması riski de önlenmektedir. Bu ilişkinin çalışma kapsamında ele alınan ve perde içeren tüm taşıyıcı sistem tipleri için geçerli olduğu anlaşılmıştır.

Taban kesme kuvvetleri değerleri incelendiğinde, salt çerçeve ve perdeli-çerçeve taşıyıcı sistemlerin rijit bodruma sahip olmayan 0B, 1B, 2B modelleri için, bodrum kattaki rijit perdelerin sayısının artmasının X ve Y yönündeki taban kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve değişimin %1 seviyelerinde kaldığı görülmüştür. Salt perdeli A13 sisteminde ise taban kesme kuvvetlerindeki bu değişim önemli miktarda olup bodrum kattaki rijit perdelerin sayısının artması ile %28 kadar bir artış görülmüştür. Salt perdeli bu sistemin rijit bodrum kata sahip olan modelleri arasında bu değişim %1'in altında kalmıştır.

Taban kesme kuvvetinin bina ağırlığına oranları salt çerçeve modellerde yaklaşık %3, perde içeren modellerde ise yaklaşık %4-5 mertebelerinde elde edilmiş olup bodrum rijitliğinin bu parametre üzerindeki etkisinin oldukça düşük düzeyde kaldığı gözlenmiştir.

Yapı rijitliğini yorumlamak üzere yapı periyotları ve deprem deplasmanları da incelenmiştir. Rijit bodrum kata sahip olmayan modellerde (0B, 1B, 2B), bodrum katta rijit bodrum perdesi oranı arttıkça yapı rijitliği de artmış ve yapı periyotları %3-9 oranında azalmıştır. Rijit bodrum kata sahip olan modellerde (3B, 4B) ise periyotlardaki değişim oldukça minimal seviyede kalmış olup Y yönü için periyotların hemen hemen değişmediği görülmüştür.

Bodrum katta rijit bodrum perdelerinin yerleşimi maksimum deprem deplasmanlarını da etkilemiştir. Maksimum tepe deplasmanındaki artış, salt perdeli sistem haricindeki tüm taşıyıcı sistemlerin bodrum perdesi bulunmayan modellerinde en yüksek olup 4 cepheden rijit perdeli bodruma sahip olan modellere kıyasla %3-5 mertebelerindedir. Salt perdeli sistemde ise bodrum perdesi bulunmayan modellere kıyasla maksimum artış X ve Y yönleri için sırasıyla iki cepheden bodrum perdeli ve bir cepheden bodrum perdeli olan modellerde %13 ve %29 olarak elde edilmiştir.

Görel kat ötelemeleri için 20 adet modelin tamamında oldukça yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. Bodrum katta rijit bodrum perdelerinin yerleşimi bu parametre üzerinde pek etkili olmamıştır.

Bodrum katta asimetric olarak yerleştirilen rijit bodrum perdelerinin yapıda meydana getirebileceği burulma etkilerini irdelemek üzere burulma düzensizliği katsayıları deprem yönetmeliğinde verilen maksimum sınır ile karşılaştırılmıştır. Bu sınırın aşıldığı durum sadece salt çerçeve sistem tipinin bir cepheden bodrum perdeli modelinde görülmüştür. Burada bodrum kata 1 cephede yerleştirilen rijit bodrum perdesinin çerçeve yapının bodrum ve zemin katlarını az da olsa burulmaya zorladığı görülmektedir. Perde içeren hiçbir modelde bu sınır aşılamamıştır.

Bodrum perdesiz modeller ile 4 cepheden bodrum perdeli modeller karşılaştırıldığında, 4 cephede perde yerleştirilerek oluşturulan rijit bodrum katın kritik kattaki hasar miktarını artırdığı tüm taşıyıcı sistem tiplerinde gözlenmiştir. Tüm modeller için kritik katlardaki en az hasar bodrum perdesiz modellerde görülmüştür. En fazla hasar ise; salt çerçeve ve salt perdeli taşıyıcı sistem tiplerinde burulma düzensizliği katsayılarının en yüksek olduğu tek cepheden bodrum perdeli modellerde görülürken, çerçeve-perdeli olan taşıyıcı sistemlerde ise en fazla hasar rijit bodrum kata sahip olan modellerde görülmüştür.

Salt çerçeve ve salt perdeli taşıyıcı sistemlerde hasarlar kritik katlarda yoğunlaşmaktadır. Çerçeve-perdeli olan taşıyıcı sistemlerde ise rijit bodrum kata sahip modellerde hasar kritik katlarda yoğunlaşırken, bodrum perdesiz, tek cepheden bodrum perdeli ve iki cepheden bodrum perdeli modellerde hasarın kritik katlarla sınırlı kalmayarak orta katlara yayıldığı gözlenmiştir.

Radye temel ve üst yapı maliyetleri birleştirilerek elde edilen toplam kaba yapı maliyetleri tüm modellerde oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Bodrum kattaki bodrum perdesi yerleşiminin toplam kaba yapı maliyetine etkisi salt

çerçevesi ve perdeli-çerçevesi taşıyıcı sistemlerde oldukça sınırlı oranda kalmış olup değişim %1'in altındadır. Salt perdeli sistemde ise bu oran %5'e yaklaşmış olup en düşük maliyet 4 cepheden bodrum perdeli rijit bodrum kata sahip olan model için elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

AFAD (2018a). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

AFAD (2018b). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, (2021, 08 Ocak) Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprembilgileri/genel-bilgiler/>

ÇŞİDB (2022). Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

Değer, Z.T., & Gökçeoğlu, U. Bodrum perde yerleşiminin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne yüksek bina tasarımına etkisi. 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 13-15 Ekim 2021 – GTÜ – Gebze, Kocaeli, Türkiye

Erdim, Y.K. (2018). Betonarme binalarda rijit bodrum kat sayısının yapısal davranışa etkisi. Yüksek lisans tezi. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi.

Kumbasaroglu, A. (2020). Effect of anchor bars on seismic behavior of infilled walled frames. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(10):2980-2992.

Özuygur, A.R., & Dilsiz, A. (2021). Rijit bodrumlu binaların TBDY 2018'e göre tasarımına yönelik bir Değerlendirme. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(1), 243-249.

STA4-CAD. Structural analysis for computer aided design (version 14.1), İstanbul, 34718.

Ünsal, İ., & Şahan, M.F. (2021). TBDY 2018 yönetmeliğinde verilen süneklik düzeyi yüksek betonarme taşıyıcı sistemler için maliyet ve deprem performansı bakımından bir karşılaştırma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 509-522.

Ünsal, İ., Balca, N., Şahan, M.F. (2022). Orta yükseklikteki binalar için TBDY 2018 yönetmeliğinde verilen taşıyıcı sistem tiplerinin doğrusal analiz yöntemi ile karşılaştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1093363>, In Press.

Ünsal, İ., Öncel, F.A., Şahan, M.F. (2020). TDY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre yapı yüksekliğinin taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(4), 930-942.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.05.2022
Kabul Tarihi : 06.08.2022

Received Date : 05.05.2022
Accepted Date : 06.08.2022

ŞAPHANE (ÇORUM) DAMAR TİPİ ALTIN (Au) CEVHERLEŞMESİNDE MULTİSPEKTRAL UYDU GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK HİDROTERMAL ALTERASYON MİNERAL HARİTALAMASI VE ÇİZGİSELLİK ANALİZİ

HYDROTHERMAL ALTERATION MINERAL MAPPING AND LINEAMENT ANALYSIS USING MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES IN VEIN TYPE GOLD (Au) MINERALIZATION IN ŞAPHANE (ÇORUM)

Oktay CANBAZ^{1*} (ORCID: 0000-0002-8161-1326)

Esra ÜNAL ÇAKIR² (ORCID: 0000-0002-4196-4303)

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Oktay CANBAZ, ocanbaz@cumhuriyet.edu.tr

ÖZET

Özellikle metalik madenlerin ilk arama aşamalarından biri olan hidrotermal alterasyon minerallerinin dağılımlarının daha az maliyetle ve kısa sürede haritalanması, madencilik için önemlidir. Tektonik olarak, çalışma alanı Pontidler ile Orta Anadolu kristalin Kompleksi arasında ve İzmir-Ankara-Erzincan Suture zonunun kuzeyinde yer almaktadır. Çalışma alanında, Eosen volkanizmasına ait ürünler ile hidrotermal çözeltinin neden olduğu alterasyonlar yoğun olarak gözlenmektedir. Bu yoğun alterasyonlar, yaklaşık KD-GB doğrultulu altın içeren hidrotermal damarlarla ilişkilendirilir. Altın potansiyeli yüksek olan bu saha sarp topografya ve ulaşılması güç yüzleklere sahiptir. Topoğrafik koşullara bağlı olarak bölgede arazi çalışmaları güçlüklerle gerçekleştirilmekte, yaşanan zorluk nedeni ile çalışmalar sırasında önemli birçok alan örneklenememektedir. Uzaktan algılama teknikleri litolojik özelliklerin ve minerallerin haritalanmasında, yapısal özelliklerin ortaya çıkarılmasında oldukça kullanışlı veriler sunmaktadır. Bu çalışmada, ASTER ve Landsat-8 uydu multispektral görüntülerinde bant oranlama, spektral mineral indeksi ve MTMF spektral sınıflandırmadan oluşan görüntü işleme yöntemleri uygulanarak hidrotermal alterasyon zonlarının haritalaması yapılmıştır. Ayrıca, damar tipi cevherleşmelerin tespitine yönelik ise Landsat-8 OLI uydu görüntüsünden pankeskinleştirme ile elde edilen görüntüde otomatik çizgisellik analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, %84,8 genel doğruluk ve 0,836 kappa katsayısına sahip olup arazi verileri ile yüksek oranda doğruluk göstermektedir. Çalışmada elde edilen haritalar, bölgedeki yeni altın ve/veya diğer değerli metalik cevherleşmeler için kullanışlı ve öncü veri niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan algılama, altın (Au), hidrotermal alterasyon, spektral sınıflandırma

ABSTRACT

It is important for mining to map the distribution of hydrothermal alteration minerals, which is one of the first exploration stages of metallic ore deposits, with less cost and in a short time. Tectonically, the study area is located between the Pontides and the Central Anatolian Crystalline Complex and to the north of the İzmir-Ankara-Erzincan Suture zone. In the study area, Eocene volcanic rocks and alterations caused by hydrothermal fluids activities are intensely observed. These intense alterations are associated with gold-bearing hydrothermal veins in approximately NE-SW direction. This area, which has a high gold potential, has a steep topography and is difficult to access. Due to the topographical conditions, field studies are difficult in the region, and many important areas cannot be sampled during the studies due to the difficulties experienced. Remote sensing techniques provide very useful data

ToCite: CANBAZ, O., & ÜNAL ÇAKIR, E. (2022). ŞAPHANE (ÇORUM) DAMAR TİPİ ALTIN (Au) CEVHERLEŞMESİNDE MULTİSPEKTRAL UYDU GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK HİDROTERMAL ALTERASYON MİNERAL HARİTALAMASI VE ÇİZGİSELLİK ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 313-328.

for mapping lithological features and minerals, revealing structural features. In this study, mapping of hydrothermal alteration zones has been performed by applying image processing methods consisting of band ratio, spectral mineral index, and MTMF spectral classification in multispectral images of ASTER and Landsat-8 satellites. In addition, automatic lineament analyses have been applied to the image obtained by pan-sharpening from the Landsat-8 OLI satellite image for the detection of vein-type mineralizations. The results obtained have an overall accuracy of 84.8% and a kappa coefficient of 0.836, showing high accuracy with field data. The maps obtained in the study are useful and leading data for new gold and/or other precious metallic mineralizations in the region.

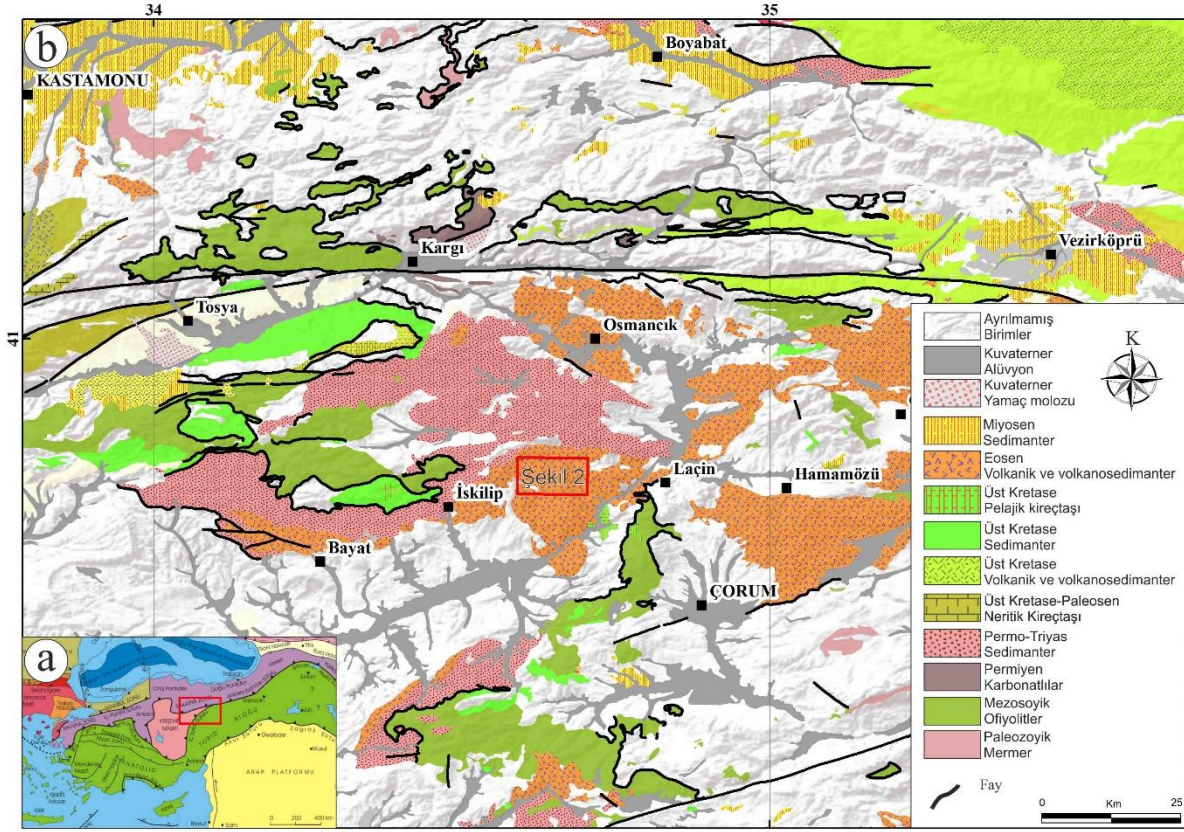
Keywords: Remote sensing, gold (Au), hydrothermal alteration, spectral classification

GİRİŞ

Sıcak sulu çözeltilerin etkisiyle yan kayaçta meydana gelen mineralojik, kimyasal ve fiziksel değişimler olarak tanımlanan hidrotermal alterasyonlar maden arama faaliyetlerinin ilk adımlarından birini oluşturmaktadır. Bu özelliklerin tespiti laboratuvar çalışmalarının yanında uzun ve maliyetli arazi çalışmaları da gerektirmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda multi- ve/veya hiperspektral uydu görüntülerine uygulanan görüntü işleme teknikleri ve sınıflandırma yöntemlerinin litolojik özelliklerin ve hidrotermal alterasyon minerallerinin haritalanmasına yönelik gerçekleştirilen araştırmalarda yüksek doğruluğa sahip sonuçlar elde edilmiştir (Karaman 2021; Vural vd. 2021; El-Wahed vd. 2021; Baran, 2021; Tözün & Özyavaş 2020; Traore vd. 2020; Çörtük vd. 2020; Rajendran & Nasir 2019; 2018, 2020a; Abubakar vd. 2018; Özkan vd. 2018; Yang vd. 2018; Canbaz vd. 2017, Eslami vd. 2016; Alimohammadi vd. 2015; Hosseinjani Zadeh vd. 2014; Honarmand vd. 2013; Pour & Hashim 2011; Tangestani vd. 2011; Kavak 2005; Suzen & Toprak 1998). Bu çalışmaların birçoğunda özellikle zamansal (kısa süre) ve maliyet yönüne (daha az maliyetli) vurgu yapılmıştır.

Pontidler ile Orta Anadolu kristalin Kompleksi arasında kalan bölgede ve İzmir-Ankara-Erzincan Suture zonunun kuzeyinde yer alan çalışma alanında, tüf ve lavlardan oluşan bazaltik traki-andezitten andezite kadar farklı bileşime sahip Eosen volkanizması ürünleri yüzeylenmektedir (Canbaz vd. 2020b; Göçmengil vd. 2018; Keskin vd. 2008; Akçay vd. 2008; Koçbulut vd. 2001; Alpaslan 2000; Alpaslan & Terzioğlu 1998; Yılmaz vd. 1994, 1997); Tüysüz & Dellaloğlu 1992; Büyükonul 1985; Yılmaz & Tüysüz 1984). Son yıllarda bu volkanizma ürünleri içerisinde metalik madenlere yönelik tespit ve iyileştirme çalışmaları oldukça hız kazanmıştır. Çalışma alanı, Çorum iline 70 km, Oğuzlar ilçesine 20 km uzaklıkta Şaphane (Eskiköy) köyü yakınında Sakarya kıtası ile Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı arasında geçiş bölgesinde bulunmaktadır (Şekil 1). Çankırı-Çorum havzası Üst Kretase-Üst Paleosen zaman aralığında Sakarya kıtasının aktif kıta kenarı üzerinde bir yay-önü havzası olarak gelişmiş, Üst Paleosen-Alt Eosen sırasında Kırşehir bloğu ve Sakarya kıtasının çarpışması sonucu deforme olmuştur (Görür & Şengör 1986). Çankırı-Çorum havzasında farklı iki çökel istiftten biri transgresif seri ile onu izleyen regresif kırıntılı ve volkanitlerden oluşan bir istifken diğeri havzada geniş alanlar kapsayan kırıntılı ve evaporitik çökeller ile volkanik lav ve piroklastik kayaçlardır. İnceleme alanı yakınlarında Soğucak (İskilip-Çorum) Cu-Pb, Gökçedoğan (Kargı-Çorum) Cu-Zn, Bakırçay (Merzifon-Amasya) Porfiri Cu-Mo, Gümüşhacıköy (Amasya) Pb-Ag-Cu-Zn, Turhal (Tokat) Sb ve Başnayayla (Yozgat) Porfiri Cu-Mo, cevherleşmeleri gibi çok sayıda cevherleşme bulunmaktadır (Yalçın vd. 2022; Yalçın 2018; Demiryürek 2006; Bozkaya vd. 1996; Kuşcu & Genç 1999; Gökce & Bozkaya 1998).

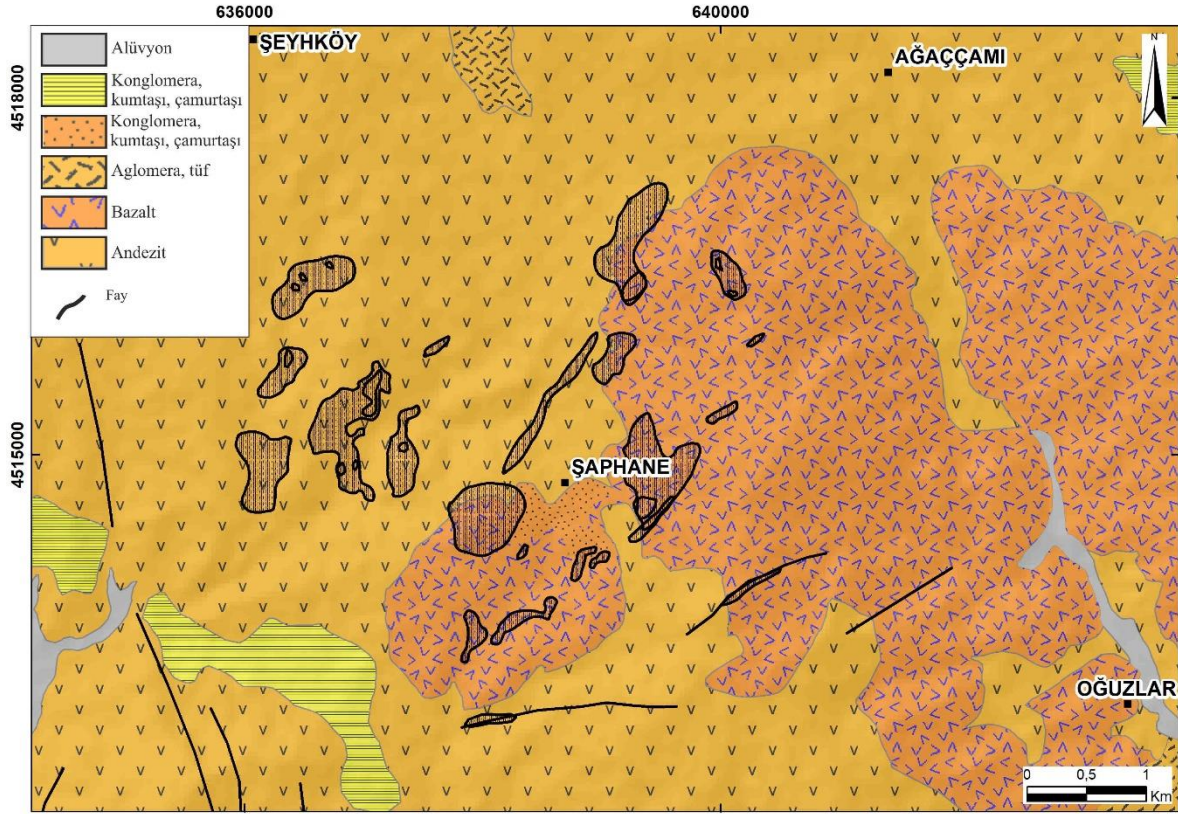
İnceleme alanı topografya olarak engebeli ve ulaşılması güç alanları kapsadığından maden arama faaliyetlerinin geleneksel yöntemlerle yürütülmesi uzun süreçler ve maliyetler gerektirmektedir. Bu nedenle çalışmada, bölgede yüzeyleyen Eosen yaşlı volkanik kayaçlarda gelişen alterasyon alanları, bunlarla ilişki alterasyon minerallerinin haritalanması ve çizgisellikleri ortaya çıkarılması amacıyla Gelişmiş Uydu-Bazlı Isıl Yayım ve Yansıtım Radyometre (ASTER) ve Landsat-8 OLI multispektral uydu veri setleri ve uzaktan algılama yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada elde edilecek sonuçlar, bölgedeki volkanik kayaçlar içerisinde yeni altın ve/veya diğer değerli metalik cevherleşmelerinin keşfinde oldukça önemli bilgiler sunacaktır.



Şekil 1. a) Türkiye Tektonik Haritası (Okay & Tüysüz, 1999). B) Bölgesel Jeoloji Haritası (MTA 2002'den Değiştirilmiştir).

JEOLOJİ

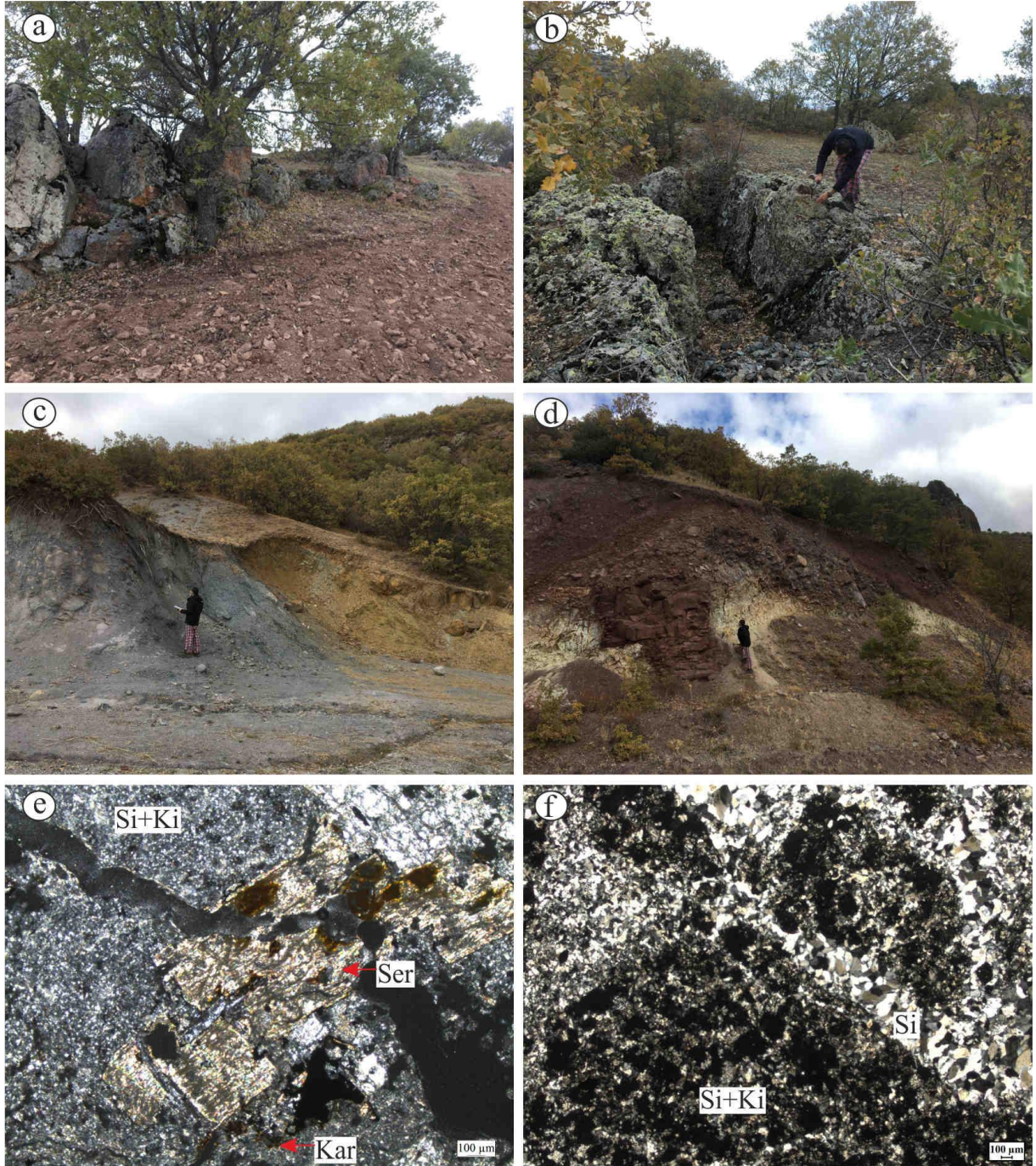
Çorum ili Türkiye'nin Kuzey-Orta kesiminde, farklı kıtasal blokların birleştiği bir bölge olan Orta-İç Karadeniz bölgesinde bulunmaktadır. İnceleme alanı yakın çevresinde Triyas-Kuvaterner yaş aralığında Devecidağ Karışığı (Triyas), Artova ofiyolitli karmaşığı (Geç Kretase) ve bunların her ikisini birden örten çökel ve magmatik kayalar (Eosen-Kuvaterner) bulunur. Bölgedeki örtü birimler Eosen yaşlı Alacahöyük ve Bayat Formasyonları ile başlayıp, Miyosen yaşlı Kızılırmak, Dodurga ve Bozkır formasyonları ile devam edip Kuvaterner yaşlı alüvyon ile sona erer (Şekil 2). Çalışma alanı yakın çevresinde gözlenen Bayat Formasyonu, çakıltası ile başlayıp sığ denizel sedimanlar ile devam eder ve üst seviyelerde volkanik-volkanoklastik katmanlar içerir. Bayat volkanitleri farklı evrelerde görülmekle birlikte inceleme alanı yakın çevresinde andezit -bazalt - bazaltik trakiandezit - trakiandezit ve trakiandezit-trakit türü kayalar yaygın olarak gözlenmektedir. Miyosen yaşlı Kızılırmak Formasyonu çakıltası, kumtaşı, silttaşı ve kiltası tabakalarından oluşmakta olup üzerine uyumlu olarak kil, marn, silttaşı ve kumtaşıdan oluşan Dodurga Formasyonu gelmektedir. Üst Miyosen yaşlı Bozkır formasyonu jips, oolitik kireçtaşı, kiltası, kumtaşı, marn ve tuzdan oluşmaktadır. Ayrıca inceleme alanında gabro, diyorit, granitporfir, ve aplitlerden oluşan Dededağ Granitoyiti ve kuvars damarları yüzeylenmektedir. Cevherleşmenin yakınında, bu birimlerin aşırı derecede altere volkanik kayaç, andezit-bazalt-trakit ve tüflerden oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2. Yerel Jeoloji Haritası (Sevin & Uğuz (2013)' den Değiştirilmiştir). Taralı Poligonlar Hidrotermal Alterasyon Alanlarını ve Damar Tipi Cevherleşmeleri Göstermektedir.

HİDROTERMAL ALTERASYON VE CEVHERLEŞME

Cevherleşmenin ilişkili olduğu silis damarları Şaphane köyünün güneydoğusunda KD-GB uzanımlı olarak yaklaşık 700 metreye kadarlık bir zonda küçük damarlar halinde yüzeyde mostra vermektedir (Kulaman 2022). Damarlar Bayat volkanitlerine ait birimlerin yüzeylediği alanlarda bulunur ve yüzeydeki kuvars damarları K20-40°D 10°K dalımlı konumdadır (Şekil 3a ve b). Kuvars damarlarına yakın bölgelerde yoğun hidrotermal alterasyonlar gözlenmektedir (Şekil 3c ve d). Altere kayalardan petrografik amaçlı hazırlanan ince kesitlerde gözlenen yoğun silisleşme, killeşme, serizitleşme ve karbonatlaşmalar ile az miktarlarda epidotlaşma ve kloritleşmeler bölgede ki hidrotermal alterasyonu temsil etmektedirler (Şekil 3e ve f). Kuşcu vd (2017) cevherleşme içeren silisli damarlar çevresinde altere kayalara ait örneklerde yaptıkları XRD analizlerinde kuvars, kaolinit, illit ve mika/illit gibi kil mineralleri tespit etmişlerdir (Kuşcu vd. 2017). Kuvars damarlarından hazırlanan parlatma bloklarında cevher minerali olarak pirit, hematit, limonit ve nabit altın gözlenirken gang minerali olarak ise kuvars ve kalsit tespit edilmiştir (Kulaman 2022).



Şekil 3. Arazi Çalışmalarından Görüntüler. A-B) Altın İçeren Silisli Damarlar, C) Volkaniklerde Kloritleşme, Karbonatlaşma, D) Silis İçeren Killeşme Zonları, E) Altere Volkanik Kayaca Ait Temsili İnce Kesit Görüntüsü, F) Silisli Damara Ait Temsili İnce Kesit Görünümü (Si: Silisleşme, Ki: Killeşme, Ser: Serizitleşme, Kar: Karbonatlaşma)

MATERYAL VE YÖNTEMLER

Görüntü

Çalışma kapsamında kullanılan 31 Ağustos 2006 tarihli bulutsuz ASTER L1T ve 3 Nisan 2017 tarihli Landsat-8 uydu görüntüleri Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmaları Kurumu'ndan (<http://earthexplorer.usgs.gov>) ücretsiz olarak temin edilmiştir. Bu uydu görüntülerinin tercih edilmesinin nedeni en düşük seviye de bulut içermesi ve en algındığı tarihlerde çalışma alanında insan yapıları ve madencilik faaliyetlerinin yok denecek kadar az olmasıdır.

ASTER L1T uydu görüntüleri ortorektifiye edilmiş ve L1B görüntülerinde gözlenen cross-talk hatası giderilmiş şekilde servis edilmektedir. Görüntülerin projeksiyonu, Dünya Jeodezi Sistemi 1984 verisinden Evrensel Enine Merkatör bölgesi 36N'dir.

Görüntü önileme

ASTER uydu görüntüsünün VNIR ve SWIR bantlarının radyansa değerlerine radyometrik kalibrasyonu yapılmış olup 30 m uzamsal çözünürlüğe yeniden örneklendirilmiştir. Görüntüdeki atmosferik etkiler, Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) atmosferik düzeltme algoritması ile giderilmiştir.

Pan-keskinleştirme

Çizgisellikler, faylar, kıvrımlar ve kırıklarla ilgili çizgi yapıları olarak tanımlanır. Damar tipi cevherleşmelerin tespiti için bir ipucu verebilirler. Pan-keskinleştirmenin birçok çalışmada çizgisellikleri tanımlamak, çıkarmak ve ayırmak için güçlü bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Yousefi vd. 2018; Rahaman vd. 2017; Hung vd. 2005). Bu bağlamda, Landsat-8 OLI uydu görüntüsünün multispektral bandları Gram-Schmidt pan-keskinleştirme algoritması (Maurer 2013) ile pankromatik bandı kullanılarak pankeskinleştirilmiş, PCI Geomatica yazılımında LINE modülü ile pankeskinleştirilmiş görüntüde otomatik çizgisellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir.

Bitki Alanı Maskeleyme

Görüntülerde bitki alanlarının maskelenmesi amacıyla, bitki alanları atmosferik olarak düzeltilmiş görüntüde Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ASTER 2 ve 3N bantları kullanılarak belirlenmiş, NDVI indisinde eşik değer 0,547 olarak uygulanmıştır.

Bant Oranlama, Spektral Mineral İndeks

Görüntü zenginleştirme yöntemlerinden biri olan bant oranlama, basit matematiksel hesaplamalara dayalı bir temele sahip olup hedef nesnenin anomalisini vurgulamak için kullanılmaktadır (Abrams vd. 1983). Bant oranlama yöntemi, litolojik birimleri, hidrotermal alterasyon ve değerli mineralleri tespit etmek için nesnelerin karakteristik soğurma ve yansıtma özelliklerinin spektral kontrastını göstermek için tasarlanmıştır (Gad & Kusky 2007; Okada & Ishii 1993). Bu yöntemin temeli, alterasyon haritalamasında yaygın olarak kullanılan spesifik absorpsiyon ve yansıma spektral özellikleri arasında kontrast oluşturmaktır (Di Tommaso & Rubinstein 2007). Ayırt edici absorpsiyon bandı özelliği, bant oranı görüntülerinde araştırılan alterasyon minerallerini vurgulamak için kullanılır. Muskovit ve kaolinit (Al-OH içeren mineraller) ASTER 5 ve 6 bantlarında absorpsiyon özelliği gösterir (Di Tommaso & Rubinstein 2007). Klorit, epidot ve/veya karbonat (Mg-OH içeren mineraller), ASTER bandı 8'deki absorpsiyon özelliği ile tespit edilebilir (Di Tommaso & Rubinstein 2007). OH içeren alterasyon mineral indeksi (OHI), kaolinit indeksi (KLI) ve kalsit indeksi (CLI) aşağıdaki oranlara göre hesaplanır (Ninomiya 2003):

$$OHI = (\text{Bant7}/\text{Bant6}) \times (\text{Bant4}/\text{Bant6}) \quad (1)$$

$$KLI = (\text{Bant4}/\text{Bant5}) \times (\text{Bant8}/\text{Bant6}) \quad (2)$$

$$CLI = (\text{Bant6}/\text{Bant8}) \times (\text{Bant9}/\text{Bant8}) \quad (3)$$

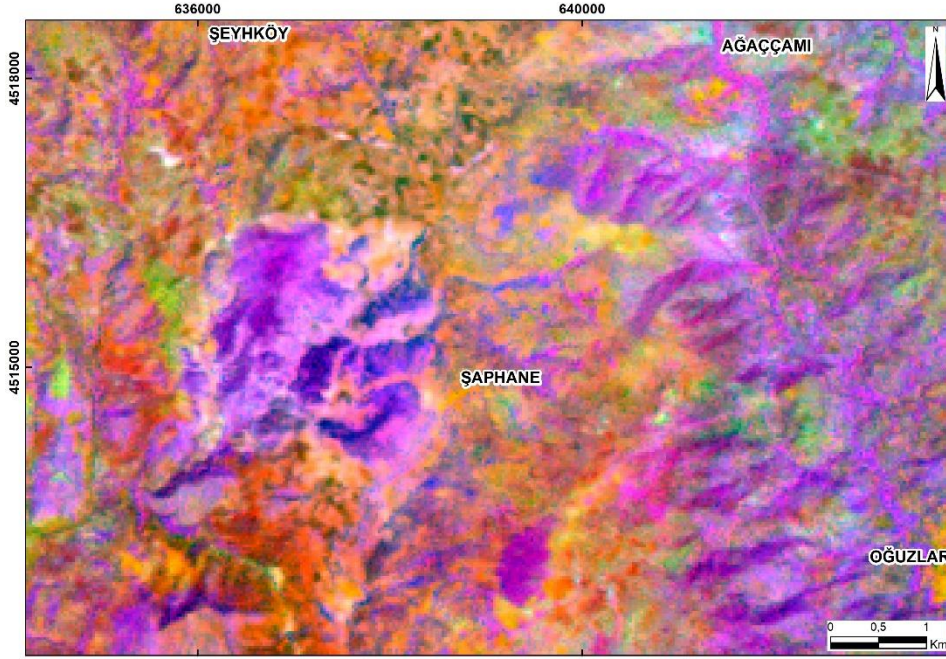
MNF Dönüşümü

MNF dönüşümü, eşleşen filtrelemeyi (MF) uygulamak için MTMF'nin bir girdi ürünüdür (Research Systems Inc ENVI Eğitimi 2003). Çok bantlı bir uydu görüntüsünde gürültüleri ayırt etmek ve sonraki işlemler için hesaplama gereksinimleri azaltmak amaçlı kullanılan bir dönüşüm aracıdır (Green vd. 1988). MNF dönüşümü iki aşamaya ayrılır. İlk aşamada, veride gürültüler ilişkilendirilemez ve yeniden ölçeklendirilir. İkinci aşamada ise temel bileşen analizi kullanılarak gürültülerle beyazlatılmış veriler türetilir. Dönüşüm sonucu verilere ait eigen değerleri (öz değer) 1'e yakın gürültü içermeyenler ve 1'den büyük gürültü içerenler olmak üzere iki grupta değerlendirilir (Green vd. 2003).

Çalışmada, MTMF analizi için gerekli olan minimum gürültü fraksiyonu (MNF) dönüşümü ASTER uydu verisinin VNIR ve SWIR olmak üzere 9 bandına uygulanmıştır. Dönüşüme ait analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. 1'e yakın eigen değerli bantlar çok fazla gürültü içerdiğinden KYM için kullanışlı görüntü elde edilemeyeceğinden eigen değeri 1'den büyük olan bantlar KYM görüntüsü üretiminde kullanılmıştır (Şekil 4).

Tablo 1. ASTER Uydu Görüntüsünün 9 Bandına Uygulanan MNF Dönüşüm Analiz Sonuçları.

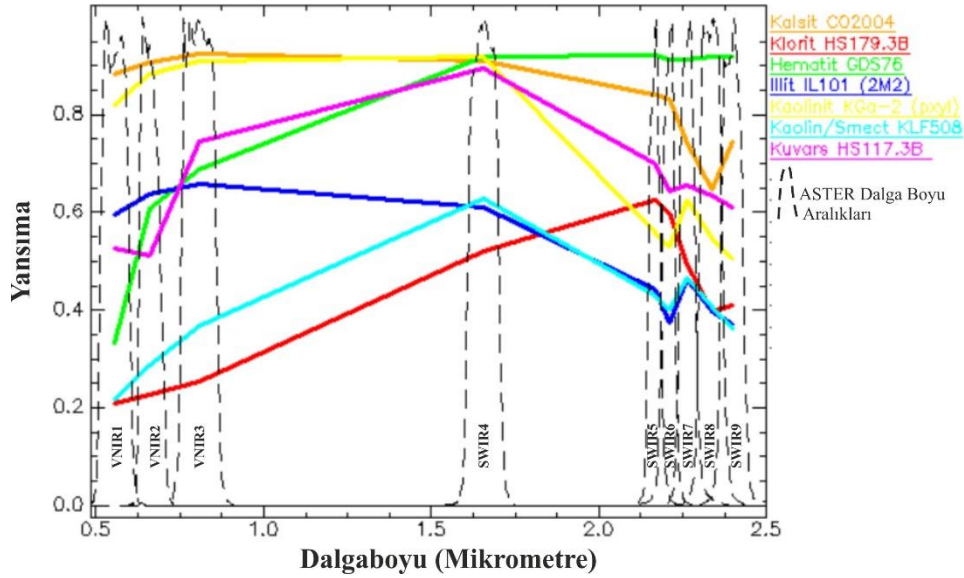
MNF	Eigen Değer	%
Bant 1	42,367	55,981
Bant 2	15,063	19,903
Bant 3	4,292	5,671
Bant 4	3,189	4,214
Bant 5	3,042	4,020
Bant 6	2,401	3,173
Bant 7	2,099	2,774
Bant 8	1,734	2,291
Bant 9	1,493	1,973



Şekil 4. MNF Bantlarından Üretilen KYM Renk Kombinasyon Görüntüsü (K:MNF 3, Y:MNF 1, M: MNF 2).

Spektral End-member Çıkarımı

Spektral sınıflandırma yönteminde end-member olarak kullanılmak üzere, jeolojik çalışmalarda hidrotermal alterasyon örnekleme noktalarının ASTER uydu görüntüsünde karşılık geldiği piksellere ait görüntü tabanlı spektral kütüphaneler elde edilmiştir. Belirlenen görüntü tabanlı spektral kütüphaneler, ENVI yazılımında yer alan spektral analiz aracı kullanılarak Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) mineral kütüphanesi ile karşılaştırılarak temsil ettikleri (kalsit, klorit, hematit, illit, kaolinit, kaolinit/smektit ve kuvars mineraller belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. ASTER Uydu Verisinden Hidrotermal Alterasyon Minerallerine Ait Elde Edilen End-Memberlar.

Spektral Sınıflandırma

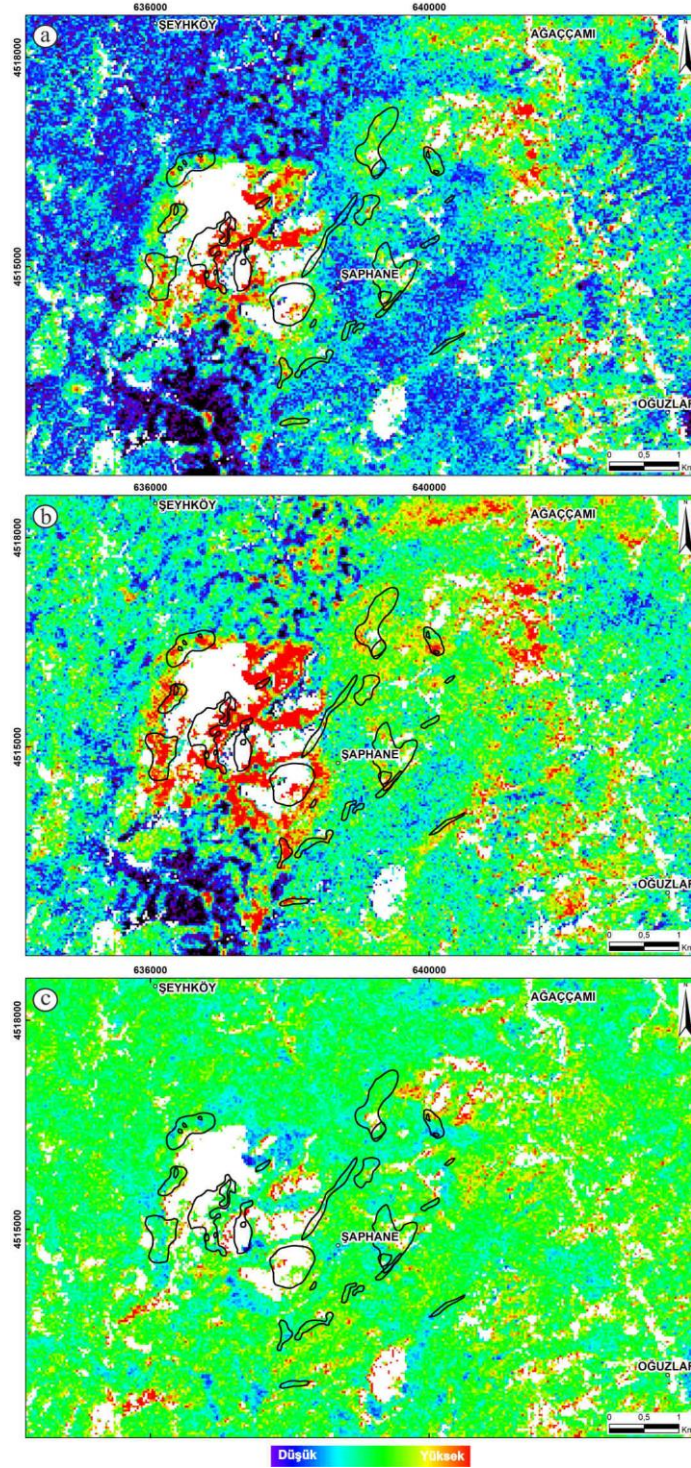
Alterasyon minerallerinin haritalanmasında MTMF'nin önemi birçok araştırmada rapor edilmiştir (Adiri vd. 2020; Hosseinjani Zadeh vd. 2014; Pour & Hashim 2012; Agar & Coulter 2007; Kruse vd. 2003; Cudahy vd. 2001). MTMF, bilinen bir end-memberın yanıtını vurgularken bilinmeyen arka planı bastıran kısmi bir alt piksel yöntemidir (Hosseinjani Zadeh vd. 2014; Research Systems Inc ENVI Eğitimi 2003). Görüntüde spektrum karşılaştırması yaparak (Adiri vd. 2020) arka planı ortadan kaldırırken belirli bir mineralin bolluğunu ise vurgular (Stocker vd. 1990; Chen & Reed 1987;). MTMF'nin önemli avantajı, hedef materyal dışında görüntüdeki diğer bileşenlerin spektral imzalarının bilgisine ihtiyaç duymamasıdır (Mitchell & Glenn 2009).

Hidrotermal alterasyon minerallerine ait elde edilen spektral end-memberların eğitim verisi olarak kullanıldığı karışım ayarlı eşleşen filtreleme (MTMF) eğitilmiş spektral sınıflandırma yöntemi ile inceleme alanı hidrotermal alterasyon mineral haritalaması gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Band Oranlama, Spektral Mineral İndeksi

Alterasyon mineral indekslerine göre uygulanan bant oranlarının sonuçları Şekil 6' da gösterilmektedir. Klorit, epidot ve/veya karbonat gibi Mg-OH içeren mineraller için önerilen OHI indeksi sonuçlarında, Kuşcu vd. (2017)' e göre belirlenen alterasyon alanlarının yanı sıra volkanikler üzerinde farklı lokasyonlarda bu alterasyon grubunun yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 6a). Kaolinit indeksi olarak tanımlanan KLI bant oranlamasına göre, killeşme alanları olarak belirlenen poligonlar ile birebir uyumlu olup yeni killeşme alanlarını da ortaya çıkarmıştır (Şekil 6b). KLI indeksi bu çalışmada, OHI indeksine ait alanları da içine aldığı için bölgenin değerlendirilmesi sırasında her iki indekste dikkate alınmalı ve bu farklı alterasyonlar birbirinden ayırılmalıdır. CLI indeksi ile OHI indeksi içindeki karbonatlı alanların epidot ve klorit grubu minerallerden ayırılmasında kullanılacak kullanışlı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Şekil 6c).

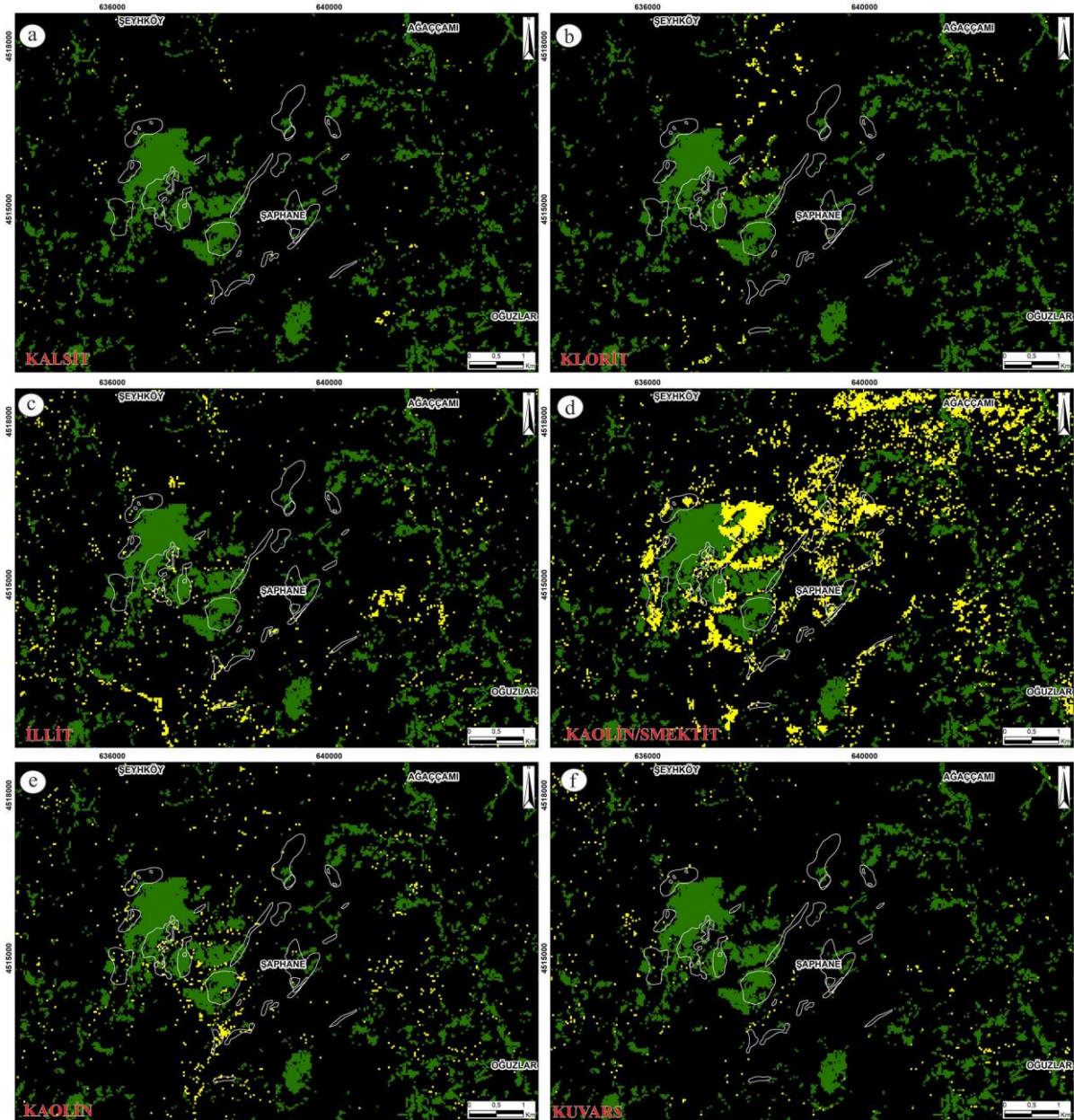


Şekil 6. Alterasyon Mineral İndeksleri. A) OH İÇEREN Alterasyon Mineral İndeksi (OHI), B) Kaolinit İndeksi (KLI) Ve C) Kalsit İndeksi (CLI). Siyah Poligonlar Alterasyonları Göstermektedir. Beyaz Pikseller Bitki Örtüsünü Göstermektedir.

Karışım Ayarlı Eşlenen Filtreleme (MTMF)

MNF görüntüsünde alterasyon alanları turuncu renklere ortaya çıkmaktadır. Morumsu renkli alanlar ise bitki örtüsünü göstermektedir (Şekil 7). Görüntü tabanlı end-memberlar kullanılarak MTMF spektral sınıflandırma yöntemi uygulanmıştır. Spektral kütüphanelerin temsil ettiği alterasyon alanlarının belirlenmesi için MF skor görüntülerinde manuel eşikleme yöntemi uygulanarak alterasyonların karşılık geldiği pikseller belirlenmiştir. Bu çalışmada, saha gözlemlerine ve jeolojik haritaya göre en iyi doğruluk 0,036 (Kalsit), 0,040 (klorit), 0,069 (illit), 0,052 (kaolinit), 0,107 (kaolinit-smektit) ve 0,062 (kuvars) eşiklerinde ortaya çıkmıştır (Şekil 7).

MF skor görüntülerinde, 116 piksel kalsit, 185 piksel klorit, 561 piksel illit, 486 piksel kaolinit, 1986 piksel kaolinit/smektit ve 399 piksel kuvars tanımlanmıştır. Kalsit dağılımları, alterasyon alanlarında 1 veya 2 adet piksel olarak ortaya çıkmaktadır. Bunların dışında volkanik kayalar içerisinde dağılım sergilememektedirler. Bunun nedeni olarak volkanik kayaların bünyesinde yer alan fenokristal plajiyoklaz kristallerinin yüzey koşullarında kolay altere olmalarından kaynakladığı ve karbonatlaşma göstermesi nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir (Şekil 7a). Klorit pikselleri geniş bir hat boyunca alterasyon alanlarının uzun eksenleri ile aynı doğrultuda dağılım göstermektedir. Volkanik kayaların mafik mineral içeriğine bağlı olarak klorit dağılımının genele yayılması beklenir. Ancak, burada klorit piksellerinin dağılımı yaklaşık KD-GB doğrultulu (kuvars damarlarının doğrultusu) olması hidrotermal bir alterasyon sonucu geliştiği kanısını güçlendirmektedir (Şekil 7b). İllit pikselleri alterasyon alanları içerisinde görünse de geneli alterasyon sınırları dışında ortaya çıkmaktadır. Eosen volkanizması ürünleri tüflü seviyeler barındırması ve bu seviyelerin yüzeysel bozunmalara bağlı olarak kolay altere olması nedeniyle bu alanlarda illitik kil oluşumları ortaya çıkabilir. Ancak, bu durum bu alanların cevher içermeyeceği anlamına gelmemelidir. Eosen volkanizmasının tüf ürünleri çoğunlukla pirit kristalleri içerebilmektedir (Canbaz vd., 2020) (Şekil 7c). Kaolinit ve kaolinit/smektit piksel dağılımları alterasyon alanları ile uyumlu olup yeni killeşme alanları içinde kullanışlı bilgiler ortaya koymaktadır (Şekil 7d ve e). İnceleme alanında kuvars içeren alanların yüzey genişlikleri çok fazla gözlenmese de killeşme ve silisleşme gösteren alanlarda kuvars piksellerinin cevherleşmelerle aynı doğrultularda ortaya çıktığı gözlenmektedir.

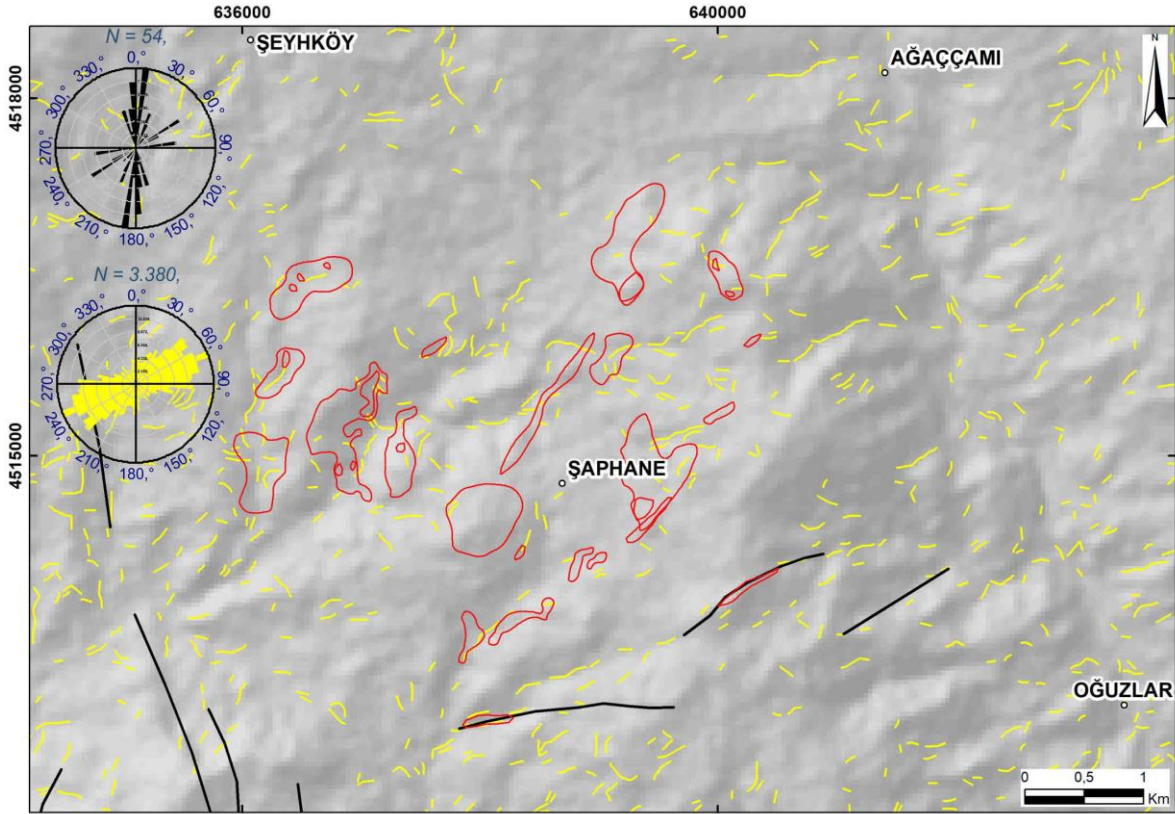


Şekil 7. MTMF Skor Görüntüleri. Yeşil Renkli Pikseller Bitki Örtüsünü Göstermektedir.

Çizgisellik Analizi

Çalışma alanında tespit edilen ve altın cevherleşmesine ev sahipliği yapan silisce zengin damarların genişlikleri genellikle uydu verisinin yersel çözünürlüğünden küçük olması nedeniyle çizgiselliklerin tespiti için yüksek çözünürlüklü (15 m) pan-keskinleştirilmiş görüntüden yararlanılmıştır. Görüntü, Landsat-8 OLI uydu verisinin yüksek çözünürlüklü pankromatik (15 m) bandı ile ASTER uydu verisinin düşük çözünürlüklü SWIR bantlarının (30 m) yazılım aracılığıyla Gram-Schmidt algoritması uygulanarak elde edilmiştir.

Çalışma alanındaki mevcut faylar jeoloji haritasından alınmıştır. Çizgisellik analizinden elde edilen veriler Şekil 8'de gösterilmektedir. Çizgisellikler KD-GB, D-B, K-G ve KB-GD olmak üzere dört doğrultuda gruplanmıştır. Sonuçlar çalışma alanına ait jeoloji haritasında belirlenmiş fayların doğrultularına uyumluluk göstermektedirler (Şekil 8). KD-GB doğrultulu çizgisellikler bölgedeki baskın doğrultuları oluşturmakta olup cevherleşme içeren silis damarlarıyla aynı doğrultulara sahiptirler.

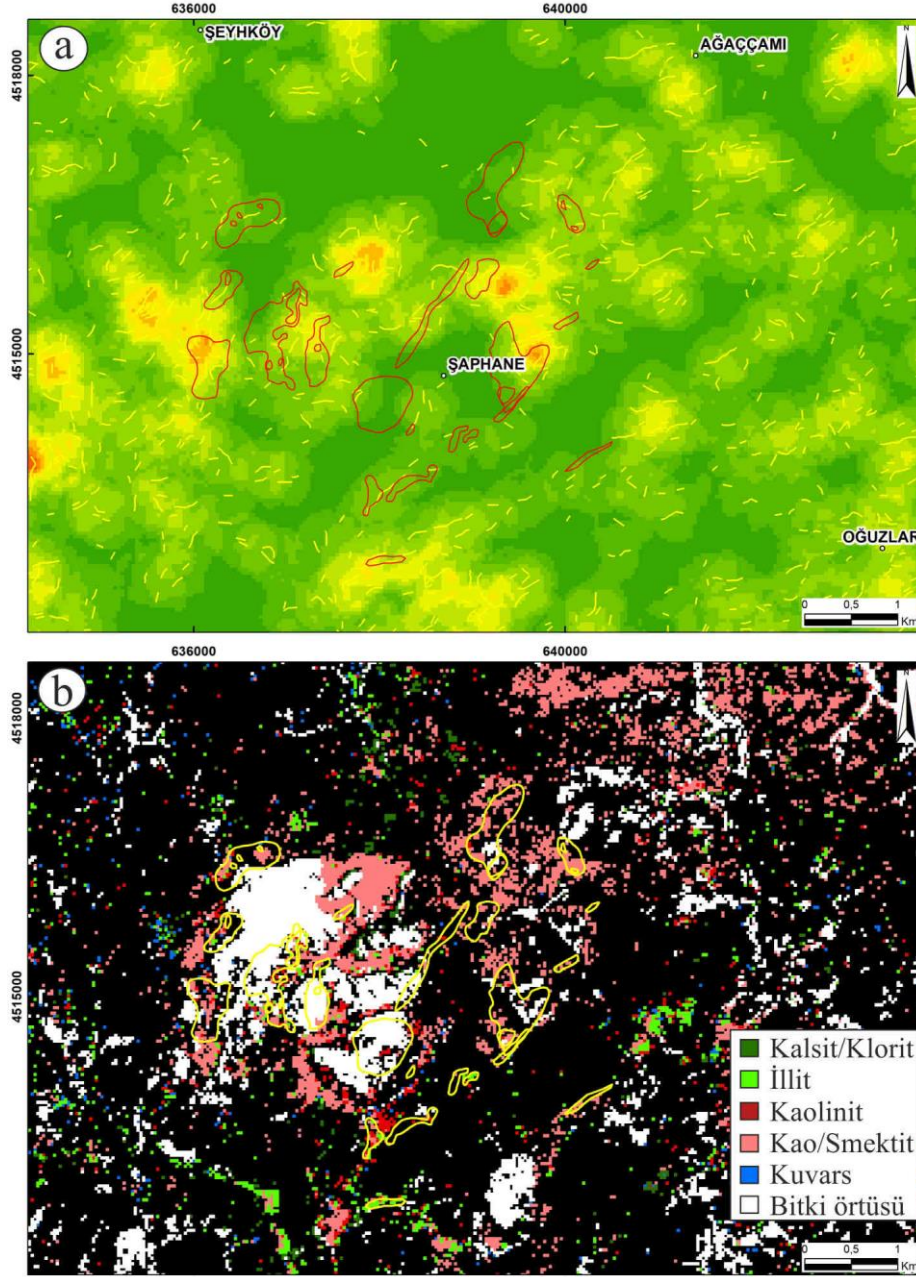


Şekil 8. İnceleme Alanına Ait Otomatik Üretilen Çizgisellikler ve Gül Diyagramları.

Alterasyon ve Çizgisellik Değerlendirme

Çizgiselliklere ait yoğunluk haritası ve spektral sınıflandırmadan elde edilen hidrotermal alterasyon mineral haritaları Şekil 9'da gösterilmektedir. Alterasyon alanlarının, çizgiselliklerin yoğunlaştığı alanlarda birlikte gözlenmesi bu bölgelerde hidrotermal çözelti faaliyetlerinin olduğuna işaret etmektedir. Bunlara ek olarak, mineral haritasında kil minerallerinden kaolinit ve kaolinit/smektit kil minerallerine ait piksellerin, hem çizgiselliklerin yoğunlaştığı hem de alterasyon alanları ile örtüşmesi çalışmanın doğruluğunu ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca, mevcut alterasyon alanları ve arazi çalışmaları ile uydu görüntülerinden elde edilen verilerin %84,8 genel doğruluk ve 0,836 kappa katsayısı ile yüksek oranda uyumlu olduğu görülmektedir.

Sahannın engebeli topografyaya ve ulaşılması zor alanlara sahip olması bölgede ki çalışmaları zorlaştırmaktadır. Buna rağmen, mevcut saha çalışmalarında belirlenen cevherleşme alanlarına ilaveten bu çalışmada yeni cevherleşmelerin tespiti için hedef alanları ortaya çıkarılmıştır. Bunun için özellikle KD-GB doğrultulu çizgiselliklerin ve kil türü minerallerin yoğunlaştığı alanları haritalar üzerinden belirlemek yeterli olacaktır.



Şekil 9. a) Çizgiselliklere Ait Yoğunluk Haritası, B) MTMF Analizi Sonucu Hidrotermal Alterasyon Mineral Haritası.

SONUÇLAR

Bu çalışma, uzaktan algılama yöntemleri ile hidrotermal bir altın sahasında meydana gelen hidrotermal alterasyonların tespiti amacıyla gerçekleştirilmiştir. Hidrotermal alterasyon sınırları içeren mevcut jeoloji haritası, arazi ve laboratuvar çalışmaları verileri ile bütünleşik ASTER ve Landsat-8 uydu görüntü işleme analizleri birlikte değerlendirilmiş olup yeni hedef sahalara için sonuçlar test edilmiştir. Çalışmada, ASTER uydu verisine ait alterasyon minerallerine yönelik bant oranları, spektral mineral indeksler ile MTMF spektral sınıflandırma yöntemi uygulanarak hidrotermal alterasyon minerallerinin dağılımları ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, Landsat-8 pankromatik ve ASTER SWIR bantlarından elde edilen 15m çözünürlüğe sahip pan-keskinleştirilmiş görüntüde otomatik çizgisellik analizi uygulanarak bölgede ki çizgiselliklerin haritası çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, mineral haritasının %84,8 genel doğruluk ve 0,836 kappa katsayısı ile yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada elde edilen verilerin engebeli topografyaya sahip ve ulaşılması güç alanlarda yüzlek veren volkanik kayalarda altın cevherleşmelerinin tespiti için hedef sahaların belirlenmesinde kullanışlı veriler sunacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrams, M.J., Brown, D., Lepley, L., & Sadowski, R. (1983). Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. *Economic Geology* 78:591–604. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.4.591>
- Abubakar, A.J., Hashim, M., & Pour, A.B. (2018). Identification of hydrothermal alteration minerals associated with geothermal system using ASTER and Hyperion satellite data: a case study from Yankari Park, NE Nigeria. *Geocarto International*
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., & Bachaoui, E.M. (2020). Mapping copper mineralization using EO-1 Hyperion data fusion with Landsat 8 OLI and Sentinel-2A in Moroccan Anti-Atlas. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1544287>
- Agar, B., & Coulter, D. (2007). Remote sensing for mineral exploration – a decade perspective 1997–2007. In: *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. pp 109–136
- Akçay A.E, Dönmez M, Kara H., Yergök, H.F., & Esentürk, K. (2008). 1/100.000 Ölçekli Türkiye jeoloji haritaları, Kırşehir İ-34 paftası, No: 81. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara
- Alimohammadi, M., Alirezaei, S., & Kontak, D.J. (2015). Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo-Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.010>
- Alpaslan, M. (2000). Pazarçık Volkanitinin (Yıldızeli - Sivas) mineralojik petrografik ve jeokimyasal özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 43:49–60
- Alpaslan, M., & Terzioğlu, N. (1998). Pontidlerde çarpışma sonrası volkanizmaya bir örnek: Sürmeli Volkaniti (Taşova-Amasya). *Cumhuriyet Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi* 15:13–20
- Bozkaya, G., Gökce, A., & Efe, A., (1996). Gümüşhacıköy (Amasya) Pb-Zn-Ag yataklarının jeolojisi. *Cumhuriyet Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi* 73–89
- Büyükonal, G., (1985). Yozgat yöresi volkanitlerinin asal ve iz elementlerinin dağılımı. *Maden Tetkik Arama Dergisi* 105:97–111
- Canbaz, O., Gökce, A., Ekici, T., & Yılmaz, H. (2020). Geochemical characteristics of the Eocene Karataş volcanics (Northeast Sivas, Turkey) in the İzmir-Ankara-Erzincan Suture Zone. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 162:55–74
- Canbaz, O., Gürsoy, Ö., & Gökce, A. (2018). Detecting clay minerals in hydrothermal alteration areas with integration of ASTER image and spectral data in Kösedag-Zara (Sivas), Turkey. *Journal of the Geological Society of India*. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-0882-1>
- Canbaz, O., Gürsoy, Ö., & Gökçe, A. (2017). Determination of hydrothermal alteration areas by ASTER satellite images: Ağmaşat Plato- Zara (Sivas) / Turkey Sample. *Cumhuriyet Science Journal* 38:419–426
- Chen, J.Y., & Reed, I.S. (1987). A detection algorithm for optical targets in clutter. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*
- Çörtük, R.M., Çelik, Ö.F., Alkan A, Mutlu, Ö., & Özyavaş, A. (2020). Distribution of rocks in Pınarbaşı Ophiolite from central Anatolia (Turkey) based on analysis of ASTER and Landsat-8 data. *Geological Journal*. <https://doi.org/10.1002/gj.3844>
- Cudahy, T.J., Hewson, R., Huntington, J.F., Quigley, M. A., & Barry, P. S. (2001). The performance of the satellite-borne hyperion hyperspectral VNIR-SWIR imaging system for mineral mapping at Mount Fitton, South Australia. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*
- Demiryürek, E. (2006). Soğucak (İskilip-Çorum) Cu-Pb-Zn cevherleşmeleri ve kökeni. *Yüksek Lisans Tezi*, 1-97, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Di Tommaso, I., & Rubinstein, N. (2007). Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
- El-Wahed, M.A., Zoheir, B., Pour, A.B., & Kamh, S. (2021). Shear-related gold ores in the wadi hodein shear belt, south eastern desert of Egypt: Analysis of remote sensing, field and structural data. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min11050474>

- Eslami, A., Ghaderi, M., Rajedran, S., Pour, A., Beiranvand., Hashim, M. (2016). Integration of ASTER and Landsat TM remote sensing data for chromite prospecting and lithological mapping in Neyriz Ophiolite Zone, South Iran. *Resource Geology* (2015) 65, 375-388. DOI: 10.1111/rge.12076. *Resource Geology*
- Gad, S., & Kusky, T. (2007) ASTER Spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian-Nubian Shield, the Neoproterozoic Wadi Kid Area, Sinai, Egypt. *Gondwana Research*. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.02.010>
- Göçmengil, G., Karacik, Z., Genç, C., & Billor, M.Z. (2018). 40Ar-39Ar geochronology and petrogenesis of postcollisional trachytic volcanism along the İzmir-Ankara-Erzincan Suture Zone (NE, Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences* 27:1-31. <https://doi.org/10.3906/yer-1708-4>
- Gökce, A., & Bozkaya, G. (1998). Gümüşhacıköy (Amasya) Pb-Zn yatakları çevresinde derekumu örnekleri jeokimyası incelemeleri. *Geosound* 33:75-90
- Görür, N., & Şengör, A.M.C. (1986). İç Anadolu havzalarının jeolojisi, Tübitak, Türkiye Birinci Jeotravers Projesi, 1. Workshop, Gebze.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M.D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/36.3001>
- Green, R.O., Pavri, B.E., Chrien, T.G. (2003). On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 hyperion derived with an underflight of AVIRIS and In situ measurements at Salar de Arizaro, Argentina. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813204>
- Honarmand, M., Ranjbar, H., & Shahabpour, J. (2013). Combined use of ASTER and ALI data for hydrothermal alteration mapping in the northwestern part of the Kerman magmatic arc, Iran. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.731540>
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Roldan, F.V., Yusta, I. (2014). Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.029>
- Hung, L.Q., Batelaan, O., & De Smedt, F. (2005). Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. In: *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V*
- Karaman, M. (2021). Grafit cevherleşmelerinin Sentinel-2 uydu görüntülerinden belirlenmesinde en uygun bant kombinasyonları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 25:749-757
- Kavak, K.S. (2005). Determination of palaeotectonic and neotectonic features around the Menderes Massif and the Gediz Graben (Western Turkey) using Landsat TM image. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431160410001709994>
- Keskin, M., Genç, Ş.C., & Tüysüz, O. (2008). Petrology and geochemistry of post-collisional Middle Eocene volcanic units in North-Central Turkey: Evidence for magma generation by slab breakoff following the closure of the Northern Neotethys Ocean. *Lithos* 104:267-305. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.12.011>
- Koçbulut, F., Yılmaz Şahin, S., & Tatar, O. (2001). Akdağmadeni (Yozgat)- Yıldızeli (Sivas) arasındaki Kaletepe volkanitinin mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelenmesi. *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi* 14:77-91
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., & Huntington, J.F. (2003). Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.812908>
- Kulaman, Ç. (2022). Şaphane (Oğuzlar-Çorum) Au cevherleşmesinde sıvı kapanım incelemeleri. Yüksek Lisans Tezi. Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- Kuşcu, E., & Genç, Y. (1999). Başnayayla (Yozgat) molibden-bakır cevherleşmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 42:115-134
- Kuşcu, E., Urkan, V., & Çelik, Y. (2017). Şaphane (Eskiköy)-Çiğdemlik (Oğuzlar-Çorum) ruhsatının maden jeolojisi. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni* 24:21-26
- Maurer, T. (2013). How To pan-sharpen images using the Gram-Schmidt Pan-Sharpener method – A Recipe. *The*

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w1-239-2013>
- Mitchell, J.J., & Glenn, N.F. (2009). Subpixel abundance estimates in mixture-tuned matched filtering classifications of leafy spurge (*Euphorbia esula* L.). *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431160902810620>
- Ninomiya, Y. (2003). A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR Data. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*
- Okada, K., & Ishii, M. (1993). ASTER spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt. In: *International Geosciences and Remote Sensing Symposium “Better Understanding of Earth Environment”*. p Vol. 93, 126-128
- Özkan, M., Çelik, Ö.F., & Özyavaş, A. (2018). Lithological discrimination of accretionary complex (Sivas, northern Turkey) using novel hybrid color composites and field data. *Journal of African Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.009>
- Pour, A.B., & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*
- Pour, A.B., & Hashim, M. (2011). Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.07.017>
- Rahaman, K.R., Hassan, Q.K., & Ahmed, M.R. (2017). Pan-sharpening of landsat-8 images and its application in calculating vegetation greenness and canopy water contents. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. <https://doi.org/10.3390/ijgi6060168>
- Rajendran, S., & Nasir, S. (2019). Mapping of hydrothermal alteration in the upper mantle-lower crust transition zone of the Tayin Massif, Sultanate of Oman using remote sensing technique. *Journal of African Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.10.001>
- Sevin, M., & Uğuz, M.F. (2013). 1/100.000 Ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları serisi, Çorum G-33 Paftası, No:183 Maden Tetkik Arama, Ankara
- Stocker, A., Reed, I.S., & Yu, X. (1990). Multidimensional signal processing for electrooptical target detection. In: *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, V. p 1305
- Suzen, M.L., & Toprak, V. (1998). Filtering of satellite images in geological lineament analyses: An application to a fault zone in Central Turkey. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/014311698215621>
- Tangestani, M.H., Jaffari, L., Vincent, R.K., Sridhar, B.B.M. (2011). Spectral characterization and ASTER-based lithological mapping of an ophiolite complex: A case study from Neyriz ophiolite, SW Iran. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.023>
- Tözün, K.A., & Özyavaş, A. (2020). New logical operator algorithms for mapping of hydrothermally altered rocks using ASTER data: A case study from central Turkey. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103533>
- Traore, M., Çan T., & Tekin, S. (2020). discrimination of iron deposits using feature oriented principal component selection and band ratio methods: Eastern Taurus /Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. <https://doi.org/10.30897/ijgeo.673143>
- Tüysüz, O., & Dellaloğlu, A.A. (1992). Çankırı havzasının tektonik birlikleri ve havzanın tektonik evrimi. In: *Proceedings of 9th Turkish Petroleum Congress Turkey, Ankara. Turkish Association of Petroleum Geologists*. pp 333–349
- Vural, A., Akpınar, İ., & Sipahi, F. (2021). Mineralogical and chemical characteristics of clay areas, Gümüşhane Region (NE Turkey), and their detection using the Crósta Technique with Landsat 7 and 8 Images. *Natural Resources Research*. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09912-7>
- Yalçın, C. (2018). Gökçedoğan (Kargı-Çorum) Cu Zn cevherleşmesinin jeolojisi ve oluşumu. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 301s

Yalçın, C., Hanılçı, N., Kumral, M., & Kaya, M. (2022). Formation and tectonic evolution of structural slices in Eastern Kargi Massif (Çorum, Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration (Early view)*

Yang, M., Ren, G., Han, L., Yi, H., & Gao, T. (2018). Detection of Pb – Zn mineralization zones in west Kunlun using Landsat 8 and ASTER remote sensing data. *Journal of Applied Remote Sensing* 12 (2): <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.026018>.

Yılmaz, A., Uysal, Ş., Bedi, Y., Ağan, A., Göç, D., & Aydın, N. (1997). 1/100000 ölçekli açın-sama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, Sivas-F23 Paftası. MTA Jeolojik Etüdler Dairesi Derlemesi

Yılmaz, A., Uysal, Ş., Yusufoglu, Ağan, A. İnal, A., Aydın, N., Bedi, Y., Havzoğlu, T., Göç, D., İnal, E., & Erkan, E.N.H. (1994). Akdağmasifi (Sivas) dolayının jeolojik incelemesi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara

Yılmaz, Y., & Tüysüz, O. (1984). Kastamonu-Boyabat Vezirköprü-Tosya arasındaki bölgenin jeolojisi (İlgaz-Kargi-masiflerinin etüdü). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara

Yousefi, T., Aliyari, F., Abedini, A., & Calagari, A.A. (2018). Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.05.2022
Kabul Tarihi : 11.08.2022

Received Date : 07.05.2022
Accepted Date : 11.08.2022

MEKANSAL PİRAMİT HAVUZLAMA TABANLI EVRİŞİMLİ SİNİR AĞI İLE OTOMATİK DRONE SINIFLANDIRMA

AUTOMATED DRONE CLASSIFICATION WITH A SPATIAL PYRAMID POOLING-BASED CONVENTIONAL NEURAL NETWORK

Deniz KORKMAZ¹* (ORCID: 0000-0002-5159-0659)
Hakan AÇIKGÖZ² (ORCID: 0000-0002-6432-7243)

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

² Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Deniz KORKMAZ, deniz.korkmaz@ozal.edu.tr

ÖZET

Hava sahalarının önemli olduğu bölgelerde dronları tespit etmek zorlu bir konu haline gelmiştir. Bu insansız hava araçlarının kontrolsüz uçuşları ve konuşlanmaları da istenmeyen bölgelerde çeşitli güvenlik sorunlarına sebep olur. Bu çalışmada, dronları kuşlardan ayırarak etkili bir şekilde sınıflandırabilmek için bir evrişimli sinir ağı (ESA) modeli önerilmiştir. Önerilen model, ön eğitilmiş AlexNet ile mekansal piramit havuzlama (MPH) yapısı kullanılarak tasarlanmıştır. Böylece, ağı evrişimsel katmanlarından gelen yerel özellikler birleştirilerek ağı nesne özelliklerini daha kapsamlı bir şekilde öğrenmesi sağlanmış ve önerilen modelin sınıflandırma performansı artırılmıştır. Ayrıca, eğitim görüntülerinde çevrimdışı veri artırma tekniği uygulanarak örnek sayısı artırılmıştır. Önerilen yöntemin performansı AlexNet, ShuffleNet, GoogLeNet ve DarkNet gibi sıklıkla kullanılan ön eğitilmiş ESA mimarileri ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda önerilen yöntemin doğruluk, kesinlik, duyarlılık, özgüllük ve F1-skor değerleri sırasıyla %98.89, %97.83, %100, %97.78 ve %98.90 olarak elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde, önerilen yöntemin farklı ortamlara ait drone görüntülerini kuşlardan ayırarak başarıyı yüksek bir şekilde sınıflayabildiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Drone sınıflandırma, evrişimli sinir ağları, mekansal piramit havuzlama, derin öğrenme

ABSTRACT

Detecting drones in areas with important airspace has become a challenging issue. Uncontrolled flights and deployments of these unmanned aerial vehicles also cause various security problems in undesirable areas. In this study, a convolutional neural network (CNN) model is proposed to effectively classify drones by distinguishing them from birds. The proposed model is designed using a spatial pyramid pooling (SPP) structure with pre-trained AlexNet. Therefore, by combining the local features from the convolutional layers, the network is enabled to learn the object properties more comprehensively and the classification performance of the proposed model is increased. In addition, the number of samples is increased by applying the offline data augmentation technique to the training images. The performance of the proposed method is compared with frequently used pre-trained CNN architectures such as AlexNet, ShuffleNet, GoogLeNet, and DarkNet. In the experimental studies, the accuracy, precision, sensitivity, specificity, and F1-score values of the proposed method are obtained as 98.89%, 97.83%, 100%, 97.78%, and 98.90%, respectively. When all obtained results are examined, it is revealed that the proposed method can classify drone images and birds in different environments with high performance.

Keywords: Drone classification, convolutional neural networks, spatial pyramid pooling, deep learning

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, havacılık sektöründe birçok olumlu gelişmenin yaşanmasına sebep olmuş ve farklı amaçlarda kullanılmak üzere çeşitli insansız hava araçları (İHA) üretilmeye başlanmıştır. Drone olarak adlandırılan küçük boyutlu İHA'lar gelişmiş elektronik, kontrol ve iletişim teknolojileri ile donatılmaktadır. Bu teknolojilerin sağladığı haberleşme yetenekleri ile dronlar çeşitli alanlarda ilerlemeyi de beraberinde getirmeye başlamıştır (Uddin vd., 2020). Dronlar genel olarak sinematografi, çiftçilik, gözetleme, denetim ve eğlence alanlarında sıklıkla kullanılırken son zamanlarda afet ve ilkyardım gerektiren durumlarda gözetleme ile askeri alanlarda da kullanılmaktadır (Basak vd., 2022; Lykou vd., 2020; Hassanalıan & Abdelkefi, 2017). Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün (SHGM) 2020 verilerine göre, ülkemizde kayıtlı olan drone sayısı 39 bini geçmiş iken Amerika Federal Havacılık İdaresi'nin 2021 kayıtlarına göre ABD'de 368 binden fazla insansız uçak sistemi veya drone bulunmaktadır (Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, 2022; Singha & Aydın, 2021). Bu veriler, drone endüstrisinin ülkemizde ve dünyada hızla geliştiğini ve drone sistemlerinin daha erişilebilir bir hal aldığı göstermektedir.

Dronların çok çeşitli uygulama alanları olmasına rağmen, kontrolsüz uçuşları ve konuşlanmaları ciddi güvenlik sorunlarına neden olabilir (Kim vd., 2021; Uddin vd., 2020). Dronların, nispeten yavaş hızları ve düşük uçuş irtifaları nedeniyle tespit edilmesi güçtür. Alçak irtifa gözetleme radarları, uzun menzilli İHA'ları izlemek için uygun bir teknik çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu radarlar, yavaş hareket eden hedefler için gerekli olan yüksek hassasiyeti sağlayabilir ve yenileme hızının etkin bir şekilde bekleme süresi tarafından ayarlandığı durumlarda, sürekli veri sağlama ve tüm hava koşullarında operasyonel işlevsellik gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel hedeflerin aksine, dronlar küçük boyutludur ve metalik olmayan malzemelerden yapılabilir. Bu durumda, küçük radar kesit değerleri oluşur ve düşük uçuş irtifaları nedeniyle çok düşük radar algılanabilirliği meydana gelir. Ayrıca yüksek duyarlılığın bir sonucu olarak, düşük radar kesitleri diğer yavaş hareket eden hedeflerin algılanmasına sebep olur. Dronlara en yakın radar benzerliklerini ise kuşlar göstermektedir. Dronların ve kuşların radar kesitleri arasındaki bu benzerlik, kuşların genellikle drone gözetim perspektifinden kafa karıştırıcı bir hedef olarak görülmesi anlamına gelir (Dale vd., 2022; Liu vd., 2021; Coluccia vd., 2020). Böylece, kuşlar dronlara ek olarak başlıca düşük hızlı ve küçük boyutlu benzer hedefler haline gelir. Konumsal karmaşa, sinyal yansıma etkileri ve yağışlardan kaynaklanan parazitler de, drone hedeflerini kuşlardan ayırarak belirlenmesindeki zorluğu arttırmaktadır (Liu vd., 2021). Bu nedenle, dronların ve kuşların statik ve dinamik dağınıklık gibi çevresel faktörler arasında etkili ve otomatik bir gözetleme sistemi ile tespiti ve sınıflandırılması önemli bir konu haline gelmiştir (Wojtanowski vd., 2021; Zhang vd., 2020; Taha & Shoufan, 2019).

Literatürde, dronların tespit edilmesi ve sınıflandırılması üzerine yapılan çalışmalar son zamanlarda ivme kazanmaya başlamıştır. Anwar ve ark. (2019) gürültülü bir ortamda kuşlar, uçaklar ve gök gürültülü fırtınalar gibi çeşitli ses sinyallerinden amatör drone sinyallerinin tespiti ve sınıflandırılması için bir makine öğrenme yaklaşımı sunmuşlardır. Sınıflandırıcı olarak DVM yöntemi kullanılmış ve %96.70 doğruluk elde edilmiştir. Uddin ve ark. (2020) akustik sinyaller yardımıyla kuşların, uçakların, gök gürültülü fırtınaların, yağmurun, rüzgârın ve İHA'ların seslerini tespit etmek için bağımsız bileşen analizini ile verimli bir denetimsiz makine öğrenimi yaklaşımı geliştirmişlerdir. Yöntemde, Mel Frekans Cepstral katsayıları, güç spektral yoğunluğu ve güç spektrum analizi ile ortalama kare değeri gibi öznitelikler çıkartılmıştır. Zhang ve ark. (2020) ise tüm hava şartlarında daha iyi sonuçlar elde etmek için klasik etkileşimli çoklu model izleme filtresi ve yinelenen sinir ağlarını (YSA) uzun kısa süreli bellek (UKSB) ile birleştirerek yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Çoklu model izleme filtresi hedef dronun uçuş yörüngesinin kinematik öznitelikleri elde edilmiş ve geliştirilen ağ ile uçuş yörüngeleri öğrenilmiştir. Liu ve ark. (2021) radar izlerinden hedef hareket karakteristikleri çıkartarak bir kuş ve drone sınıflandırma yöntemi önermişlerdir. Yöntemde, rastgele orman sınıflandırıcısı kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar havalimanı bölgesinde konuşlandırılmış gerçek kuş gözetleme radar sistemleri ile doğrulanmıştır. Başka bir çalışmada, Wojtanowski ve ark. (2021) 5 kg'dan daha hafif dronlar için lazer taramaya dayalı dronları kuşlardan ayırt etme yöntemi sunmuşlardır. Belirtilen yöntem, algılanan nesne üzerinde lazer geri saçılmasının bir sonucu olarak alınan optik yankının basit çapraz polarizasyon oranı analizine dayanmaktadır. Basak ve ark. (2022) sinyal frekans imzalarını kullanarak radyo frekansı (RF) tabanlı drone algılama ve sınıflandırma yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, ticari dronları kullanarak yeni bir RF veri seti oluşturulmuş ve iki aşamalı birleşik algılama ve sınıflandırma çerçevesi arasında karşılaştırmalar sunulmuştur. Sonuçlar, YOLO derin ağının eşzamanlı çoklu sinyal senaryosu için spektrum algılamasına kıyasla daha iyi algılama performansı sağladığını göstermiştir. Diğer bir çalışmada, Kılıç ve ark. (2022) radyo frekansı (RF) sinyallerini kullanarak 2, 4 ve 10 sınıflı drone sınıflandırma performanslarını incelemişlerdir. Bu amaçla, RF sinyallerinin spektral öznitelikleri çıkartılarak destek vektör makinası (DVM) ile drone türleri sınıflandırılmış ve 10 sınıf için %95.15 doğruluk elde edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen çalışmalar incelendiğinde, küçük boyutlu İHA'ların ve

kuşların genellikle ayırt etmeyi zorlaştıran temel özelliklere sahip olmaları, radar sinyalleri ile sınıflandırılmalarının zorlu bir yöntem olduğunu göstermektedir. Akustik sinyallerin analizinde ise algılama menzilleri yaklaşık olarak 250 m'nin altında kalmaktadır ve bu sistemlerin özellikle kentsel veya gürültülü alanlarda veya rüzgâr koşullarında çevresel gürültüye duyarlılığı algılama performansını olumsuz yönde etkiler (Seidaliyeva vd., 2020). Ayrıca, çeşitli sinyal işleme yöntemlerini içeren ön işleme süreçleri de geliştirilen yöntemlerin karmaşıklığını artırmaktadır.

Evrişimli sinir ağları (ESA) mimarileri, kendi kendine öğrenme yetenekleri ve üstün performansları ile görsel algıya dayalı drone sınıflandırma yaklaşımlarında umut vaat eden çözümler sunabilir. ESA'ya dayalı yöntemler, nesnelere algılamak için derin üst düzey öznelikler çıkararak hedeflenen sınıfları oldukça etkili tahmin edebilirler (Coluccia vd., 2021; Singha & Aydin, 2021). Literatürde, dronların tespit edilmesi ve sınıflandırılması için görüntü tabanlı yaklaşımlar son zamanlarda yer almaya başlamıştır. Oh ve ark. (2019) ise görüntü tabanlı drone ve kuş sınıflandırmada ön eğitilmiş AlexNet, GoogLeNet, Inception-V3 VGG-16, ResNet-18, ResNet-50 ve SqueezeNet mimarilerinin performanslarını incelemiştir. Elde edilen sonuçlarda, AlexNet ve VGG-16 modellerinin %98.53 ve %97.84 doğruluk ile diğer mimarilerden nispeten daha iyi performanslar verdiğini göstermiştir. Grac ve ar. (2020) görüntülerden dronların tespit edilmesi için görüntü işleme yöntemleri kullanmışlar ve %97.30 doğruluk elde etmişlerdir. Seidaliyeva ve ark. (2020) gerçek zamanlı olarak drone tespiti için etkili bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde, hareketli nesnelere algılanması ve algılanan nesnenin drone, kuş ve arka plan olarak sınıflandırılması sağlanmıştır. Hareketli nesne algılama arka plan çıkarmaya dayanırken, sınıflandırıcı için ESA yapısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, %70.10 kesinlik ve %74.20 F1 değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Coluccia ve ark. (2021) ise arka ve ön planda yer alan hareketli kuşların ve diğer nesnelere yer aldığı görüntülerde drone ve kuşları sınıflamak için bir veri seti sunmuşlar ve derin öğrenme algoritmaları ile sınıflandırıcı performanslarını incelemiştir ve ortalama %80 gradyan değerine ulaşmışlardır. Literatürde yer alan bu çalışmalar incelendiğinde, farklı operasyonel koşullar için derin öğrenme yöntemleri kullanılarak dronların ve kuşların görsel olarak sınıflandırılmasının etkili ve hızlı çözümler getirebileceği görülmektedir.

Bu çalışmada, drone ve kuşları doğru ve hızlı bir şekilde sınıflandırmak için derin öğrenme tabanlı otomatik bir görsel algılama yöntemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, transfer öğrenme yaklaşımı kullanılarak AlexNet tabanlı bir ESA mimarisi tasarlanmıştır. Çok seviyeli özneliklerin elde edilebilmesi için ESA mimarisinde bir dizi sabit uzunluklu öznelik vektörü oluşturabilen mekansal piramit havuzlama (MPH) yöntemi kullanılmıştır. MPH yöntemi, çok seviyeli havuzlama işlemlerini gerçekleştirerek önerilen modelin çok boyutlu eğitilmesini ve geliştirilmiş ölçekleme özelliklerini kazanmasını sağlamaktadır. Çalışmada, halka açık veri setleri ve internet ortamından rastgele seçilen görüntüler birleştirilerek oluşturulan bir veri seti kullanılmıştır. Ayrıca, sınıflardaki örnek sayısının yetersizliğini gidermek için görüntülerde çevrimdışı veri artırma tekniği uygulanmıştır. Önerilen yöntemin değerlendirilmesinde, elde edilen sonuçlar bazı etkili ön eğitilmiş ESA mimarileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, geliştirilen MPH tabanlı ESA mimarisinin farklı ortamlardaki görüntülerden drone ve kuşları etkili ve başarıyla yüksek bir şekilde ayırt ederek sınıflayabildiğini göstermektedir. Çalışmanın geri kalan kısmı; kullanılan veri seti, uygulanan yöntemler, elde edilen bulgular, bulgular doğrultusunda tartışma ve sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Drone ve kuşlar arasında uçuş hızları ve radar imzaları büyük benzer özellikler gösterse de, görsel gözlem açısından farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, güvenlik problemleri teşkil edebilecek yerlerde hava sahasını otomatik olarak kontrol edilebilmek için dronları kuşlardan ayırabilen akıllı bir drone sınıflama modelinin geliştirilmesidir. Önerilen model MPH tabanlı bir ESA yapısına dayanmaktadır. MPH yöntemi, kayan pencere havuzlaması yerine çok seviyeli havuzlama yapısını kullanır ve sabit boyuttaki öznelik vektörlerinde rastgele boyutlu özellik haritalarını bir araya getirerek ağırlı sınıflama başarımını artıran etkili bir yaklaşımdır (Yee vd., 2022; Basbug & Sert, 2019). Bu bölümün devamında çalışmada kullanılan veri seti, önerilen MPH tabanlı ESA modeli ve veri artırma yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Kullanılan Veri Seti

Son zamanlarda, teknolojik gelişmeler ve düşük maliyetler sayesinde farklı rotor yapılarına ve boyutlara sahip drone sistemleri geliştirilmiştir. Dronlara en yakın radar benzerliğine sahip kuşlar ise binlerce çeşit türe ayrılmaktadır. Bu nedenle, çalışmanın genelleştirme yeteneğini artırmak için farklı drone ve kuş türlerini içeren halka açık erişimli 2 adet veri seti kullanılmıştır (Jamil, 2022; Walia, 2022). Ayrıca, bu veri setlerindeki gerçek ortamları ve fiziksel yapıyı temsil etmeyen görüntüler oluşturulan veri setinden çıkarılmıştır.

Sınıflara ait dağılımın düzensizliğini ortadan kaldırmak için internet ortamından farklı ortamlara ait yeni örnek görüntüler eklenerek eşit sayıda sınıf dağılımı da sağlanmıştır. Belirtilen şekilde oluşturulan veri setinde 300 drone sınıfını ve 300 kuş sınıfını temsil eden toplam 600 görüntü yer almaktadır. Görüntüler farklı açıları, ortamları ve türleri içeren sınıf örneklerinden oluşmaktadır. Veri setinde, 1553×1021, 275×183, 1280×720 ve 1068×1075 gibi piksel boyutlarında birçok farklı çözünürlükte görüntü bulunmaktadır. Sonuç olarak, farklı hava koşullarında drone ve kuşların uçtuğu çok çeşitli ortamlar ve çeşitli sınıf türlerine ait görüntüler kullanılarak yeni bir veri seti elde edilmiştir. Şekil 1’de veri setinde yer alan farklı örnek görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 1. Sınıfları Temsil Eden Örnek Görüntüler

Mekansal Piramit Havuzlama Tabanlı ESA Modeli

AlexNet mimarisi, görüntü işleme problemlerinde sıklıkla kullanılan ön eğitilmiş ESA modellerinden biridir. Bu mimari, Alex Krizhevsky tarafından önerilmiş ve 2012 yılında ImageNet yarışmasında yaklaşık bir milyon görüntü ile eğitilerek 1000 sınıflı bir veri seti için oldukça etkili sonuçlar elde etmiştir (Li vd., 2021). AlexNet, özellikle üstün genelleme performansı, hızlı eğitim süresi ve yüksek dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. Bu çalışmada, belirtilen özellikler dikkate alınarak AlexNet modeline MPH katmanı eklenmiş ve etkili bir ESA modeli tasarlanmıştır.

AlexNet mimarisi genel olarak evrişim, havuzlama ve tam bağlı katmanlardan oluşur ve bu katmanlar, beş adet evrişim, yedi adet aktivasyon, üç adet havuzlama ve üç adet tam bağlı (TB) katmanları içermektedir. Evrişim katmanları sırasıyla 11×11, 5×5 ve 3×3 boyutunda filtrelerden oluşurken havuzlama katmanları adım sayısı 2 olan 1×1 boyutunda filtrelerden meydana gelir. Evrişim katmanlarından sonra, düzeltilmiş doğrusal birim (ReLU) aktivasyon fonksiyonları yer almaktadır. Havuzlama katmanlarında maksimum havuzlama kullanılmıştır ve görüntülerin özelliklerini koruyarak boyutunu ve maliyetlerini azaltır. Son aktivasyon fonksiyonundan sonra, seyreltme katmanı ile birbirlerine bağlanmış üç adet TB katmanları yer alırken softmax katmanı ikili sınıflara ait olasılık dağılımlarını vermektedir (Han vd., 2017). Tasarlanan ağın girişi ise RGB derinlikli 227×227 piksel boyutundadır ve her giriş görüntüsünün boyutu ağın girişine göre yeniden boyutlandırılmıştır.

Tasarlanan ESA modelinde, son havuzlama katmanı yerine Şekil 2’de gösterilen MPH katmanı (Tan vd., 2021; Ouyang vd., 2018) kullanılmıştır. MPH katmanı, evrişimlerden gelen öznetelikleri farklı ölçeklerde ayırarak daha sonra bir araya toplayan bir kelime çantası modelidir ve üç temel özelliği bulunmaktadır. İlk olarak, bu katman giriş özneteliklerinin ölçeklerinden bağımsız olarak sabit uzunluklu bir öznetelik vektörü elde edilmesini sağlar. İkinci olarak, MPH katmanı nesne bozulmalarına karşı daha dayanıklı olan öznetelik haritalarını birleştirmek için tek pencere boyutu yerine çok seviyeli havuzlama pencereleri kullanır. Son olarak, bu yapı ile farklı ölçeklerdeki öznetelikler bir araya getirebilir (Yue vd., 2016). Bu çalışmada MPH katmanı, 1×1, 2×2 ve 3×3 boyutlarında filtrelerle sahip havuzlama katmanlarının birbirine paralel olarak bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Havuzlama katmanlarından sonra birleştirme katmanı kullanılarak farklı ölçekte özellik haritaları birleştirilmiş ve sabit uzunluktaki öznetelik vektörü elde edilmiştir (Huang vd., 2020; Han vd., 2017). Tasarlanan bu 3-seviyeli MPH yapısı ile TB katmanına herhangi bir giriş görüntüsü için uzunluğu 14 satır olan bir öznetelik vektörü aktarılmıştır. Böylece, klasik havuzlama katmanına göre daha fazla mekânsal özellikler çıkartılarak ağın dayanıklılığı artırılmış ve farklı giriş görüntülerine karşı daha iyi bir sınıflandırma performansı sağlanmıştır.

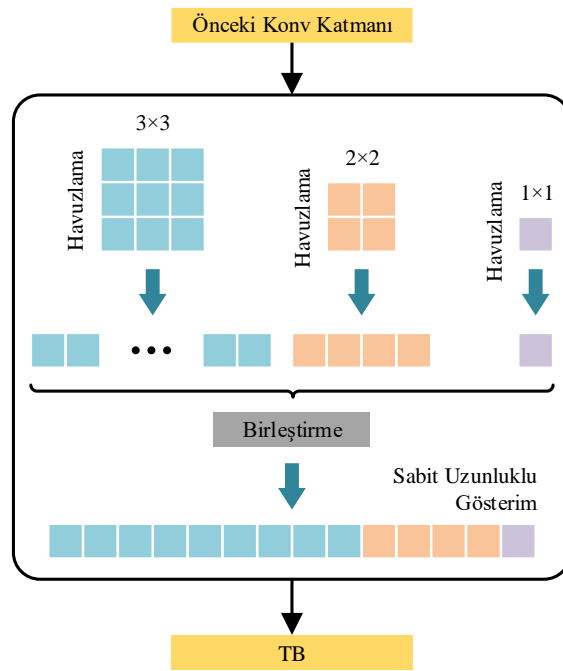
MPH katmanında, $v = 1, \dots, V$ herhangi bir ölçekte tek bir öznetelik haritası ile sağlanan katmanın V -seviyesini gösterir ise elde edilen sonuç s_o , V -seviyeli bir MPH işlemi için Denklem (1) ile bulunabilir:

$$s_o = \sum_{v=1}^v G_v^2 \quad (1)$$

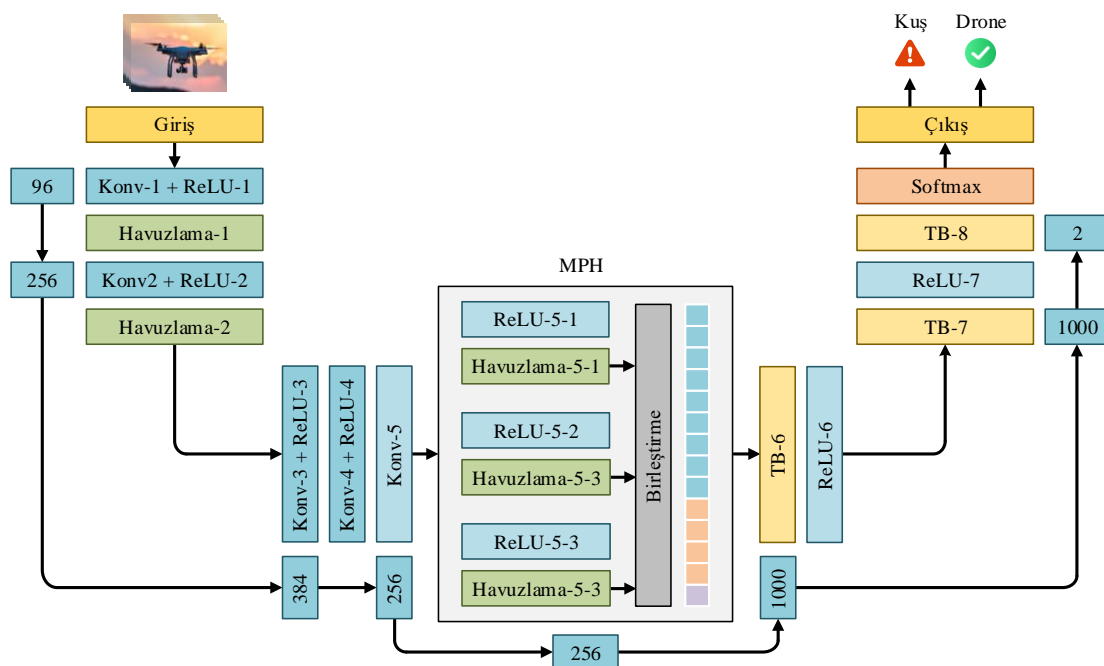
Mimarinin i . Evrişim bloğunun l . katmanından elde edilen toplam öznelik vektör uzunluğu ise aşağıdaki denklem ile elde edilir:

$$S_o^i = s_o \times f_l \quad (2)$$

Burada, f_l evrişim bloğu i 'nin l . katmanının toplam özellik haritası sayısını belirtir. Sonuç olarak, önerilen ESA modeli çok seviyeli ölçekleme özelliğine sahip olur. Şekil 3'de, önerilen MPH tabanlı ESA modelinin genel yapısı sunulmuştur.



Şekil 2. Mekansal Piramit Havuzlama Katmanı



Şekil 3. Önerilen MPH Tabanlı ESA Modeli

Veri Artırma

Veri setinde yer alan örnek sayısı geliştirilen derin öğrenme modelinin başarımını etkilemektedir. Çok sayıda parametreye sahip bir ESA modeli, yeterli eğitim örneği olmadan eğitim görüntülerinin genelleştirilemeyen ayrıntılı özelliklerini ezberledikleri için aşırı öğrenme riski ile karşılaşılır. Bu durumda, ağı eğitim örneklerinin çeşitli temsillerine maruz bırakmak, modelin yeni görüntüler için genelleştirilmesini sağlar ve geliştirilen ESA modelini sınıf örneklerinin farklı dönüşümlerine karşı daha az sapmalı, değişmez ve sağlam hale getirir. Veri artırma, yeterli örneklerin toplanamadığı durumlarda yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Veri artırma ile mevcut örneklerden sentetik yeni örnekler üretilerek mevcut veri seti genişletilerek daha iyi bir sınıflandırma performansı ve kararlılığı elde edilir. Aynı zamanda, sınıflar arasındaki düzensiz dağılım en aza indirgenerek tüm sınıflar için eşit sayıda bir kümeleme sağlanır (Lashgari vd., 2020; Takahashi vd., 2020).

Çalışmada kullanılan veri setinde, drone ve kuş sınıfları için toplam 600 adet görüntü bulunmasına rağmen, bu görüntülerin %70'i eğitim için ayrılmıştır. Böylece, eğitim örneklerini temsil eden kümenin boyutunu arttırmak için bu örneklere aynalama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, her satırdaki elemanlar tersine çevrilmiştir ve toplam 420 adet sentetik eğitim görüntüsü oluşturulmuştur. Şekil 4'de, aynalama işlemine ait örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 4. Sınıflara Ait Örnek Aynalanmış Görüntüler

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, dronların tespiti ve sınıflandırılması için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, MATLAB R2021b ortamında yapılmış ve sonuçlar Intel (R) i7-10750H CPU @2.60 GHz, NVIDIA Quadro P620 GPU ve 16 GB RAM belleğe sahip bir iş istasyonu yardımıyla elde edilmiştir. Veri setindeki görüntüler drone ve kuş olarak 2 sınıfta etiketlenmiştir. Bu sınıflarda bulunan görüntülerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i ise test için rastgele olarak ayrılmıştır. Eğitim için seçilen görüntülere veri artırma işlemi uygulanarak derin öğrenme yöntemlerinin performanslarının artırılması amaçlanmıştır. Önerilen yöntemin sınıflandırma başarımı AlexNet, GoogLeNet, ShuffleNet ve DarkNet gibi literatürde sıklıkla kullanılan ön eğitilmiş ESA'lar ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Tüm yöntemlere aynı eğitim, doğrulama ve test görüntüleri kullanılarak daha adil bir karşılaştırma amaçlanmıştır. Deneylerde, mini-yığın boyutu ve maksimum döngü sayısı sırasıyla 16 ve 50 olarak belirlenmiştir. Eğitim boyunca başlangıç öğrenme oranı $1e-4$ olarak ayarlanırken optimizasyon yöntemi olarak Momentumlu Stokastik Gradyan İnişi kullanılmıştır.

Performans Değerlendirme Ölçütleri

Bu çalışmada kullanılan tüm derin öğrenme yöntemleri ile elde edilen sonuçların değerlendirilebilmesi için Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, Özgüllük ve F1-skor gibi ölçütler seçilmiştir. Bu ölçütler Tablo 1'de verilen hata matrisi yardımıyla hesaplanmıştır.

Doğruluk, doğru sınıflandırılan örneklerin toplam örneklere oranı olan sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir değerlendirme göstergesidir. Kesinlik, doğru olarak tahmin edilen negatif örnek sayısının negatif olarak tahmin edilen toplam örnek sayısına oranı olarak ifade edilebilir. Duyarlılık ve Özgüllük ise sırasıyla doğru tahmin edilen negatif örnek sayısının gerçekte negatif olan tüm örnek sayısına oranı ve doğru tahmin edilen negatif olmayan

örnek sayısının gerçekte negatif olmayan tüm örnek sayısına oranı olarak tanımlanabilir. F1-skor ise Duyarlılık ve Kesinlik ölçütlerinin ağırlıklı ortalaması ile hesaplanır.

Tablo 1. Hata Matrisi

Hata Matrisi		Tahmin Edilen Sınıf	
		Pozitif (Drone)	Negatif (Kuş)
Gerçekteki Sınıf	Pozitif (Drone)	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)
	Negatif (Kuş)	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)

Yukarıda kısaca açıklanan performans değerlendirme ölçütleri matematiksel olarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir:

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (4)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP + YN}{DP + YN} \quad (5)$$

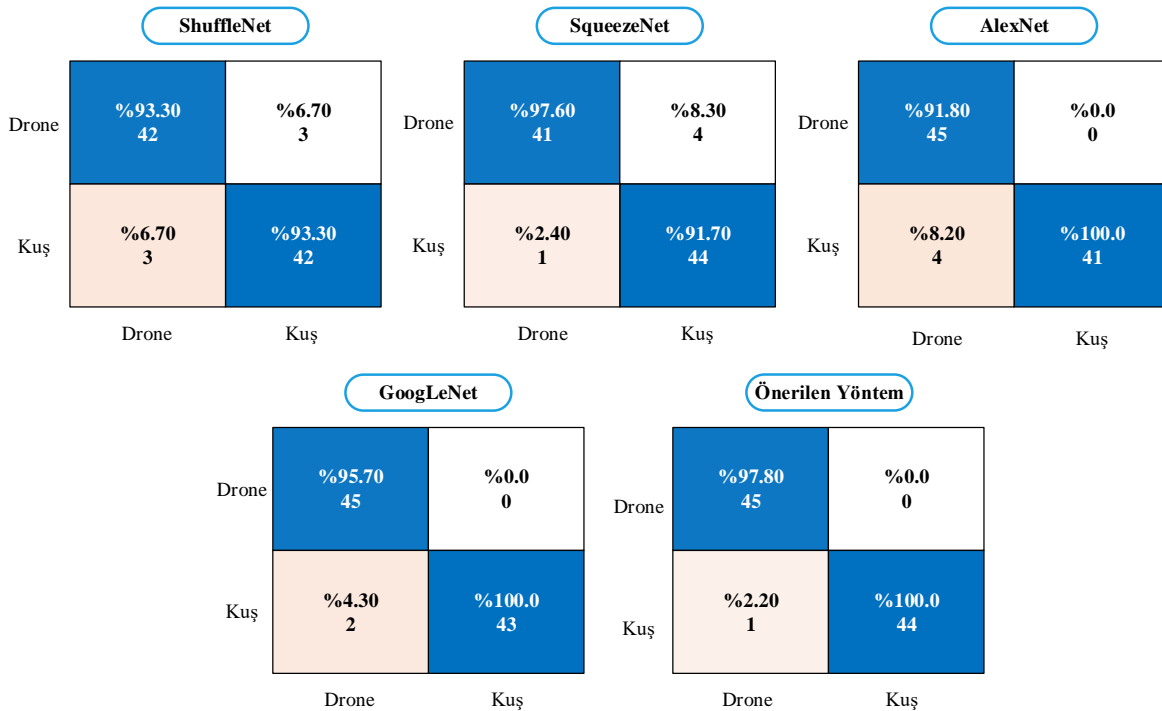
$$\text{Özgüllük} = \frac{DN + YP}{DN + YP} \quad (6)$$

$$\text{F1 - skor} = 2 * \frac{\text{Duyarlılık} * \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (7)$$

Burada, DP doğru sınıflandırılmış pozitif örnekleri, YP yanlış sınıflandırılmış negatif örnekleri, YN yanlış sınıflandırılmış pozitif örnekleri, DN doğru sınıflandırılmış negatif örnekleri ifade eder.

Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar önerilen yöntemin dronların sınıflandırılmasındaki performansını göstermek için gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, tüm derin öğrenme yöntemleri eğitildikten sonra test için ayrılan görüntülerden elde edilen hata matrisleri Şekil 5’de her bir model için ayrı ayrı sunulmuştur.

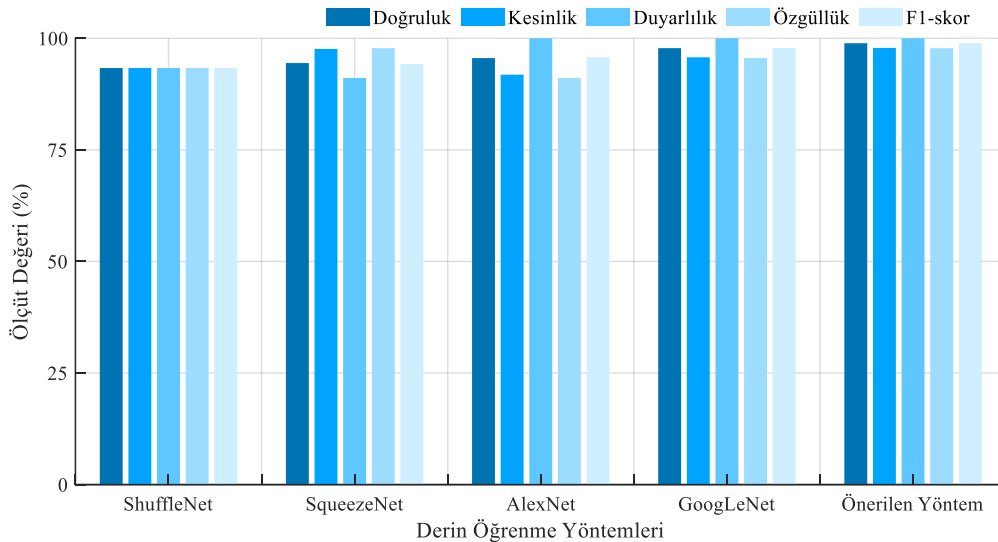
**Şekil 5.** Hata Matrisleri

Hata matrisleri incelendiğinde ShuffleNet'in 6 görüntüyü yanlış sınıflandırdığı görülmektedir. SqueezeNet, AlexNet ve GoogLeNet ise sırasıyla 5, 4 ve 2 görüntüyü yanlış sınıf içerisinde etiketlemiştir. Diğer yandan önerilen derin öğrenme yöntemi ise sadece 1 görüntüyü yanlış etiketleyerek en iyi sınıflandırma performansını göstermiştir. Hata matrisindeki değerler yardımıyla performans değerlendirme ölçütlerinin sayısal değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Derin Öğrenme Yöntemlerinden Elde Edilen Performans Ölçütlerinin Sonuçları

Yöntem	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	Özgüllük	F1-skor
ShuffleNet	%93.33	%93.33	%93.33	%93.33	%93.33
SqueezeNet	%94.44	%97.62	%91.11	%97.78	%94.25
AlexNet	%95.56	%91.84	%100	%91.11	%95.75
GoogLeNet	%97.78	%95.74	%100	%95.56	%97.83
Önerilen Yöntem	%98.89	%97.83	%100	%97.78	%98.90

Ayrıca Tablo 2'deki değerlerin daha iyi analiz edilebilmesi için Şekil 6'daki grafikler verilmiştir. Tablo 2 ve Şekil 6'dan da görüldüğü üzere, tüm derin öğrenme yöntemlerinden elde edilen Doğruluk ölçütlerinin değerleri karşılaştırıldığında önerilen yöntem %98.89 ile en iyi sonucu sağlamıştır. En kötü sonucu %93.33'lük değer ile ShuffleNet verirken ikinci en iyi sonucu ise GoogLeNet %97.78'lik değer ile sağlamıştır. SqueezeNet ve AlexNet'in Doğruluk değerleri ise sırasıyla %94.44 ve %95.56 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Performans Değerlendirme Ölçütlerinin Karşılaştırılması

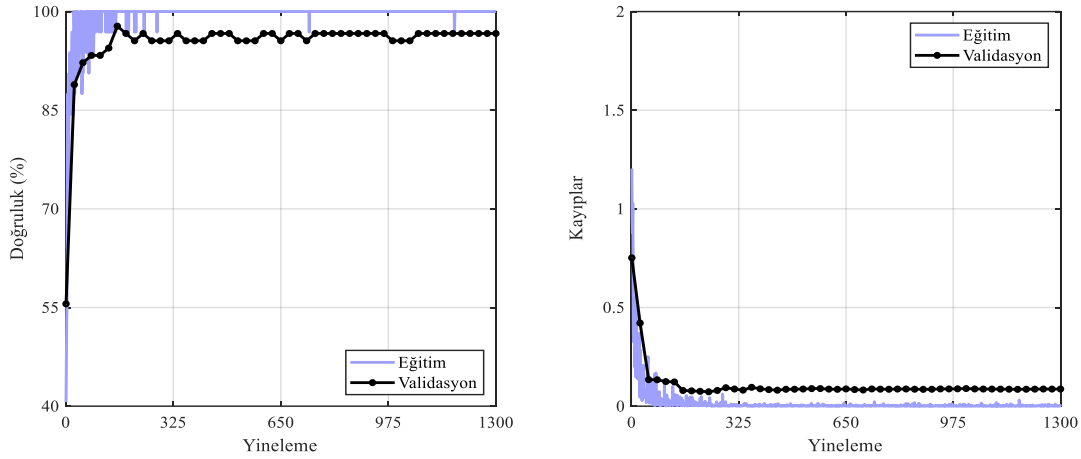
Diğer bir performans değerlendirme ölçütü olan Kesinlik için tüm derin öğrenme yöntemlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde yine önerilen yöntem en iyi sonucu sağlamaktadır. Önerilen yöntemin Kesinlik ölçütündeki değeri %97.83 iken en kötü sonucu veren ShuffleNet'in değeri ise %93.33 olarak hesaplanmıştır. SqueezeNet, AlexNet ve GoogLeNet'in değerleri ise sırasıyla %97.62, %91.84 ve %95.74 olarak elde edilmiştir. Bu değerlendirme ölçütündeki sonuçlardan önerilen yöntemin daha güvenilir ve etkin bir sınıflandırma yeteneğine sahip olduğu görülmektedir.

Önerilen yöntem ve diğer karşılaştırma modelleri Duyarlılık ölçütündeki değerleri bakımından analiz edildiğinde, önerilen yöntem ile AlexNet ve GoogLeNet en iyi sonucu %100'lük değer ile sağlarken en kötü sonucu ise SqueezeNet %91.11'lik değer ile göstermiştir. Önerilen yöntem ile AlexNet ve GoogLeNet'in sonuçlarının aynı olmasının sebebi ise Kuş etiketinde bulunan görüntülerin hepsinin doğru olarak bilinmesidir. Diğer bir derin öğrenme yöntemi olan ShuffleNet'in değeri ise %93.33 olarak hesaplanmıştır.

Özgüllük ölçütünde ise ShuffleNet %93.33, SqueezeNet %97.78, AlexNet %91.11, GoogLeNet %95.56 ve önerilen yöntem %97.78'lik değerlere sahiptir. Bu sonuçlardan da önerilen yöntemin en iyi sınıflandırma performansına sahip olduğu görülürken en kötü sonucu ise AlexNet vermiştir. Ön eğitilmiş derin öğrenme yöntemleri arasında önerilen

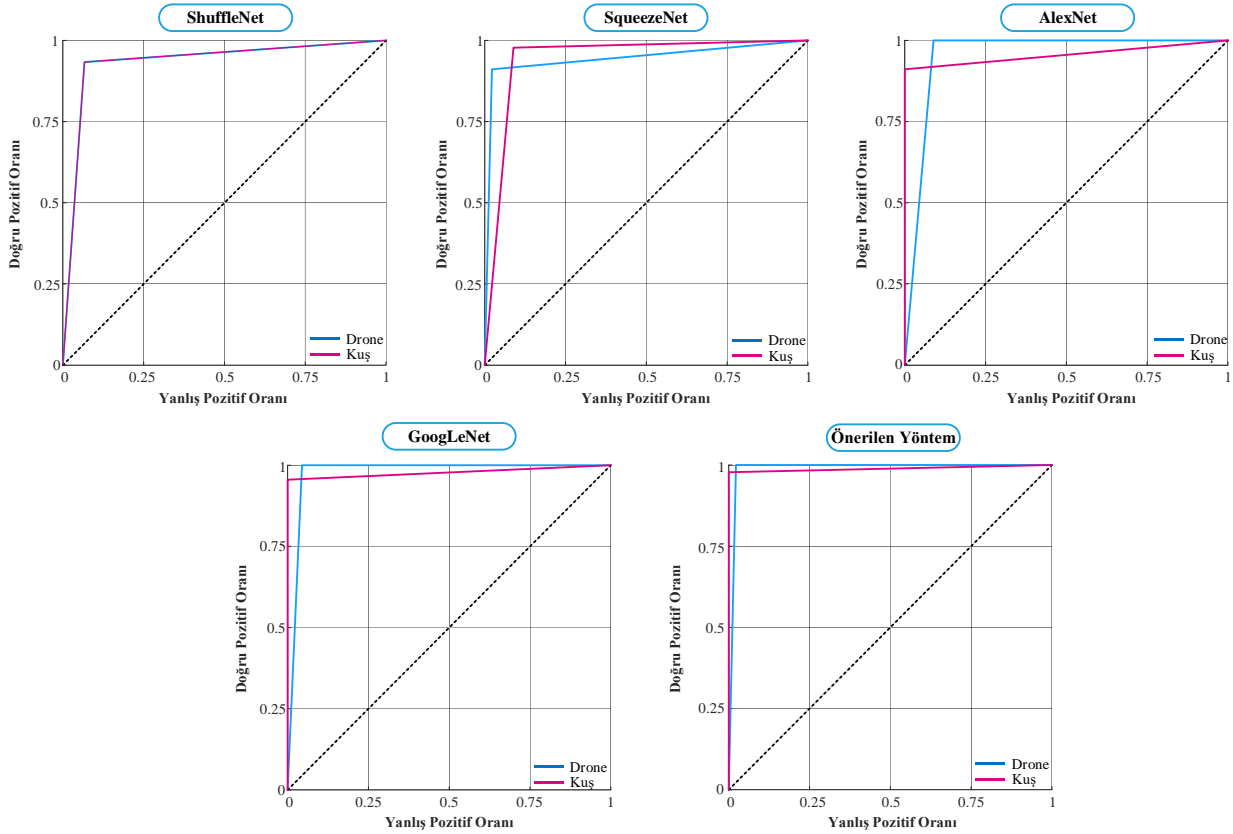
yönteme en yakın performansı ise bu performans ölçütünde SqueezeNet sağlamıştır. Hesaplanan Özgüllük değerlerinin analiz edilmesi sonucunda önerilen yöntemin üstün bir sınıflandırma kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür.

F1-skor sonuçlarının değerlendirilmesinde yine en iyi sonucu önerilen yöntem %98.90'lık değer ile sağlamıştır. En kötü sonucu ise %93.33 ile ShuffleNet göstermiştir. Önerilen yönteme en yakın F1-skor sonucunu %97.83 ile GoogLeNet vermiştir. SqueezeNet, AlexNet'in bu performans ölçütündeki değerleri sırasıyla %94.25 ve %95.75 olarak hesaplanmıştır. Bu performans ölçüt değerlerindeki sonuçlardan göre önerilen yöntem ön eğitilmiş derin öğrenme yöntemlerinden daha iyi sınıflandırma performansına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Performans Değerlendirme Ölçütlerinin Karşılaştırılması

Şekil 7'de ise eğitim ve validasyon süreçlerindeki doğruluk ve kayıplara ilişkin grafikler sunulmuştur. Şekiller yardımıyla önerilen yöntemin doğruluğu hakkında bilgiler gözlemlenebilmektedir.



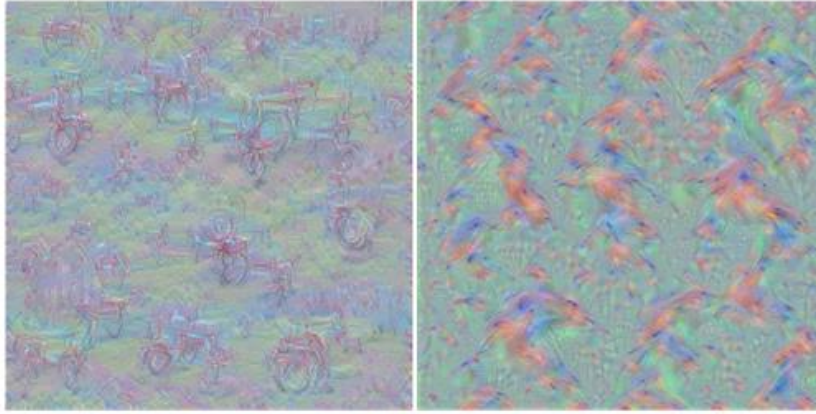
Şekil 8. Derin Öğrenme Yöntemlerinden Elde Edilen ROC Eğrileri

Yöntemlerden elde edilen alıcı işletim karakteristik (ROC) eğrileri Şekil 8'de verilmiştir. ROC eğrileri Duyarlılık ve Özgüllük ölçütlerinden elde edilen sonuçlara göre çizilmektedir. Şekil 8'de sunulan ROC eğrilerinden de görüldüğü

üzere, önerilen yöntemin dronları sınıflandırma da üstün performansa sahip olduğu görülmektedir. Önerine yönteme ait olan ROC eğrisi incelendiğinde ilgili eğri altında kalan alanların her iki sınıf içinde 1 değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum sınıflandırmadaki görüntülerin doğru olarak tahmin edildiğini kanıtlamaktadır.

Önerilen yöntemin dronların sınıflandırılmasındaki performansı diğer karşılaştırma yöntemlerine göre iyileştirme yüzdeleri açısından da analiz edilmiştir. Doğruluk performans ölçütünde SqueezeNet için %5.96, ShuffleNet için %4.71, AlexNet için %3.48 ve GoogLeNet için ise %1.14 iyileştirme yüzdeleri elde edilmiştir. Kesinlik ölçütünde ise iyileştirme yüzdeleri %0.22 ile %6.52 arasında değişmektedir. Diğer bir değerlendirme ölçütü olan Duyarlılıkta ise ShuffleNet ve SqueezeNet için iyileştirme yüzdeleri sırasıyla %7.15 ve %9.76 olarak hesaplanmıştır. Özgüllük ölçütünde ise önerilen yöntem ile AlexNet'in performansı %7.32 olarak iyileştirilmiştir. ShuffleNet ve GoogLeNet için iyileştirme yüzdeleri sırasıyla %4.77 ve %2.32 olarak elde edilmiştir. Son değerlendirme ölçütü olan F1-skor değerlerindeki iyileştirme yüzdeleri ise %1.1 ile %5.97 arasındadır. Elde edilen tüm iyileştirme yüzdeleri değerlendirildiğinde önerilen yöntem ile ön eğitilmiş derin öğrenme yöntemlerinin performanslarının artırıldığı kanıtlanmıştır.

Ayrıca, önerilen yöntemin ağ davranışını incelemek için *deepDreamImage* fonksiyonu ile çıkartılan öznetelikler görselleştirilmiştir. Önerilen yöntemin her iki sınıf için BT katmanından öğrenilen özneteliklerin görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Özneteliklerin Görselleştirilmesi

SONUÇ

Bu çalışmada, dronlar ile kuşları sınıflandırmak için ön eğitilmiş derin öğrenme yöntemlerinden biri olan AlexNet mimarisine mekansal piramit havuzlama (MPH) yapısı entegre edilerek etkin bir evrişimli sinir ağı (ESA) modeli geliştirilmiştir. Eğitim için ayrılan örneklere veri artırma işlemi uygulanarak ağın başarımı artırılmıştır. Bu aşamadan sonra ise önerilen yöntemin dronların sınıflandırılmasındaki performansı ShuffleNet, SqueezeNet, AlexNet ve GoogLeNet gibi ön eğitilmiş derin öğrenme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda, önerilen yöntem en iyi doğruluk ölçütü sonucunu %98.89'lik değer ile sağlarken en kötü sonucu %93.33 ile ShuffleNet göstermiştir. Diğer performans değerlendirme ölçütlerinde ise yine önerilen yöntem en iyi sonuçlara sahiptir. Ayrıca, önerilen yöntem ile en iyi ikinci performansa sahip olan GoogLeNet'in Doğruluk, Kesinlik, Özgüllük ve F1-skor ölçütleri sırasıyla %1.14, %2.18, %2.32 ve %1.10 olarak iyileştirilmiştir. Önerilen yöntem AlexNet'in geliştirilmiş yapısı olduğu için buradaki iyileştirme yüzdeleri ise Doğruluk için %3.48, Kesinlik için %6.52, Özgüllük için %7.32 ve F1-skor için %3.29 olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde önerilen yöntem ile dronların daha etkin bir şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, uzak görüntülerden drone türlerinin tespit edilmesi ve sınıflandırılması ayrıca farklı optimizasyon yöntemleri ile ESA modelinin iyileştirilmesi düşünülebilir. Öte yandan, önerilen yöntem mimarisi farklı silahlı ve farklı amaçlar için kullanılan drone görüntüleriyle oluşturulan veri setlerinde kullanılmak üzere geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Anwar, M.Z., Kaleem, Z., & Jamalipour, A. (2019). Machine Learning Inspired Sound-Based Amateur Drone Detection for Public Safety Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(3), 2526–2534. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2893615>
- Basak, S., Rajendran, S., Pollin, S., & Scheers, B. (2022). Combined RF-Based Drone Detection and Classification. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 8(1), 111–120. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2021.3099114>
- Basbug, A.M., & Sert, M. (2019-January). Acoustic Scene Classification Using Spatial Pyramid Pooling with Convolutional Neural Networks. *IEEE 13th International Conference on Semantic Computing*, (pp. 128–131). <https://doi.org/10.1109/ICSC.2019.00029>
- Coluccia, A., Fascista, A., Schumann, A., Sommer, L., Dimou, A., Zarpalas, D., Méndez, M., de la Iglesia, D., González, I., Mercier, J.-P., Gagné, G., Mitra, A., & Rajashekar, S. (2021). Drone vs. Bird Detection: Deep Learning Algorithms and Results from a Grand Challenge. *Sensors*, 21, 2824. <https://doi.org/10.3390/s21082824>
- Coluccia, A., Parisi, G., & Fascista, A. (2020). Detection and Classification of Multicopter Drones in Radar Sensor Networks: A Review. *Sensors*, 20, 4172. <https://doi.org/10.3390/s20154172>
- Dale, H., Baker, C., Antoniou, M., Jahangir, M., Atkinson, G., & Harman, S. (2022). SNR-dependent drone classification using convolutional neural networks. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 16, 22–33. <https://doi.org/10.1049/rsn2.12161>
- Grác, Š., Beňo, P., Duchoň, F., Dekan, M., & Tölgyessy, M. (2020). Automated detection of multi-rotor UAVs using a machine-learning approach. *Applied System Innovation*, 3(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/asi3030029>
- Han, X., Zhong, Y., Cao, L., & Zhang, L. (2017). Pre-trained alexnet architecture with pyramid pooling and supervision for high spatial resolution remote sensing image scene classification. *Remote Sensing*, 9(8), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs9080848>
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
- Huang, Z., Wang, J., Fu, X., Yu, T., Guo, Y., & Wang, R. (2020). DC-SPP-YOLO: Dense connection and spatial pyramid pooling based YOLO for object detection. *Information Sciences*, 522, 241–258. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.02.067>
- Jamil, S. Malicious Drones Dataset (2022). <https://www.kaggle.com/datasets/sonainjamil/malicious-drones/> Erişim Tarihi 07.03.2022.
- Kim, B.K., Kang, H.S., Lee, S., & Park, S.O. (2021). Improved Drone Classification Using Polarimetric Merged-Doppler Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(11), 1946–1950. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3011114>
- Kılıç, R., Kumbasar, N., Oral, E.A., & Ozbek, I.Y. (2022). Drone classification using RF signal based spectral features. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 28, 101028. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.06.008>
- Lashgari, E., Liang, D., & Maoz, U. 2020. Data augmentation for deep-learning-based electroencephalography. *Journal of Neuroscience Methods*, 346, 108885. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2020.108885>
- Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2021). A Survey of Convolutional Neural Networks: Analysis, Applications, and Prospects. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 1–21. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2021.3084827>
- Liu, J., Xu, Q.Y., & Chen, W.S. (2021). Classification of Bird and Drone Targets Based on Motion Characteristics and Random Forest Model Using Surveillance Radar Data. *IEEE Access*, 9, 160135–160144. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130231>
- Lykou, G., Moustakas, D., & Gritzalis, D. (2020). Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies. *Sensors*, 20, 3537. <https://doi.org/10.3390/s20123537>

- Oh, H.M., Lee, H., & Kim, M.Y. (2019-October). Comparing Convolutional Neural Network(CNN) models for machine learning-based drone and bird classification of anti-drone system. *International Conference on Control, Automation and Systems*, (pp. 87–90). <https://doi.org/10.23919/ICCAS47443.2019.8971699>
- Ouyang, X., Gu, K., & Zhou, P. (2018). Spatial Pyramid Pooling Mechanism in 3D Convolutional Network for Sentence-Level Classification. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26(11), 2167–2179. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2018.2852502>
- Seidaliyeva, U., Akhmetov, D., Ilipbayeva, L., & Matson, E.T. (2020). Real-Time and Accurate Drone Detection in a Video with a Static Background. *Sensors*, 20, 3856. <https://doi.org/10.3390/s20143856>
- Singha, S., & Aydin, B. (2021). Automated drone detection using YOLOv4. *Drones*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/drones5030095>
- Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (2022). <https://iha.shgm.gov.tr/public/haberler?ID=2677244/> Erişim Tarihi 15.07.2022.
- Taha, B., & Shoufan, A. (2019). Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research. *IEEE Access*, 7, 138669–138682. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942944>
- Takahashi, R., Matsubara, T., & Uehara, K. (2020). Data Augmentation Using Random Image Cropping and Patching for Deep CNNs. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 30(9), 2917–2931. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2019.2935128>
- Tan, Y.S., Lim, K.M., Tee, C., Lee, C.P., & Low, C.Y. (2021). Convolutional neural network with spatial pyramid pooling for hand gesture recognition. *Neural Computing and Applications*, 33, 5339–5351. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05337-0>
- Uddin, Z., Altaf, M., Bilal, M., Nkenyereye, L., & Bashir, A.K. (2020). Amateur Drones Detection: A machine learning approach utilizing the acoustic signals in the presence of strong interference. *Computer Communications*, 154, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.02.065>
- Walia, H. Bird vs Drone New Dataset (2022). <https://www.kaggle.com/datasets/harshwalia/bird-vs-drone-new/> Erişim Tarihi 07.03.2022.
- Wojtanowski, J., Zygmunt, M., Drozd, T., Jakubaszek, M., Życzkowski, M., & Muzal, M. (2021). Distinguishing Drones from Birds in a UAV Searching Laser Scanner Based on Echo Depolarization Measurement. *Sensors*, 21, 5597. <https://doi.org/10.3390/s21165597>
- Yee, P.S., Lim, K.M., & Lee, C.P. (2022). DeepScene: Scene classification via convolutional neural network with spatial pyramid pooling. *Expert Systems with Applications*, 193, 116382. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116382>
- Yue, J., Mao, S., & Li, M. (2016). A deep learning framework for hyperspectral image classification using spatial pyramid pooling. *Remote Sensing Letters*, 7, 875–884. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1193793>
- Zhang, X., Mehta, V., Bolic, M., & Mantegh, I. (2020-October). Hybrid AI-enabled Method for UAS and Bird Detection and Classification. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (pp. 2803–2807). <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9282965>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.05.2022
Kabul Tarihi : 06.08.2022

Received Date : 12.05.2022
Accepted Date : 06.08.2022

ÇİNKO OKSİT NANOPARÇACIK SENTEZLENMESİ VE E7 NEMATİK SIVI KRİSTALİNİN DİELEKTRİK VE KAPASİTANSA ETKİSİ

SYNTHESIS OF ZINC OXIDE NANOPARTICLE AND ITS EFFECT OF E7 NEMATIC LIQUID CRYSTALS ON DIELECTRIC AND CAPACITANCE

Şükrü ÖZĞAN* (ORCID: 0000-0001-9334-327X)
Fatma Betül YILDIZ (ORCID: 0000-0002-8950-8518)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: : Şükrü ÖZĞAN, ozgan@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada hidrotermal yöntem kullanılarak Çinko Oksit (ZnO) nanoparçacık sentezlendi. Sentezlenen ZnO nanoparçacık geçirimli elektron mikroskobu ve x-ışınları difraksiyonu ile karakterizasyonu yapıldı. ZnO nanoparçacık, E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katılarak numuneler elde edildi. Bu numunelerin gerçek ve sanal dielektrik sabiti ve mutlak kapasitans değişimleri 100 Hz-15 MHz frekans aralığında oda sıcaklığında incelenmiştir. Gerçek dielektrik sabiti belli frekansa kadar sabit gibi çok az azalarak değiştiği, 0.8 MHz frekansa gelince birden bire azalarak sıfır olduğu, nanoparçacık katkı oran ile arttığı tespit edilmiştir. Sanal dielektrik kısmı düşük frekanslarda azalmakta, sonra sabit gibi davranıyor ve daha yüksek frekansta artarak yaklaşık 2 MHz frekans civarında pik yapar ve azalarak sıfıra yaklaşıyor. Sıvı kristalin dielektrik ve kapasitans değerleri % 0.6 ZnO nanoparçacık katkı oranında en büyük değişim göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: ZnO, nanoparçacık, sıvı kristal, dielektrik, kapasitans

ABSTRACT

In this study, Zinc Oxide (ZnO) nanoparticle was synthesized using hydrothermal method. Synthesized ZnO nanoparticle was characterized by transmission electron microscopy and x-ray diffraction. Samples were obtained by doping ZnO nanoparticle to E7 nematic liquid crystal at different rates. The real and imaginary dielectric constant and absolute capacitance changes of these samples were investigated in the frequency range of 100 Hz-15 MHz at room temperature. It has been determined that the real dielectric constant changes by decreasing as little as constant until a certain frequency, when it comes to the frequency of 0.8 MHz, it suddenly decreases and becomes zero, and increases with the nanoparticle contribution rate. The virtual dielectric part decreases at low frequencies, then behaves like a constant, and increases at higher frequency, peaking around 2 MHz and approaching to zero. The dielectric and capacitance values of the liquid crystal show the greatest variation at 0.6% ZnO nanoparticle contribution.

Keywords: ZnO, nanoparticle, liquid crystal, dielectric, capacitance

GİRİŞ

Organik malzemeler, potansiyel uygulama alanları ve sıra dışı özellikleri nedeniyle son yıllarda giderek daha fazla incelenmeye başlanmıştır. Özellikle, maddenin katı ve sıvı arasında bir ara faz olarak tanımlanan sıvı kristaller, farklı elektro-optik cihazlar için büyük öneme sahiptir. Sıvı kristal ekran teknolojisi, tam renk yelpazesi göstermesi, daha düşük güç tüketimi ve daha az yer kaplaması nedeniyle bilgisayar ekranlarında, TV ve birçok makinaların ve araçların gösterge sistemlerinde kullanılmaktadır (Chen 2011; Yang and Wu 2014). 2000 li yılların başlarında, endüstriyel uygulamalarda sıvı kristallerin yıllık satışının oldukça fazla olduğu görülmüştür (Castellano 2006). Ayrıca elektro-optik filtreler (Caputo et al. 2009; Wu 1989), holografi (Chen and Brady 1992), dijital veri depolama (Khoo et al. 1999; Matharu, Jeeva, and Ramanujam 2007) ve biyosensörlerin yapımında da sıvı kristallerin önemi azımsanamaz seviyelerdedir (Woltman et al. 2007). Genel olarak, modern sıvı kristallerin endüstriyel uygulamaları için geniş sıvı kristal faz sıcaklık aralığı, küçük anahtarlama süresi, yüksek optik ve dielektrik anizotropiye gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla yeni sıvı kristallerin sentezlenmesi veya sıvı kristal karışımının oluşturulması ve katkı malzemelerin kullanılması, bu özelliklere sahip sıvı kristal elde etmek için kullanılan yöntemlerdir. Bu nedenle sıvı kristalleri kullanan cihazın performansı, sıvı kristale ve konuk malzemelere büyük ölçüde bağlıdır (Dolgov, Yaroshchuk, and Lebovka 2008; Özgan and Okumuş 2011; Vardanyan, Palazzo, and Walton 2011). Boya, polimer ve nanopartiküller, konuk malzemelerin ana türleridir. Nematik sıvı kristallerdeki %1 boya katkısı, nematik sıvı kristalin yeniden oryantasyonunu iki katına kadar artırır. Ayrıca nematik sıvı kristallere boya katkısının, eşik voltajını neredeyse %25'e kadar, kırılma indisi modülasyonunu da üç kata kadar azalttığı tespit edilmiştir (Jánossy 1994; Köysal, Okutan, and Gökçen 2011).

Sıvı kristallerin cihazlarının performansının artırılması için kullanılan konuk malzemeler polimer, boyar malzemeler ve nanomalzemelerdir. Veya bu çalışmada kullandığımız dört sıvı kristalin ötektik karışımı olan E7 nematik sıvı kristalinide oldu gibi iki veya daha çok sıvı kristali belirli oranlarda karıştırarak farklı fiziksel özelliklere sahip yeni sıvı kristal malzeme elde edilebilir. Eskalen ve ark. E7/6CB/6AB üçlü sıvı karışım kompleksinin elektro-optik, ısıl ve dielektrik özelliklerini incelediler (Eskalen, Okumuş, and Özgan 2019). Sıvı kristallere katılan nanomalzeme, sıvı kristallerin özelliklerini geliştirir. Literatürde bu amaçla metalik nanopartiküller (Kobayashi et al. 2006), ferromanyetik nanopartiküller (Okutan et al. 2012), yarı iletken nanopartiküller (Zharkova and Streltsov 2020) ve karbon nanomalzemeler (Lee and Chiu 2001; Lee, Gau, and Chen 2005) gibi farklı tipte nanomalzemeler kullanılmaktadır. Özgan ve ark heksilsiyano-bifenil sıvı kristaline grefen oksit nanoparçacık katkılanarak ısıl ve elektro-optik özelliklerini incelemiştir (Özgan, Eskalen, and Tapkıranlı 2018). Karbon kuantum noktaları nematik sıvı kristale in elektro-optik performansına etkisi incelendi (Eskalen 2020). GO@ Fe₃O₄@ TiO₂ tipi organik-inorganik nanohibrit materyalin sentezi: Nanohibrit katkılı sıvı kristal E7'nin etkisinin ve siprofloksasinin fotokatalitik bozunması araştırılmıştır (Uruş et al. 2022). Farklı sıcaklıklarda hidrotermal olarak üretilen kobalt oksit nano yapıların nematik sıvı kristalin faz geçiş sıcaklığı ve eşik voltajına etkisi araştırılmıştır (Eskalen, Kerli, and Özgan 2017). ZnO nanopartiküller yapısında çinko ve oksijen atomlarını içeren yüksek elektriksel iletkenlik ve geçirgenliğe sahip metal oksit yarıiletken malzemelerdir. ZnO basit ve ekonomik üretimleri, 3.37 eV geniş bant aralığı enerjisine ve 60 meV'lik yüksek eksiton bağlama enerjisine sahip olmaları nedeniyle elektronikten optiğe, güneş pillerinden gaz sensörlerine kadar birçok uygulama alanında kullanılmaktadır (Li et al. 2011). Daha önceki yıllarda, çinko oksit nanopartiküllerin nematik sıvı kristallere katılanması eşik voltajını önemli ölçüde azalttığı ve bunun sıvı kristal cihazların daha düşük enerji tüketimine yardımcı olabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca, çinko oksit nanopartikülleri, Sıvı kristal fazının sıcaklık aralığını artırmış ve sıvı kristallerin oryantasyonunu iyileştirmiştir (Eskalen et al. 2015). Bu çalışmada, ZnO nanopartiküller hidrotermal yöntem ile sentezlenmiştir. ZnO nanopartiküllerin yapısal özellikleri X-ışını difraksiyonu (XRD) aracılığıyla belirlenmiştir. Daha sonra ZnO nanopartiküller E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katılanmıştır. Son olarak da ZnO:E7 numunelerin elektriksel özellikleri araştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan E7 nematik sıvı kristal dört farklı sıvı kristalin ötektik bileşeni olup satın alınmıştır (Military University of Technology, Warsaw, Poland). Sentezlenen ZnO nanoparçacıkların belirli oranlarda E7 nematik sıvı kristale katılarak elde edilen numunelerin dielektrik ve kapasitans değerlerini frekansa ve voltaja bağlı ölçümlerini yapabilmek için birer yüzeyi İndium kalay oksit ile iletken haline getirilmiş ışığı geçiren üst üste iki plakadan oluşan cam hücre, (ITO) 0.8 µm aralıklı ve 1 cm² etkin alanı, Polanyadan satın alındı ve kullanıldı (Military University of Technology, Warsaw, Poland).

ZnO nanopartikülleri hidrotermal yöntem ile sentezlenmiştir. Çinko oksit nanopartikülleri sentezlemek için kullanılan NaOH ve Zn(Ac) Merck ten satın alındı. ZnO nanoparçacıkları sentezlemek için 2 gr NaOH ile 5.48 gr Zn(Ac) kullanılmıştır. 50 ml saf su kullanılarak 30 dk ultrasonik nebulizatörde karıştırılarak çözelti oluşturulmuştur. Çözelti bir çelik otoklavın yüksek sıcaklığa dayanıklı teflon kabına konup kapağı kapatıldıktan sonra 160°C sıcaklıktaki fırında 12 saat fırınlanmıştır. Fırınlanan numune süzülüp 12 gün oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Sonrasında numune 25 ml saf suda yıkanmış ve tekrar süzümüştür. Süzülen numune fırında 47°C'de kurutulup sonrasında numune 300°C de 3 saat tavlansmıştır. E7 nematik sıvı kristal ve ZnO nanopartiküller izoproponal içinde çözülmüştür. Daha sonra oda sıcaklığında ultrasonik banyo ve mekanik bir karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelinceye kadar iki saat karıştırılmıştır. E7+ZnO karışımında izoproponalin tamamen buharlaşması için 45°C' de 10 saat fırınlanmıştır. Daha sonra ZnO ile sıvı kristal karışımı için her bir numune için 300 mg nematik sıvı kristale E7'ye, 0.9 mg (%0.3), 1.8 mg(%0.6) ve 3 mg (%1) ZnO nanopartikül katkılandırılarak üç farklı ZnO oranında numune elde edilmiştir. ZnO nanopartikül katkılı nematik sıvı kristal karışımı ITO boş hücrelere 65°C sıcaklıkta kılcal hareket yoluyla doldurulmuştur. Numunelerin doldurulduğu ITO cam hücrelerin numune doldurmak için açık bırakılan iki kenarı epoksi yapıştırıcı ile kapatılmıştır. Numunelerin ITO hücrelere doldururken 65°C sıcaklık olması, E7 nematik sıvı kristalin nemati-izotropik sıvı faz geçiş sıcaklığında E7 nin daha akıcı olması ve ITO hücreye kapalırite yöntemiyle kolaylıkla doldurulabilmesi için yapıldı.

Gösterge sistemlerinde kullanılan Sıvı kristallerin dielektirik ve kapasitan özelliklerini bilmek önemlidir. Dielektrik gerçek ve sanal kısımlarına bağlı olarak kompleks olarak verilir.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

Burada sırasıyla ε' dielektrik sabitinin gerçek kısmıdır malzemede elektrik yükü ve dolayısıyla enerji depolanmasını gösterir. ε'' dielektrik sabitinin sanal kısmıdır malzemeden elektrik yük boşalmasını ifade eder. Kapasitans dielektrik sabitinin gerçek kısmına bağlı olarak bu şekilde verilir;

$$C = \varepsilon' C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon' \frac{A}{d} \quad (2)$$

Burada C plakalar arası dolu iken kapasitans, C_0 plakalar arası boşken kapasitans ε_0 boş uzayın elektriksel geçirgenlik sabiti ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$); A, ITO hücrenin yüzey alanı ve d ise ITO hücre plakalar arasındaki mesafeyi ifade eder.

Dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmı birbirine bağlı olarak bu şekilde verilir,

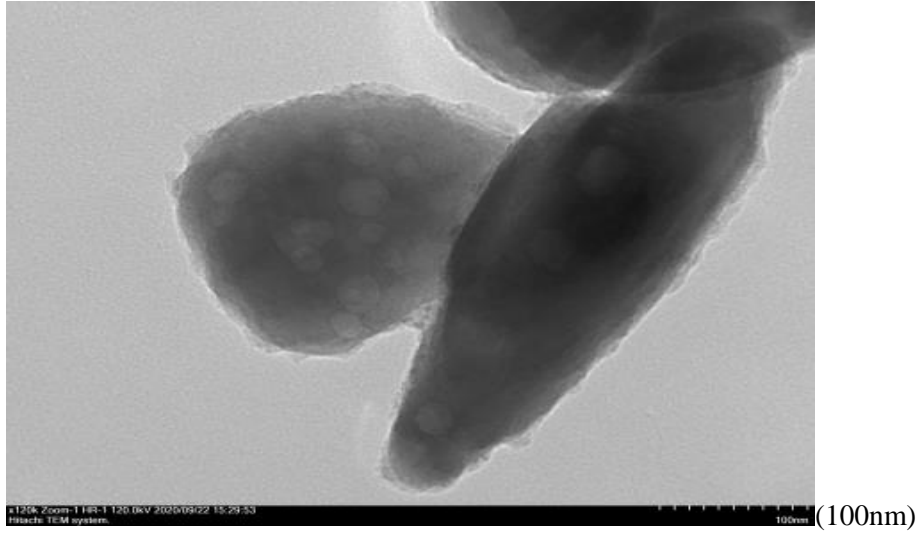
$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad (3)$$

Bu eşitlikte ki $\delta = 90 - \varphi$ ile verilir ve φ ise faz açısıdır.

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO nanoparçacık katkılı E7 nematik sıvı kristal kompozitlerin dielektrik ve kapasitan değerleri 100 Hz-15MHz frekans aralığında, sıfır doğru akım voltajında ve oda sıcaklığında HP 4194A empedans analizör ile ölçüldü ve grafik olarak verildi.

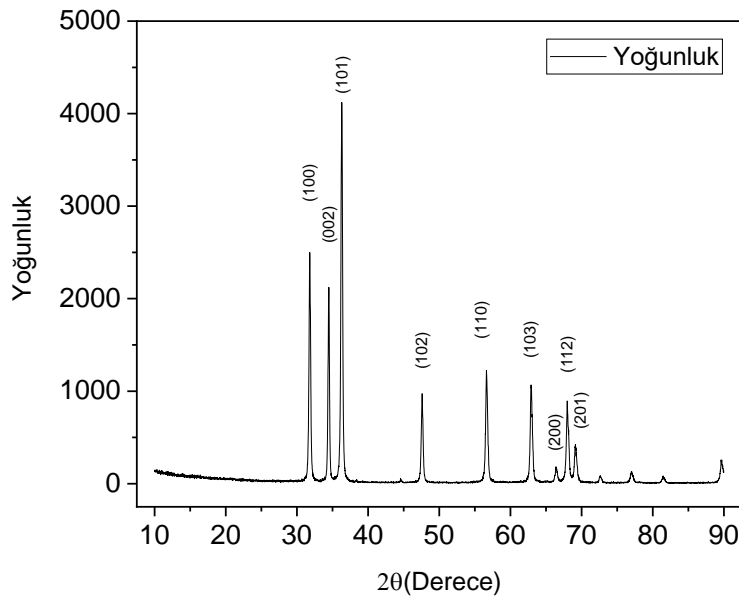
BULGULAR

Çalışmada kullanılan ZnO nanopartikülleri Materyal ve Yöntem bölümünde ifade edildiği gibi hidrotermal yöntemi ile sentezlenmiştir. Sentezlenen ZnO nanopartiküllerin geçirimli elektron mikroskobu (JEOL JEM-2100 UHR TEM) cihazı kullanılarak nanoparçacık yapısı incelendi, görüntüler Şekil 1'de verilmektedir.



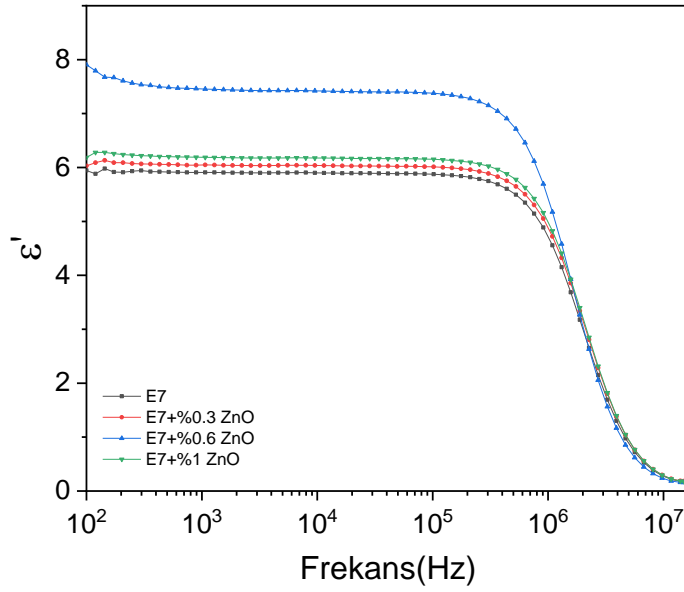
Şekil 1. ZnO Nanoparçacıkların TEM Görüntüsü

Üretilen ZnO nanopartiküllerin XRD kırınım desenleri Philips X'Pert PRO marka X-ışını difraksiyon cihazı ile incelendi ve Şekil 2'de görülmektedir. Tüm piklerin hekzagonal wurzit kristal yapısında Zincite fazına karşılık geldiği gözlemlenmektedir. XRD kırınım deseni incelendiğinde; 31.87°, 34.49°, 36.31°, 47.59°, 56.65°, 62.93°, 66.35°, 67.99° ve 69.15°'de bulunan 2θ karakteristik pikleri sırasıyla ZnO fazının (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) ve (201) kafes düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu değerler, JCPDS 36-1451 standart kart değerleriyle uyşmaktadır.



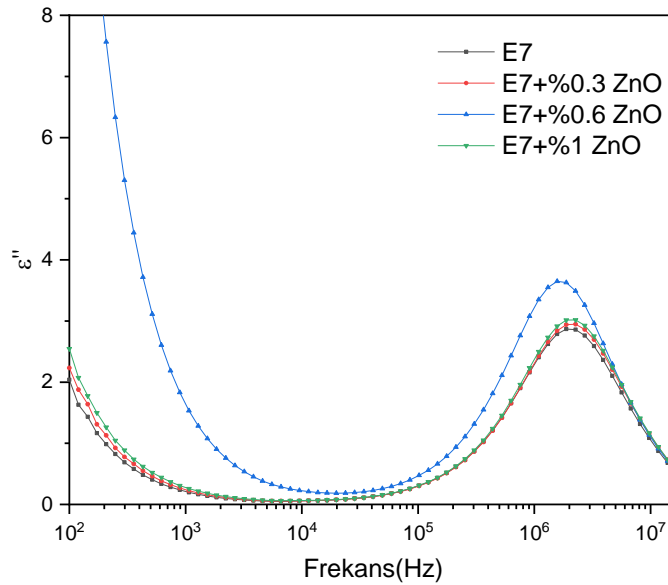
Şekil 2. ZnO Nanoparçacık X-ışını Kırınım Grafiği

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO:E7 nematik sıvı kristal kompozitin dielektrik gerçekte kısmının sıfır voltaj altında ve oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi Şekil 3'te görülmektedir. E7 nematik sıvı kristale %0.3 oranında ZnO nanopartikül katıldığında frekansa bağlı olarak dielektrik gerçekte kısmının (ϵ') değerinin arttığı, %0.6 oranında katıldığında daha fazla arttığı, %1 oranında katıldığında ise tekrar azaldığı görülmektedir. 0.1 MHz'e kadar Dielektrik değerinin sabit olup 0.1 MHz ile 1MHz aralığında azaldığı ve 1MHz'den sonra hızlı bir düşüşe geçtiği görülmektedir.



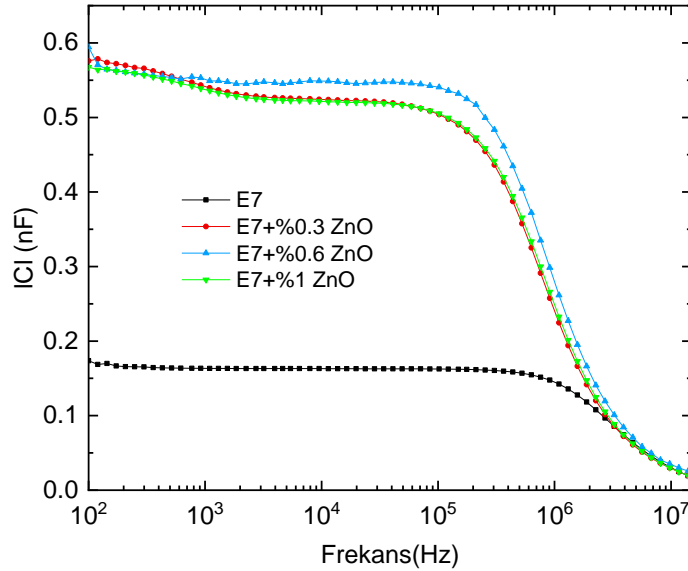
Şekil 3. Dielektrik gerçekte kısmı frekans ile değişimi

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO:E7 nematik sıvı kristal kompozitin dielektrik sanal kısmının sıfır voltaj altında ve oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi Şekil 4'te görülmektedir. E7 nematik sıvı kristale %0.6 oranında ZnO nanoparçacık katılmasıyla dielektrik sanal kısmında 100 Hz değerinde en yüksek dielektrik değeri elde edilirken, 10 kHz ile 100 kHz aralığında ise sabit olup 100 kHz'den sonra tekrar bir artış olduğu ve yaklaşık 2MHz de frekansta pik yaptığı görülmektedir. Dielektrik sanal kısmı elektrik yük ve enerji kaybı olduğu için düşük frekanslarda serbest iyonlar sebebiyle büyük, frekans yükselirken azalıyor ve sıfıra yaklaşıyor, frekans daha da yükselirken dielektrik kayıp artıyor bir maksimum değere çıktıktan sonra, frekansın artışına bağlı olarak azalıyor ve sıfır yaklaşıyor. %0.6 ZnO katılı numunenin, dielektrik kayıp veya dielektrik sabiti sanal kısmı diğer numunelere nispeten bir miktar fazla artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4. Dielektrik Sanal Kısmı Frekans ile Değişimi

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO:E7 nematik sıvı kristal kompozitin mutlak kapasitansı oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi Şekil 5'te görülmektedir. ZnO nanoparçacık katkılı E7 nematik sıvı kristal kompozitin ve saf E7 sıvı kristalin frekansa bağlı kapasitans değerlerine bakıldığında iki katından fazla kapasitansı artırdığı görülmektedir. Bunun sebebi ZnO nanoparçacıkların sıvı kristalin dielektrik katsayısını artırmasından kaynaklandığı söylenebilir. Yine en farklı kapasitans sonucunun %0.6 oranında ZnO nanoparçacık katkılanmasıyla ortaya çıktığı görülmektedir. Numunelerin kapasitans değeri 0.5 MHz kadar sabit gibi bir davranış sergilemekte, daha yüksek frekanslarda frekansın artmasıyla azalarak sifıra yaklaşmaktadır.



Şekil 5. Kapasitans Frekans ile Değişimi

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, çinko oksit nanopartikülleri hidrotermal yöntem ile sentezlendi ve karakterizasyonu yapıldı. Sentezlenen ZnO nanoparçacıklar belirli oranlarda E7 nematik sıvı kristali ile katkılanırıldı ve dielektrik sabiti gerçek ve sanal kısmı ve mutlak kapasitansı frekansa bağlı olarak oda sıcaklığında incelendi. ZnO nanoparçacıkları E7 sıvı kristalin dielektrik sabiti ve mutlak kapasitansı artırdığı sonucu elde edildi. Sıvı kristallerin elektro-optik özelliklerinin ZnO katkı konsantrasyonu ile değiştirilebileceği görüldü. Ancak sıvı kristallere katkı olarak kullanılan ZnO nanopartiküllerin belirli oranlara kadar sıvı kristalin dielektrik sabiti ve mutlak kapasitansını artırdığı, katkı oranı daha da artırılırsa aksi bir sonuçla karşılaşılacaktır. Bu çalışmada sıvı kristalin dielektrik sabiti ve kapasitansı frekansla değişiminde en yüksek değer E7 nematik sıvı kristaline %0.6 oranında ZnO nanoparçacık katkılanması ile elde edildi.

TEŞEKKÜR

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne 2019/6-11 YLS No'lu Proje kapsamında maddi destek sağlayanlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Caputo, Roberto, Antonio De Luca, Luciano De Sio, Luigia Pezzi, Giuseppe Strangi, Cesare Umeton, Alessandro Veltri, Rita Asquini, Antonio d'Alessandro, and Domenico Donisi. (2009). POLICRYPS: A Liquid Crystal Composed Nano/Microstructure with a Wide Range of Optical and Electro-Optical Applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11(2):24017.

Castellano, Joseph A. (2006). Modifying Light: Ubiquitous Today, Liquid-Crystal Displays Are the Outgrowth of More than a Century of Experimentation and Development. *American Scientist* 94(5):438–45.

Chen, Alan G., and David J. Brady. (1992). Real-Time Holography in Azo-Dye-Doped Liquid Crystals. *Optics Letters* 17(6):441–43. doi: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-17-6-441>.

- Chen, Robert H. (2011). *Liquid Crystal Displays: Fundamental Physics and Technology*. John Wiley & Sons.
- Dolgov, L., O. Yaroshchuk, and M. Lebovka. (2008). Effect of Electro-Optical Memory in Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 496(1):212–29.
- Eskalen, H., M. Okumuş, and Özgan. (2019). Electro-Optical, Thermal and Dielectric Properties of Ternary Mixture of E7/6CB/6BA Liquid Crystal Mixture Complex. *Optik* 187. doi: 10.1016/j.ijleo.2019.02.119.
- Eskalen, H., Ş. Özgan, Ümit Alver, and S. Kerli. (2015). Electro-Optical Properties of Liquid Crystals Composite with Zinc Oxide Nanoparticles. *Acta Physica Polonica, A*. 127(3).
- Eskalen, Hasan. (2020). Influence of Carbon Quantum Dots on Electro–Optical Performance of Nematic Liquid Crystal. *Applied Physics A* 126(9):708. doi: 10.1007/s00339-020-03906-7.
- Eskalen, Hasan, Süleyman Kerli, and Şükrü Özgan. (2017). Hydrothermally Produced Cobalt Oxide Nanostructures at Different Temperatures and Effect on Phase Transition Temperature and Threshold Voltage of Nematic Liquid Crystal Host. in *Cobalt*. IntechOpen.
- Jánossy, István. (1994). Molecular Interpretation of the Absorption-Induced Optical Reorientation of Nematic Liquid Crystals. *Physical Review E* 49(4):2957.
- Khoo, Iam Choon, Min-Yi Shih, Michael V Wood, Brett D. Guenther, Pao Hsu Chen, Francesco Simoni, Sergei S. Slussarenko, Oriano Francescangeli, and Liana Lucchetti. (1999). Dye-Doped Photorefractive Liquid Crystals for Dynamic and Storage Holographic Grating Formation and Spatial Light Modulation. *Proceedings of the IEEE* 87(11):1897–1911.
- Kobayashi, Shunsuke, Tomohiro Miyama, Naoto Nishida, Yoshio Sakai, Hiroyuki Shiraki, Yukihide Shiraishi, and Naoki Toshima. (2006). Dielectric Spectroscopy of Metal Nanoparticle Doped Liquid Crystal Displays Exhibiting Frequency Modulation Response. *Journal of Display Technology* 2(2):121–29.
- Köysal, Oğuz, Mustafa Okutan, and Muharrem Gökçen. (2011). Investigation of Dielectric Properties and Diffraction Efficiency Enhancements Caused by Photothermal Effect in DR9 Dye-Doped Nematic Liquid Crystal. *Optics Communications* 284(20):4924–28.
- Lee, Wei, and Chi-Shen Chiu. (2001). Observation of Self-Diffraction by Gratings in Nematic Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Optics Letters* 26(8):521–23.
- Lee, Wei, J. S. Gau, and H. Y. Chen. (2005). Electro-Optical Properties of Planar Nematic Cells Impregnated with Carbon Nanosolids. *Applied Physics B* 81(2):171–75.
- Li, Hui, Yu Zhang, Hongfei Liu, and John Wang. (2011). Large ZnO Mesocrystals of Hexagonal Columnar Morphology Derived from Liquid Crystal Templates. *Journal of the American Ceramic Society* 94(10):3267–75.
- Matharu, Avtar S., Shehzad Jeeva, and P. S. Ramanujam. (2007). Liquid Crystals for Holographic Optical Data Storage. *Chemical Society Reviews* 36(12):1868–80.
- Okutan, M., O. Köysal, S. E. San, and Y. Köysal. (2012). Electrical Parameters of Different Concentrations of Methyl Red in Fullerene Doped Liquid Crystal. *International Scholarly Research Notices* 2012.
- Özgan, Şükrü, Hasan Eskalen, and Yusuf Tapkıranlı. (2018). Thermal and Electro-Optic Properties of Graphene Oxide-Doped Hexylcyanobiphenyl Liquid Crystal. *Journal of Theoretical and Applied Physics* 12(3):169–76. doi: 10.1007/s40094-018-0307-y.
- Özgan, Şükrü, and Mustafa Okumuş. (2011). Thermal and Spectrophotometric Analysis of Liquid Crystal 8CB/8OCB Mixtures. *Brazilian Journal of Physics* 41(2–3):118–22. doi: 10.1007/s13538-011-0034-1.
- Uruş, Serhan, Mahmut Çaylar, Hasan Eskalen, and Şükrü Özgan. (2022). Synthesis of GO@ Fe₃O₄@ TiO₂ Type Organic–Inorganic Nanohybrid Material: Investigation of the Effect of Nanohybrid Doped Liquid Crystal E7 and the Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 33(7):4314–29.
- Vardanyan, Karen Kolya, Ethan Daniel Palazzo, and Robert Dominic Walton. (2011). Nematic Nanocomposites with Enhanced Optical Birefringence. *Liquid Crystals* 38(6):709–15.
- Woltman, S. J., G. D. Jay, and G. P. Crawford. n.d. *Nature Mater.* 6, 929 (2007).
- Wu, Shin-Tson. (1989). Design of a Liquid Crystal Based Tunable Electrooptic Filter. *Applied Optics* 28(1):48–52.

Yang, Deng-Ke, and Shin-Tson Wu. (2014). *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*. John Wiley & Sons.

Zharkova, G. M., and S. A. Streltsov. (2020). Effect of Yttrium Oxide Nanoparticles on the Dielectric Properties and Dynamics of the Formation of Holographic Polymer–Liquid-Crystal Composites. *Journal of Optical Technology* 87(1):23–28.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 13.05.2022
Kabul Tarihi : 02.08.2022

Received Date : 13.05.2022
Accepted Date : 02.08.2022

COMPRESSIVE BEHAVIOR OF A NOVEL CORE MATERIAL FOR SANDWICH COMPOSITES

SANDVIÇ KOMPOZİTLER İÇİN ÖZGÜN BİR ÇEKİRDEK MALZEMESİNİN BASMA DAVRANIŞI

Neslihan HAYTA¹ (ORCID: 0000-0003-1008-0887)
Gaye KAYA^{2*} (ORCID: 0000-0003-1866-4799)

¹ Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Department of Textile Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gaye KAYA, gkaya@ksu.edu.tr

ÖZET

Sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri daha çok çekirdek malzeme yapısına bağlıdır. Ticari bal peteği çekirdek malzemelerde mekanik veya darbe yükü altında meydana gelen hasar genellikle, çekirdek birim hücrelerinin delaminasyonu ve ezilmesi olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca, ticari çekirdek malzemelerin ortak özelliği, yüksek maliyetleridir. Güncel araştırmaların ekonomik yaklaşımı, sıradan malzemelerin ileri malzemelere dönüştürülmesi ilkesine dayalı çalışmalara yön vermektedir. Günümüzde çevresel etkiyi azaltmaya yönelik düşük maliyetli/yüksek performanslı ürünlerin geliştirilmesi önemli bir gereksinimdir. Bu çalışmada, özel bir dikiş tasarımı kullanılarak sandviç kompozitler için yeni bir çekirdek malzeme geliştirilmiştir. Geliştirilen çekirdek yapı, 'rombus (eşkenar dörtgen) çekirdek' olarak tanımlanmakta ve ticari çekirdek malzemelerine kıyasla daha düşük maliyet/daha yüksek performans sunmaktadır. Rombus ve ticari çekirdek yapıların basma davranışı karşılaştırılmıştır. Rombus çekirdek yapılar en yüksek basma dayanımını göstermiş ve hücre duvarlarını oluşturan dikiş bölgelerinde herhangi bir delaminasyon/ezilme olmaksızın basma yüküne maruz kaldıktan sonra yapısal bütünlüklerini korumuşlardır.

Anahtar Kelimeler: Sandviç kompozitler, çekirdek yapı, rombus çekirdek, dikiş, basma davranışı

ABSTRACT

The mechanical properties of sandwich composites are more depended on the core material structure. Damage of the commercial honeycomb core materials are generally occurred as delamination the unit-cells of core material under mechanical or impact loads. In addition, the common feature of commercial core materials is their high-cost. Economic approach of the current researches are led the studies based on the principle of converting ordinary materials into advanced materials. Nowadays, the development of low-cost/high-performance products that serve to reduce environmental impact is an important requirement. In present study, a novel core material is developed for sandwich composites by using a special stitching design. The developed core structure is defined as 'rhombus core' which offers a lower cost/higher performance compared to commercial core materials. The compressive behavior of rhombus and commercial core structures are compared. Rhombus cores showed the highest compressive strength and retained their structural integrity after compressive load without any delamination/crushing at stitching regions.

Keywords: Sandwich composites, core structure, rhombus core, stitching, compressive behavior

INTRODUCTION

As a lightweight material with high mechanical performance and energy absorption, the sandwich composites with a light cores between two strong face sheets have a great attention in many usage areas as energy and automotive (Ratwani, 2010; Kopp et al., 2004). It is possible to produce faster and more efficient solutions that save energy for many application areas by combining core and face materials. For example, the ability to reach wind energy at competitive prices per megawatt, or the design of lightweight containers or trolleys that can carry more loads and save fuel. In addition to some other material characteristics, the selection of strategic core materials in accordance with the field of use, sandwich composites can gain thermal insulation, low water absorption, sound and dielectric properties (DIAB Knowledge Series, 2017).

Damage resistance of the sandwich composites crucially depends on the core architectures (Zhou et al., 2014; Shengqing and Boay, 2013). The common commercial core materials are honeycomb or foam-based. There are many studies about the mechanical and impact properties of sandwich composites that are produced by using commercial core materials (Wei, 2022; Wu, 2019; He and Hu, 2008; Hazizan and Cantwell, 2003). A limited number of studies are performed by using novel sandwich designs to improve the both mechanical and impact damage resistances of sandwich composites. Neje and Behera (2019) produced sandwich composite structures with different cell geometrical shapes using 3D spacer fabrics combined with woven cross-links. It was revealed that the rectangular core sandwich composites with double-layered wall structure had the highest compressive strength among all structures, followed by the pile-bonded composite structure. It has been stated that the compression and bending behavior of core materials depend on the thickness of the load-bearing walls in the structure, the angle between the wall and the loading axis, and the configuration in which the walls integrate with the surface layers. Zhao et al. (2014) investigated the compression properties of 3D spacer woven composites with pile heights ranging from 5 mm to 30 mm. It was stated that as the pile heights increase, the out-of-plane compression properties decrease, while the in-plane compression properties increase substantially. Mountasir et al. (2013) developed an innovative weaving technology for the production of 3D rectangular void double-walled woven fabrics from high-performance hybrid yarns (glass/carbon/polypropylene). They stated that woven multilayer structures with load-oriented crimped fiber arrangement are suitable for high preform rigidity and a repeatable production. George et al. (2014) designed a prismatic shape braiding core material for sandwich composites. The core part of sandwich is fixed to 3D woven carbon fabric by stitching. The performance of sandwich composites under load is evaluated experimentally and numerically.

The crush response of honeycomb core sandwich composites consists of elastic buckling of the cell walls followed by a plastic buckling, separation of bonds at the cell interfaces and breaking of the resin layer (Aktay et al., 2008). The cells collapse enough that they begin to touch the opposing cell walls and the broken pieces clump together and further deformation compresses the cell wall itself (Zhang and Ashby, 1992). Sun et al. (2016) stated that the critical crushing load increased sharply with the increase of the honeycomb wall thickness and adhesive bond between cells. Paik et al. (1999) also stated that the increase in wall thickness of a honeycomb core cell delayed the onset of plastic deformation and resulted in a significant increase in ultimate and crush strengths. While the adhesive bond between neighboring cells affects the core crushing behavior of sandwich composites, it is important for sandwich composite design to consider the effects of other parameters such as overall size, cell size, foil thickness, honeycomb thickness, whole cell number, and material properties (Chawla et al., 2003).

The main damage of sandwich composites is commonly core crushing and buckling caused by the weakness of core cell-walls. The crushing and buckling parameters are more affected by the core parameters as the resistance of core cell-walls. Stitching is an effective method to improve the strength of core cell-walls which also influences the damage resistance of sandwich composites. In this study, a novel core structure is developed for sandwich composites by using a special stitching design of polypropylene (PP) fabric and compressive properties of this core material are compared with commercial core materials. In the literature, there are not any core structure manufacture based on the combining the layered woven fabric with stitching. Stitching of layered fabrics and molding the unit-cells in desired shape provide design flexibility. The developed core structures have a high potential to use in various areas such as wind blades, automotive, marine and aerospace since they can be used in both in-plane and out-of-plane directions.

MATERIALS AND METHODS

Core Structure Design and Manufacturing

In this study, a rhombus core material is manufactured for out-of-plane usage. Six layers polypropylene (PP) woven fabric (Ritas, Turkey) are stitched in the designed stitching lines. The specifications and the microscopically view of PP woven fabric are presented in Table 1 and Figure 1, respectively.

Table 1. Specifications of PP Woven Fabric

Weave type	Density (per cm)		Yarn linear density (tex)		Crimp (%)		Thickness (mm)	Weight (g/m ²)
	warp	weft	warp	weft	warp	weft		
Plain	9	5	143	238	5	5	0.85	236

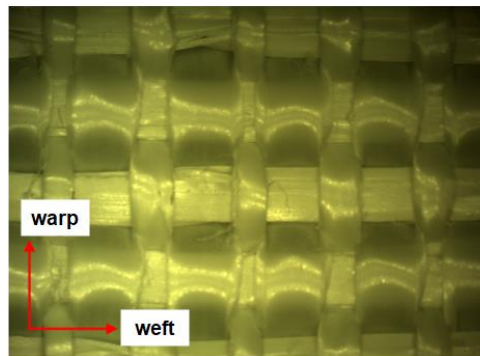


Figure 1. Microscopically View of PP Woven Fabric (×10 magnification)

Stitching is performed on a Siruba L818F-M1A (Japan) stitching machine in 6 step/cm stitching density with 100%-PP stitching yarn (Coats, Turkey) and using lock stitching type. Two different stitching widths as 36 mm (CL, unit-cell dimension: 18 mm) and 18 mm (CS, unit-cell dimension: 9 mm) are used which provide different sizes of unit-cells. Six layers PP fabric are stitched in parallel to warp direction. PP fabric dimension is 40 × 40 cm. Spaces between the layers are moulded in a frame by using the metal rods to obtain corrugated forms. These rods are positioned at perpendicular to the spaces in the layered structure for rhombus unit-cell structure (Figure 2). XPS foams are used to keep the right distance and position of unit-cells. The epoxy resin and the hardener (Hexion MGS L285 resin and Hexion H285 hardener) are mixed (100/34) and applied to stitched fabrics by hand lay-up. Then, the structure placed in the frame is held at room temperature for 24 hours to cure. Post-curing is carried out at 80°C for 1 hour in an oven. Figure 2 shows the schematic views of in-plane and out-of-plane forms of rhombus core structures. The CL and CS cores are cut in 20 mm dimensions for out-of-plane samples.

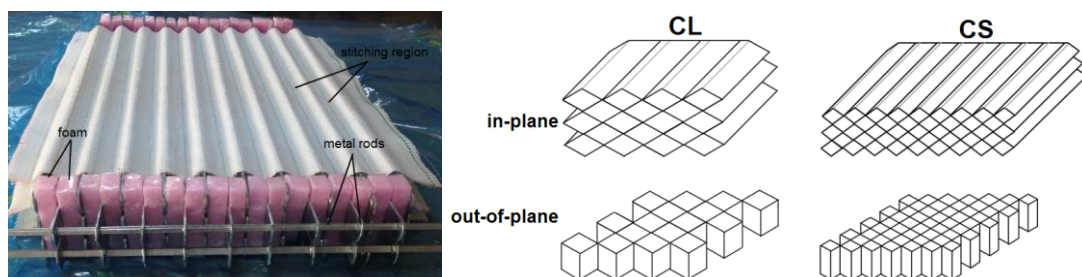


Figure 2. Schematic Views of In-Plane and Out-Of-Plane Forms of Rhombus Core Structures

Compressive Tests

Compressive tests of core structures are performed on a Zwick-Roell universal tester according to ASTM C365-16 (2016) at 0.5 mm/min testing speed. Compressive tests are performed on commercial cores of aluminium and PP honeycombs and XPS (extruded polystyrene) rigid foam for comparing purposes. Three samples were tested for each specimen. Figure 3 shows the compressive tests of core structures. The compressive strength and modulus were calculated according to formulations (1) and (2) in ASTM C365-16.

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

$$E = \frac{S \times t}{A} \tag{2}$$

where; σ : compressive strength (MPa), P: maximum load (N), A: cross-sectional area (mm²), E: compressive modulus (MPa), S: force-elongation ratio in the linear region of the curve (N/mm), t: core thickness (mm).



Figure 3. Compressive Tests of Core Structures

RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 2 defines the testes core structures. Besides CL and CS rhombus core structures, two types of aluminium honeycomb, a PP honeycomb and a XPS rigid foam are tested. XPS has the lowest density while CS core has the highest density. Thicknesses of structures are almost same except PP core.

Table 2. Definitions of Tested Core Materials

Core materials	Definition	Unit-cell shape	Unit-cell dimension (mm)	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)
CL	Rhombus core	Rhombus	18	20	75
CS	Rhombus core	Rhombus	9	20	120
XPS	Rigid foam	-	-	19	35
PP	PP honeycomb	Honeycomb	12	10	90
AL-12	Aluminium honeycomb	Honeycomb	12	20	40
AL-8	Aluminium honeycomb	Honeycomb	8	19	60

Table 3 and Figure 4 present the compressive test results of core structures. Compressive strength-deformation curves of the structures are given in Figure 5. The compressive loads of core structures are varied from 309.40 N to 4963.36 N. AL-8 core showed the highest compressive load and followed by AL-12, CS and CL core structures. Deformations of core structures are varied from 1.22% to 6.70% in which AL-12 showed the lowest deformation. XPS core had the lower load, strength and modulus values compared to other core structures as expected.

Table 3. Compressive Test Results of Core Structures

Core materials	Load (N)	Deformation (%)	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
CL	2707.98	4.09	0.79	21.71
CS	3893.01	5.26	1.96	53.71
XPS	309.40	4.03	0.12	5.57
PP	2691.47	6.70	1.08	26.04
AL-12	4713.18	1.22	0.91	100.27
AL-8	4963.36	2.63	1.11	51.21

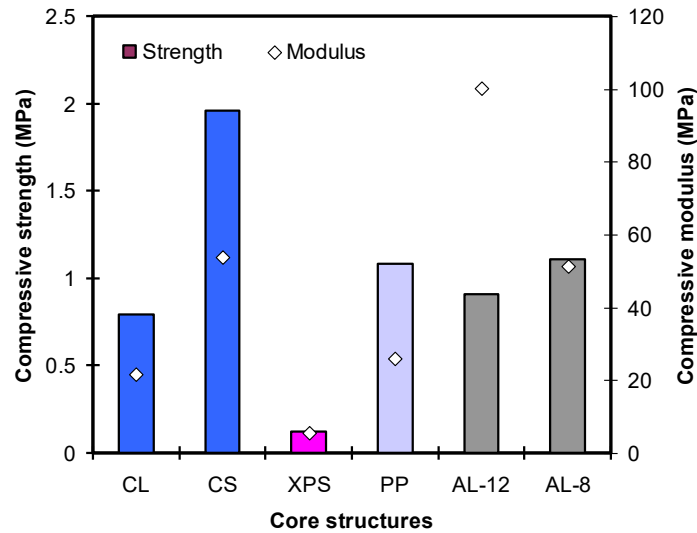


Figure 4. Compressive Strengths and Modulus of Core Structures

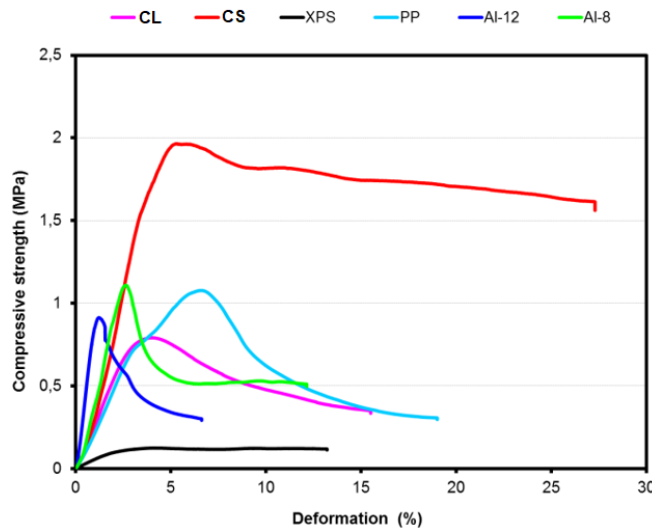


Figure 5. Compressive Strength-Deformation Curves of the Core Structures

CS rhombus core showed the highest compressive strength. Stitching was strengthened the joint regions of unit-cells. This structure was followed by Al-8 and PP structures. Compressive strength and modulus of rhombus cores were increased by the decrease in unit-cell dimensions. AL-12 showed the highest compression modulus and followed by the CS rhombus core. It was determined that the compressive strength and modulus of the CS structure developed within this study were almost 2 times higher than the commercial PP core structure and showed similar deformation. In addition, when the strength-deformation curves (Figure 5) of the core structures are examined, it is possible to conclude that the CS core structure could absorb more energy than those of the CL rhombus core and commercial cores. As seen in Figure 6, the core crushing was severely occurred in Al-12 and AL-8 structures since the adhesive bond between neighbouring cells affects the core crushing behaviour of sandwich composites. However, the CL and CS rhombus cores maintained their core cell-walls and minimized the core crushing with their strengthened cell-walls by stitching. The results of the test showed that the rhombus core structures could be an alternative to the commercially used core structures.

Also, rhombus core structures offer a considerable low cost. The cost of commercial aluminium honeycomb core is about 600 \$/m² while the cost of PP honeycomb core is almost 65 \$/m² (Kompozitnet, 2022). The estimated cost of rhombus core is about 6 \$/m². The cost analyse of core materials showed that the developed rhombus core has about 100 times lower cost than aluminium honeycomb cores and about 10 times lower cost than PP honeycomb cores.

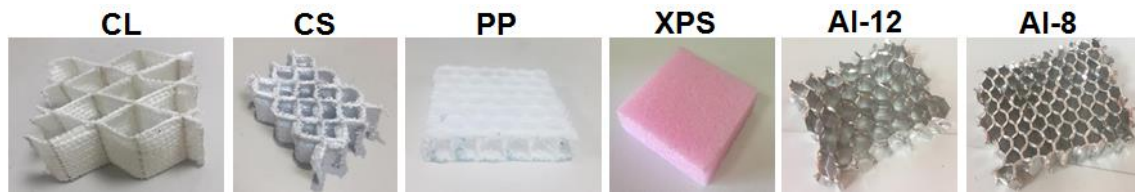


Figure 6. The Views of Core Structures after Compressive Test

CONCLUSIONS

A novel core material is developed for sandwich composites by using a special stitching design. The developed core structure is defined as rhombus core which offers a lower cost/higher performance compared to commercial core materials. The compressive behaviour of rhombus and commercial core structures are compared. The conclusions are:

- CS rhombus core showed the highest compressive strength and followed by Al-8 and PP structures.
- AL-12 showed the highest compression modulus and followed by the CS rhombus core.
- Stitching was strengthened the joint regions of unit-cells.
- The compressive strength and modulus of the CS structure developed within this study were almost 2 times higher than the commercial PP core structure and showed similar deformation.
- The core crushing was severely occurred in Al-12 and AL-8 structures since the adhesive bond between neighbouring cells affects the core crushing behaviour of sandwich composites. However, the CL and CS rhombus cores maintained their core cell-walls and minimized the core crushing with their strengthened cell-walls by stitching.
- The compressive test results showed usage areas as with their low-cost/high-performance properties.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financially supported by Kahramanmaraş Sutcu Imam University Scientific Research Unit. Project number: 2017/7-174YLS.

REFERENCES

- Aktay, L., Johnson, A.F. & Kröplin, B.H. (2008). Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(9), 2616-2630.
- ASTM C365-16, (2016). Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.
- Chawla, A., Mukherjee, S., Kumar, D., Nakatani, T. & Ueno M. (2003). Prediction of crushing behaviour of honeycomb structures. *International Journal of Crashworthiness*, 8(3), 229-235.
- DIAB Knowledge Series. (2017). Sandwich composites and core materials". www.diabgroup.com/.../DIA0151CoreGuide82pagesEN30Nov2012Mar.
- George, T., Deshpande, V.S., Sharp, K., Wadley, H.N.G. (2014). Hybrid Core Carbon Fibre Composite Sandwich Panels: Fabrication and Mechanical Response, *Composite Structures*, 108, 696-710.
- Hazizan, M. A., & Cantwell, W. J. (2003). The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure. *Composites Part B: Engineering*, 34(8), 679-687.
- He, M., & Hu, W. (2008). A study on composite honeycomb sandwich panel structure. *Materials & Design*, 29(3), 709-713.
- Kompozitnet. (2022). <https://www.kompozit.net/>.
- Kopp, R., Abratis, C., & Nutzman, M. (2004). Lightweight sandwich sheets for automobile applications. *Production Engineering Research and Development*, 11(2), 55-60.
- Mountasir, A., Hoffmann G., Cherif, C., Löser, M., Mühl, A., & Großmann, K. (2013). Development of non-crimp multi-layered 3D spacer fabric structures using hybrid yarns for thermoplastic composites. *Procedia Materials Science*, 2, 10-17.
- Neje, G., Behera, B.K. (2019). Investigation of mechanical performance of 3D woven spacer sandwich composites with different cell geometries. *Composites Part B*, 160, 306-314.

- Paik, J.K., Thayamballi, A.K. & Kim, G.S. (1999). The strength characteristics of aluminium honeycomb sandwich panels, *Thin-Walled Structures*, 35, 205-231.
- Ratwani, M.M. (2010). Composite Materials and Sandwich Structures – A Primer, *Rto-En-Avt., NATO*, 156, 1-16.
- Sun, Z., S. Shi, X. Guo, X. Hu, & H. Chen. (2016). On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core. *Composites Part B: Engineering*, 94, 245-252.
- Wei, X., Wu, Q., Gao, Y., Yang, Q., & Xiong, J. (2022). Composite honeycomb sandwich columns under in-plane compression: Optimal geometrical design and three-dimensional failure mechanism maps. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 91, 104415.
- Wu, X., Yu, H., Guo, L., Zhang, L., Sun, X., & Chai, Z. (2019). Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure. *Composite Structures*, 213, 165-172.
- Xu, G., Yang, F., Zeng, T., Cheng, S., & Wang, Z. (2016). Bending Behaviour of Graded Corrugated Truss Core Composite Sandwich Beams, *Composite Structures*, 138, 342-351.
- Zhang, J. & Ashby, M.F. (1992). The out-of-plane properties of honeycomb. *International Journal of Mechanical Science*, 34 (6), 475-489.
- Zhao, C.Q., Li, D.S., Ge, T.Q., Jiang, L., & Jiang, N. (2014). Experimental study on the compression properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites. *Materials and Design*, 56, 50-59.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.05.2022
Kabul Tarihi : 06.08.2022

Received Date : 20.05.2022
Accepted Date : 06.08.2022

STABİLİZASYONDA KİREÇ VE TÜFLERİN BİRLİKTE KULLANIMININ BENTONİT DAYANIMINA ETKİSİ

THE EFFECT OF USING LIME AND TUFF TOGETHER IN STABILIZATION ON THE STRENGTH ON BENTONITE

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU¹ (ORCID: 0000-0002-3135-5926)

¹ Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, yaslan@firat.edu.tr

ÖZET

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri kullanılarak killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanan stabilizasyon, kolay uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem olması nedeniyle günümüzde çok fazla tercih edilmektedir. Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak farklı özellikteki tüfler ile birlikte sönmüş kireç kullanımının bentonitin serbest basınç ve drenajsız kayma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla farklı oranlarda sönmüş kireç ile asidik ve bazik karakterli tüflerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı örnekler hazırlanmış ve bu örnekler optimum su içeriği değerinde Standard proktor ile sıkıştırılmıştır. Optimum su içeriği değerinde hazırlanan örneklerde hem kür öncesi, hem de 28 günlük kür sonrasında serbest basınç ve konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda kür sonrasında tüm örneklerin serbest basınç dayanımı (q_u) ve kohezyon (c) değerleri önemli oranda artış göstermekle birlikte %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örneklerde en büyük q_u ve c değerleri belirlenmiştir. Kür sonrasında katkısız kilin q_u değeri 249.10 kN/m^2 iken, %5 KRÇ katkısıyla 437.39 kN/m^2 , %10 KRÇ katkısıyla ise 712.97 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kür sonrasında kilin c değeri 110.82 kN/m^2 iken %5 KRÇ katkısıyla 225.59 kN/m^2 , %10 KRÇ katkısıyla ise 380.51 kN/m^2 olduğu bulunmuştur. Ancak tuf katkılarının kullanılmasıyla birlikte serbest basınç dayanımı q_u ve c değerlerinin bir miktar azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: dayanım, kil, kompaksiyon, stabilizasyon, tuf

ABSTRACT

Stabilization, which is defined as the improvement of the geotechnical properties of clayey soils by using additives with pozzolanic properties, is highly preferred today because it is an easily applicable and economical method. In this study, the effects of using slaked lime together with tuffs of different properties on unconfined compressive and the undrained shear strength of bentonite were investigated. For this purpose, samples in which lime and acidic and basic tuffs in different proportions were used as additives were prepared and these samples were compressed with Standard Proctor at optimum water content. Unconfined compressive and unconsolidated-undrained (UU) triaxial compressive strength tests were performed on the samples prepared at optimum water content both before curing and after 28 days of curing. As a result of the experimental studies, although the unconfined compressive strength (q_u) and cohesion (c) values of all samples increased significantly after curing, the highest q_u and c values were determined in the samples with 5% KRC and 10% KRC. q_u value of the pure clay after curing was 249.10 kN/m^2 , while it was determined as 437.39 kN/m^2 with 5% KRC additive and 712.97 kN/m^2 with 10% KRC additive. While the c value of the clay after curing was 110.82 kN/m^2 , it was found to be 225.59 kN/m^2 with 5% KRC and 380.51 kN/m^2 with 10% KRC. However, with the use of tuff additives, it was determined that the q_u and c values slightly decreased.

Keywords: strength, clay, compaction, stabilization, tuff

GİRİŞ

Zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilir ve böyle durumlarda inşaat yeri değiştirilebilir, istenilen özelliklere sahip olmayan zemin kaldırılarak uygun zemin yerleştirilebilir fakat bu çözümler çoğunlukla ekonomik değildir. Zemine katkı maddeleri eklenerek yapılan stabilizasyon kolay uygulanabilmesi ve ekonomik olmasından dolayı çok fazla tercih edilmektedir. Killerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan stabilizasyon, mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak için geoteknik özelliklerin değiştirilmesi işlemidir (Attoh-Okine, 1995). Zemin stabilizasyonu amacıyla çimento, uçucu kül, kireç, silis dumanı, tuf, şeyl, volkanik cam, diatomit ve volkanik kül gibi katkı maddeleri zemine ait elementlerle kimyasal reaksiyona girerek iyileştirirken (Asgari et al., 2015; Goodarzi et al., 2015; Voottipruex and Jamsawang, 2014; Lin et al., 2013; Mahamedi and Khemissa, 2013; Wang et al., 2013; Azadegan et al., 2012; Cuisinier et al., 2011; Harichane et al., 2011; Hossain and Mol, 2011; Ramadas et al., 2011; Aksoy vd., 2008; Al-Rawas et al., 2005; Mallela et al., 2004; Kalkan ve Akbulut, 2004; Puppala et al., 2003; Boardman et al., 2001; Little, 1995), diğer katkı malzemelerinden olan jeofiber ve jeogrid ise fiziksel etkileri ile zemin özelliklerinde iyileşme sağlamaktadır (Chong and Kassim, 2014; Yang et al., 2012). Bu katkı malzemeleri puzolan olarak tanımlanmaktadır ve puzolan, ASTM C 618 (2012)'ye göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan, fakat uygun nem şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürünler ortaya çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelerdir. Doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Doğal puzolanlar başlangıcından sonra değişikliğe uğramış volkanik kökenli veya sedimanter kayalardan oluşur ve kökeni çoğunlukla volkanik camlar, tüfler ve volkanik kül gibi piroklastik kayalardır. Killer, şeyller ve diatomitler ise ısı işlem görmüş doğal puzolanlardır. Yapay puzolanlar ise silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerdir (Ün, 2007). Bu katkı malzemelerinin en önemli özelliği puzolanik reaksiyon oluşturmalarıdır. Katkı malzemeleri öncelikle zeminin su içeriğinin azalmasına ve daha kolay işlenebilir hale gelmesini sağlarken uzun vadede ise zeminin dayanım, sıkışabilirlik ve duraylılık özelliklerini iyileştirmektedir (Geiman, 2005; Mallela et al., 2004; Wild et al., 1996; Locat et al. 1990). Stabilizasyonla zemin dokusu, zemini oluşturan danelerin büyük boyutlu kümeler oluşturmasıyla değişmektedir. Zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriğinin artmasını, maksimum kuru yoğunluğunun ise azalmasını sağlayan bu olay topaklanma olarak tanımlanmaktadır (Kinuthia et al., 1999). Bu katkı malzemelerinden kireç katkı olarak killi bir zemine eklendiği zaman, katyon değişimi ve flokülasyon gibi kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir ve bu reaksiyonların bütünü puzolanik reaksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon sonucu kısa vadeli, puzolanik reaksiyonlar sonucu ise uzun vadeli iyileşmeler oluşmaktadır (Özaydın, 2012).

Stabilizasyonda kullanılacak katkı malzemesinin doğada bol miktarda bulunması, ekonomik ve çevre dostu olması oldukça önemlidir. Pomza, perlit ve tuf gibi malzemelerin zemin iyileştirmede kullanılabilirliği (Çelik 2020; Çimen vd. 2020; Çimen ve Coşan 2019; Yılmaz 2017; Calik and Sadoglu 2014; Bulut ve Tanaçan 2009; Kavlak, 2008; Bulut, 2007; Fındık, 2005; Okucu, 1998; Keskin ve Çimen, 1997) tarafından araştırılmıştır. Çelik (2020) zemin stabilizasyonunda pomza taşının incelik etkisinin incelenmesi başlıklı çalışmasında inceltmiş pomza taşı kullanılmasının hazırlanan numunelerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneyler sonucunda, kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri üzerinde, pomza taşının inceltilmesinin etkisinin sınırlı düzeyde olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı kireçsiz örneklerin dayanımlarında, inceltmiş pomza taşının katkı maddesi olarak kullanılmasının, kireçli örneklerin dayanım ve durabilitelelerinde ham pomza kullanımına göre daha fazla iyileştirme sağladığını belirlemiştir. Doğal zemine göre, sadece kireç eklenerek hazırlanan örneğin likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma, plastik limit değerinde ise artış meydana geldiğini tespit etmiştir. Çimen vd. (2020) üç farklı bölgeye ait pomzanın yüksek plastisiteli kile etkisinin karşılaştırmasını yaptığı çalışmada pomza türü ve oranının kilin likit limit, plastik limit, plastisite indisi, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, şişme basıncı ve serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimleri incelemiştir. Çalışmacılar pomza-kil-kireç üçlü karışımlarında pomza oranının artması ile likit limit, plastisite indisi, optimum su muhtevası ve şişme basıncının azaldığını, plastik limit ve serbest basınç direncinin ise arttığını belirlemişlerdir. Çimen ve Coşan (2019) yüksek plastisiteli kile, ağırlıkça belirli oranlarda volkanik tuf ve amorf silika karıştırdıkları çalışmada karışımların mühendislik özelliklerinin değişimi incelemiştir. Çalışmacılar daha sonra kile %5 oranında kireç katarak volkanik tuf ve amorf silika katkılı deneyleri tekrarlamış ve kıvam limitleri, standart kompaksiyon, serbest basınç ve sabit hacimli şişme basıncı deneyleri yapmıştır. Deneylere göre volkanik tuf katkısının kilin serbest basınç mukavemetini bir miktar arttırdığı, şişme basıncının önce azaldığı, daha sonra arttığı, kireç ve volkanik tuf katkılı deneylerde ise serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı, şişme basıncının daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Kireç ve amorf silika katkılı deneylerde ise şişme basıncının daha fazla azaldığı ve serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı ifade edilmiştir. Serbest basınç mukavemetinin artmasında aynı orandaki amorf silika katkısı daha etkili olurken,

şişme basıncının azalmasında ise volkanik tuf daha etkili olmuştur. Yılmaz (2017) Bu çalışması kapsamında puzolanik katkı olarak killi bir zeminin stabilizasyonunda tek başına çimentolaşma kabiliyeti yetersiz olan perlitin, kullanılabilirliğini incelemiştir. Yüksek CaO içeriğinden dolayı bağlayıcı olarak kireci seçen çalışmacı zemin, %6 kireç ve oranlarında farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15, %20, %25, %30) perlit karıştırmıştır. Puzolanik katkı olarak kullanılan perlit doğal ve ince öğütülmüş şekilde stabilizasyonda kullanılmış, karışımların indeks ve dayanım özelliklerini incelenmiştir. Perlitin inceltilmesiyle daha düşük perlit oranlarında daha yüksek mukavemet değerlerinin meydana geldiğinin belirlendiği çalışmada, puzolanik katkı olan perlitin inceltilmesinin dayanım değerlerini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Calik ve Sadoglu (2014) tarafından yapılan çalışmada montmorillonit ve nontronit gibi simektit grubu kil mineralleri içeren killi bir zeminin perlit ve kireç ile stabilizasyonu deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada %8 kireçli (zeminin optimum kireç oranı) ve kirecsiz olarak %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 perlit eklenerek deney karışımları hazırlanmış ve karışımların kompaksiyon, Atterberg limitleri, şişme, serbest basınç dayanımları gibi geoteknik özellikleri ve bu özelliklerin perlit oranına ve zamana bağlı olarak değişimleri belirlenmiştir. Deney sonuçları, zeminin perlit ve kireç kombinasyonu ile stabilizasyonunun, geoteknik özellikleri tek başına perlit veya kireçten daha iyi geliştirdiğini göstermiştir. Bulut Karaca ve Tanaçan (2009) tarafından perlitin puzolanik özeliğinden yararlanılarak kullanılması, olanaklarının araştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılmasının amaçlandığı çalışmada perlitin puzolanik aktivitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin, aktiviteyi artırıcı yönde geliştirilmesi olanakları, deneysel yöntemler ile araştırılmıştır. Araştırma sonucunda perlitin puzolanik aktivite gösterdiği kanıtlanmış, perlitli kireç harcının aktivite gelişimini etkileyen faktörler belirlenmiş ve perlitin puzolan malzeme olarak geliştirilebilme potansiyeli olduğu saptanmıştır. Stabilizasyon konusunda yapılan çalışmalarda katkı malzemelerinin zeminin kıvam limitlerinde, dayanım ve duraylılığında, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli, şişme basıncı ve hacimsel değişim özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışma ile farklı oranlarda sönmüş kireç ve asidik-bazik tuf katkılarının birlikte kullanılarak stabilizasyondaki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Tek katkı malzemesi ve iki katkı malzemesinin beraber kullanılmasının kilin serbest basınç ve kayma dayanımındaki değişimin belirlenmesi ve ayrıca kilin stabilizasyonunda doğada bol olarak bulunan doğal ve çevreci olan tuf katkılarının kullanılabilirliğinin belirlenmesi ülke ekonomisi açısından da önem taşımaktadır. Yapılan laboratuvar deneyleriyle stabilizasyonda en fazla etkiyi gösteren karışım tipi ve oranının tespit edilmesi ve iki farklı özellikteki tufün etkinliğinin ortaya konması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

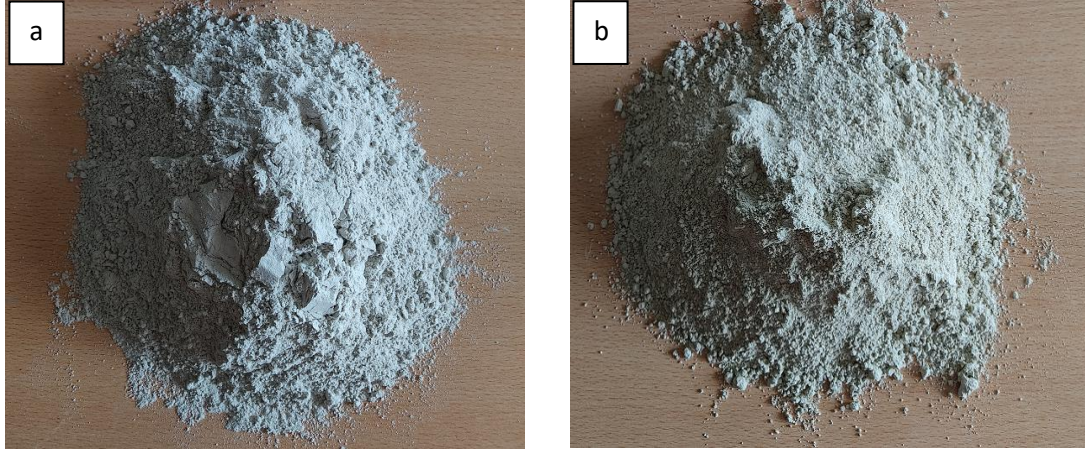
Bentonit ve Katkı Malzemelerinin Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, Tokat-Reşadiye (Türkiye) kil ocağında üretilen katkısız bentonit kullanılmıştır (Şekil 1). Alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda meydana gelen, montmorillonit ailesine bağlı bir kil minerali olan bentonit kili, (Önem, 2000; Akbulut, 1996) kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Su ile etkileşime geçtiğinde şişerek hacimleri artan, iyonlaşma kapasitesi yüksek olan bentonitin dane boyu 2 µm (0.002 mm) veya daha küçüktür ve plastisitesi yüksektir. Kolloidal özelliğe sahip, yoğunluğu yaklaşık 2.6 gr/cm³ olan bir kil türüdür. (Genç, 2009). XRF analiz sonuçlarına göre bu çalışmada kullanılan kilin Na-bentonit olduğu belirlenmiştir (Aslan Topçuoğlu, 2020). Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tuf Gümüşhane ili ve civarında yüzlek veren Kızılkaya Formasyon'undan (Şekil 2a), bazik karakterli tüfler ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzleme veren Karabakır Formasyon'undan (Şekil 2b) alınmıştır. XRF analizi sonuçlarına göre SiO₂ miktarı %63'den fazla olan ve Kızılkaya Formasyonundan alınan tüflerin asidik karakterli olduğu, kimyasal olarak SiO₂ miktarı %45'den az olan ve Karabakır Formasyonu'na ait tüflerin ise bazik karakterli olduğu tespit edilmiştir (Aslan Topçuoğlu, 2020).



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Bentonit Kili

TS 25'e (2008) göre traslarda aranılan kimyasal özelliklerde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ en az %70, MgO en çok %5, SO_3 en çok %3, rutubet en çok %10 olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan asidik tüfün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %90.27, MgO %0.19, SO_3 %0.90'dır ve bu değerler çalışmada kullanılan asidik karakterli tüfün TS 25 (2008)'e göre tras olarak kullanılabilme özelliğinin olduğunu göstermektedir. Ancak bazik tüf TS 25'e (2008) göre değerlendirildiğinde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %42.04, MgO miktarının %2.11, SO_3 miktarının ise %0.036 olmasından dolayı tras olarak kullanılabilme şartlarını sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 2. a. Çalışmada Kullanılan Asidik Tüf b. Bazik Tüf

Çalışmada kullanılan sönmüş kireç ise kimyasal malzeme satan firmalardan temin edilmiştir (Şekil 3). Mineralojik analizde asidik tüfün tek başına zeminde puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonları başlatacak gerekli aktif CaO oranına sahip olmaması (yaklaşık %0.76) nedeniyle sönmüş kireç gibi %70.10 aktif CaO içeren bir bağlayıcı ile eksik olan bu etken maddenin tamamlanması düşünülmüştür. Bazik tüf ise %28.70 oranında CaO içermektedir. Bundan dolayı tek ve iki katkı malzemesinin kullanıldığı karışımlar hazırlanarak mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan bentonit kili (K), sönmüş kireç (KRÇ), asidik tüf (AT), bazik tüf (BT) sembolleriyle gösterilmiş olup, bentonit ve katkı malzemelerinin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmada Kullanılan Sönmüş Kireç

Tablo 1. Bentonit ve Katkı Malzemelerinin Kimyasal Özellikleri (Aslan Topçuoğlu, 2020).

Ana Oksit (%)	K	KRÇ	AT	BT
SiO ₂	62.50	1.55	69,10	31.40
Al ₂ O ₃	17.60	0.44	20.70	7.15
Fe ₂ O ₃	3.63	0.14	0.47	3.49
MgO	2.00	0.57	0.19	2.11
CaO	2.86	70.10	0.76	28.70
Na ₂ O	2.58	0.26	0.39	0.60
K ₂ O	0.92	0.07	1.43	0.87
TiO ₂	0.32	0.04	0.29	0.41
MnO	0.10	0.05	<0.01	0.03
P ₂ O ₅	0.14	0.04	0.06	0.09
SO ₃	0.076	1.39	0.90	0.036
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Sr	0.073	0.015	0.024	0.033
Kızdırma Kaybı	6.60	26.40	5.50	24.80

Laboratuvar Çalışmaları

Bu çalışma kapsamındaki laboratuvar çalışmalarında, örnek hazırlama, katkısız kilin ve katkılı örneklerin standart proktor, serbest basınç ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Örnek Hazırlama

Asidik ve bazik karakterli tüfler Gümüşhane ve Elazığ bölgesinde yapılan arazi çalışması ile derlenmiş ve laboratuvara getirilen tüf blokları öğütülerek 200 nolu elekten elenmiştir. Öncelikle kil etüvde 24 saat 105°C'de kurutulduktan sonra kile farklı oranlarda sönmüş kireç, asidik tüf ve bazik tüf katkıları eklenmiş iyice karıştırılmış ve katkılı kil karışımlarının üzerine distile su eşit olarak püskürtülmüş el ile tekrar karıştırılmıştır. Karıştırma işleminin süresi zemin ve katkı malzemelerinin homojenliğini sağlamak amacıyla 5 dakika olarak seçilmiştir. Hazırlanan silindirik örneklerin yarısında deneyler hemen gerçekleştirilmiş, diğer yarısı ise selofan ile sarılarak nemini kaybetmemesi için desikatör içinde 28 günlük kürde bekletilmiştir. Kullanılan karışımlara ait katkı oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Karışımlara Ait katkı Oranları

Örnek	K (%)	AT (%)	BT (%)	KRÇ (%)
K	100			
K + % 5 AT	95	5		
K + % 5 BT	95		5	
K + % 10 AT	90	10		
K + % 10 BT	90		10	
K + % 5 KRÇ	95			5
K + % 10 KRÇ	90			10
K + % 5 AT + % 5 KRÇ	90	5		5
K + % 5 BT + % 5 KRÇ	90		5	5
K + % 10 AT + % 5 KRÇ	85	10		5
K + % 10 BT + % 5 KRÇ	85		10	5
K + % 5 AT + % 10 KRÇ	85	5		10
K + % 5 BT + % 10 KRÇ	85		5	10
K + % 10 AT + % 10 KRÇ	80	10		10
K + % 10 BT + % 10 KRÇ	80		10	10

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT Bazik Tüf

Standard Proktor Deneyi

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında kile kuru ağırlıkça %5 AT, %5 BT, %10 AT, %10 BT, %5 KRÇ, %10 KRÇ, %5 AT + %5 KRÇ, %5 BT + %5 KRÇ, %10 AT + %5 KRÇ, %10 BT + %5 KRÇ, %5 AT + %10 KRÇ, %5 BT + %10 KRÇ, %10 AT + %10 KRÇ, %10 BT + %10 KRÇ katkıları eklenerek hazırlanmış olan katkılı örneklerde ASTM D 698 (2012) standardına göre standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu deney, 30.5 cm

yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp (mold) içerisine sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma ile belirlenen Standard proktor deneylerine ait sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 4. a. Standard Proktor Deneyinin Yapılışı **b.** Proktor Kalıbında Sıkıştırılmış Örnek

Katkısız kilin w_{opt} değeri %38.50, γ_{kmax} değeri ise 12.36 kN/m^3 olarak bulunmuştur. En büyük w_{opt} değeri %10 AT + %10 KRÇ, en küçük w_{opt} değeri ise %10 AT katkılı karışımda tespit edilmiştir. Ayrıca en büyük γ_{kmax} değeri %5 BT, en küçük γ_{kmax} değeri ise %10 AT + %10 KRÇ katkılı örnekte belirlenmiştir.

Tüflerin özgül ağırlığının kilin özgül ağırlığından daha küçük olması nedeniyle karışımların γ_{kmax} değerlerinde azalma meydana gelmiştir. %10 KRÇ katkılı karışımlarının w_{opt} değerleri %5 KRÇ katkılı karışımlara göre daha fazladır. Ayrıca %10 KRÇ katkılı karışımlarının γ_{kmax} değerlerinin %5 KRÇ katkılı karışımların γ_{kmax} değerlerinden daha küçük olduğu belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Standart Proktor Deneylerine Ait Sonuçlar

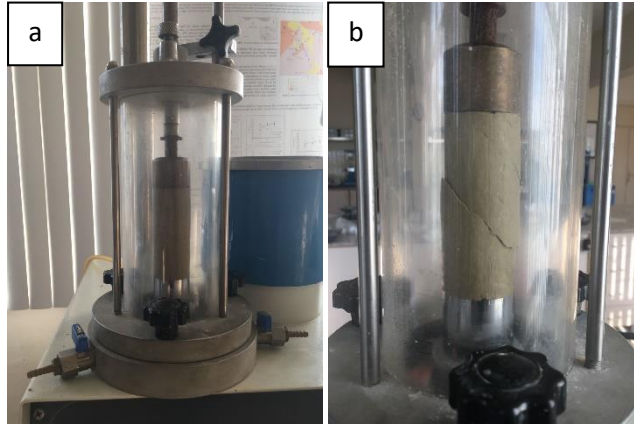
Örnek	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m^3)
K	38.50	12.36
K + %5 AT	48.00	10.77
K + %5 BT	40.00	10.98
K + %10 AT	39.00	10.65
K + %10 BT	46.10	10.60
K + %5 KRÇ	40.91	10.49
K + %10 KRÇ	43.00	10.30
K + %5 AT + %5 KRÇ	54.00	9.91
K + %5 BT + %5 KRÇ	50.00	9.71
K + %10 AT + %5 KRÇ	55.51	9.81
K + %10 BT + %5 KRÇ	51.00	9.75
K + %5 AT + %10 KRÇ	65.00	8.83
K + %5 BT + %10 KRÇ	56.00	9.61
K + %10 AT + %10 KRÇ	70.00	8.53
K + %10 BT + %10 KRÇ	57.00	9.51

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT Bazik Tüf

Serbest Basınç Deneyi

Katkısız kil ve katkılı örnekler optimum su içeriğinde sıkıştırıldıktan sonra serbest basınç dayanımları (q_u) ASTM D2166M-16 (2016) standardına göre gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Deneyde boy uzunluğu çapının iki katı olacak şekilde silindirik örnekler hazırlanmış ve hem kür öncesinde hem de 28 günlük kür sonrasında deneyler yapılmıştır (Şekil 5).

Deney sonuçlarına göre katkısız kilin kür öncesi q_u değeri 206.93 kN/m^2 , kür sonrası q_u değeri ise 249.10 kN/m^2 olarak bulunmuştur. Katkılı örneklerin kür öncesi q_u değerleri $115.30\text{-}280.48 \text{ kN/m}^2$ arasında, kür sonrası ise q_u değerleri ise $162.10\text{-}712.97 \text{ kN/m}^2$ arasında değişmektedir (Tablo 4).



Şekil 5. a. Serbest Basınç Deneyi Öncesi Örnek b. Deney Sonrası Örnek

Tablo 4. Serbest Basınç Dayanımı Deneylerine Ait Sonuçlar

Örnek	q_u (kN/m ²)	
	Kürsüz	28 günlük kür
K	206.93	249.10
K + %5 AT	120.25	185.20
K + %5 BT	115.30	162.10
K + %10 AT	129.15	192.23
K + %10 BT	120.13	170.11
K + %5 KRÇ	200.06	437.39
K + %10 KRÇ	280.48	712.97
K + %5 AT + %5 KRÇ	149.07	306.96
K + %5 BT + %5 KRÇ	146,12	288.33
K + %10 AT + %5 KRÇ	155.65	314.11
K + %10 BT + %5 KRÇ	150.20	304.80
K + %5 AT + %10 KRÇ	220.58	615.88
K + %5 BT + %10 KRÇ	213.24	594.30
K + %10 AT + %10 KRÇ	240.25	627.12
K + %10 BT + %10 KRÇ	235.00	610.59

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi

Katkısız ve katkılı kil örnekleri optimum su içeriğinde sıkıştırılarak örneklerin kohezyon (c) değerini belirlemek için ASTM D2850-15 (2015) standardına göre UU tipi üç eksenli basınç deneyi boyu çapının iki katı olan örneklerde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Deneyler 28 günlük kür sonrasında tekrar yapılmıştır.

Üç eksenli sıkışma deneyi sonuçlarına göre katkısız kilin kür öncesi c değeri 98.07 kN/m², kür sonrası c değeri ise 110.82 kN/m² olarak bulunmuştur. Katkılı örneklerin kür öncesi c değerleri 57.22-133.38 kN/m² arasında, kür sonrası c değerleri ise 112.65-380.51 kN/m² arasında değişmektedir (Tablo 5).



Şekil 6. Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deney Sonrası Örneklerdeki Yenilmeler

Tablo 5. Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyine Ait Sonuçlar

Örnek	c (kN/m ²)	
	Kürsüz	28 günlük kür
K	98.07	110.82
K + %5 AT	60.01	115.98
K + %5 BT	57.22	112.65
K + %10 AT	63.21	127.11
K + %10 BT	60.29	118.00
K + %5 KRÇ	125.53	225.59
K + %10 KRÇ	133.38	380.51
K + %5 AT + %5 KRÇ	82.38	161.82
K + %5 BT + %5 KRÇ	81.40	124.55
K + %10 AT + %5 KRÇ	87.01	172.45
K + %10 BT + %5 KRÇ	84.68	145.91
K + %5 AT + %10 KRÇ	68.65	294.21
K + %5 BT + %10 KRÇ	66.69	283.42
K + %10 AT + %10 KRÇ	73.20	335.50
K + %10 BT + %10 KRÇ	70.63	325.00

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

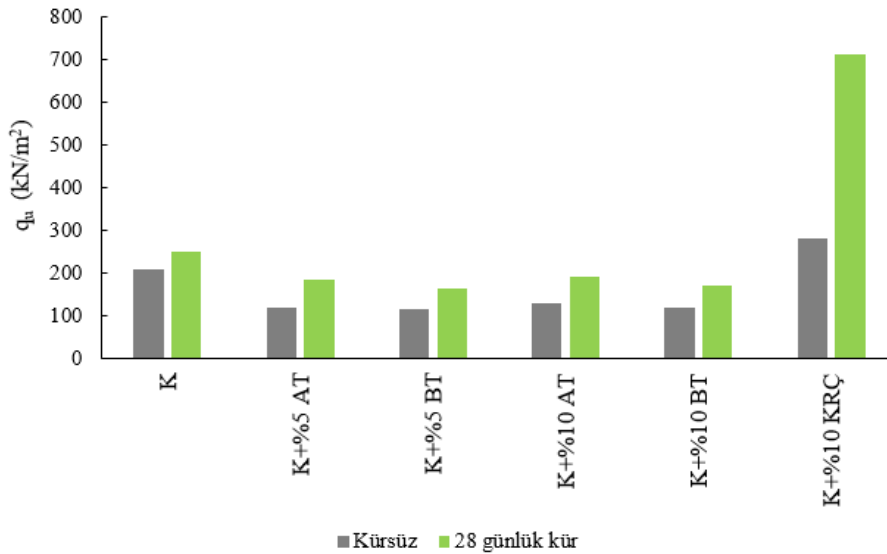
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi tek katkı malzemesi ve iki katkı malzemesinin kullanıldığı karışımlar olmak üzere iki grupta yapılmıştır.

Tek Katkı Malzemesi Kullanılarak Hazırlanan Örneklerin Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u ve c Değerlerinin Karşılaştırılması

Tek katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerde kür öncesi q_u değerleri 115.30-280.48 kN/m² arasında, kür sonrası q_u değerleri ise 162.10-712.97 kN/m² arasında değişmektedir (Tablo 4, Şekil 7).

Kür öncesinde katkısız kile göre, %10 KRÇ katkılı örnek hariç tüm örneklerde serbest basınç dayanımı azalmıştır. Kür sonrasında ise q_u değerleri %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örneklerde belirgin oranda artmış, ancak asidik ve bazik tüfün farklı oranda kullanıldığı örneklerde azalmıştır. Hem kür öncesi hem de kür sonrası en büyük q_u değeri %10 KRÇ katkılı örnekte, en küçük q_u değeri ise %5 BT katkılı örnekte belirlenmiştir (Tablo 4).

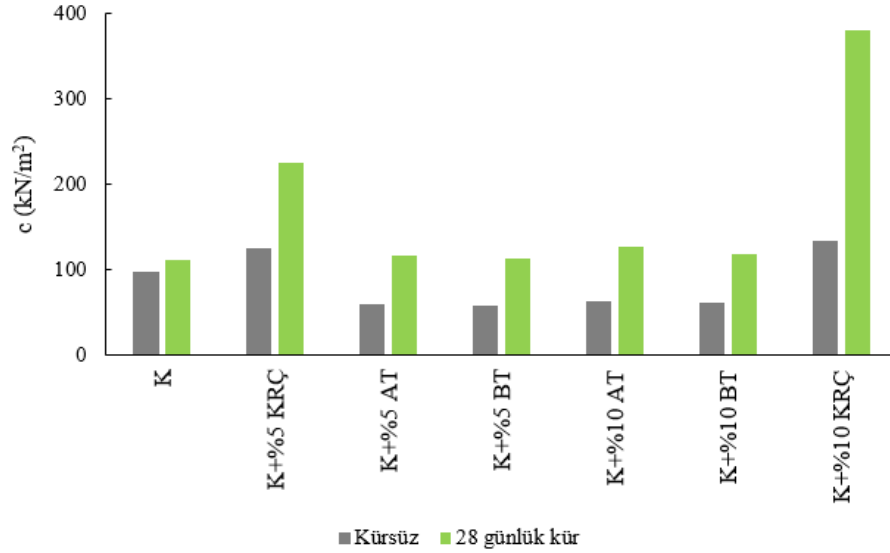


Şekil 7. Tek Katkı Malzemesi Kullanılan Örneklerle Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u Değerlerini Gösteren Histogram

Katkısız kile göre c değerleri kür öncesinde, %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örnekler hariç örneklerin tamamında azalmıştır. Kür sonrasında ise tüm örneklerin c değerinde artış meydana gelmiştir. Tek katkı malzemesi kullanılan

örneklerin kür öncesi c değerleri 57.22-133.38 kN/m² arasında, kür sonrası c değerleri ise 112.65-380.51 kN/m² arasında değişmektedir (Tablo 5, Şekil 8).

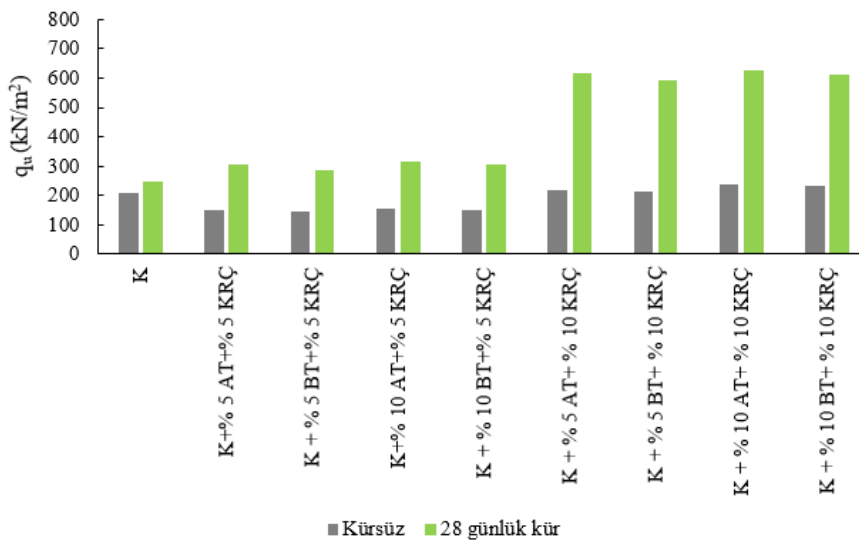
Kür sonrasında hem q_u hem de c değerleri önemli oranda artmıştır, özellikle kireç katkısının kullanıldığı örneklerde bu değişim çok belirgindir. %10 KRÇ katkılı karışımların hem q_u hem de c değerleri, %5 KRÇ katkılı karışımlara göre çok daha büyük oranlarda artış göstermiştir.



Şekil 8. Tek Katkı Malzemesi Kullanılan Örneklere Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası c Değerlerini Gösteren Histogram

İki Katkı Malzemesi Kullanılarak Hazırlanan Örneklerin Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u ve c Değerlerinin Karşılaştırılması

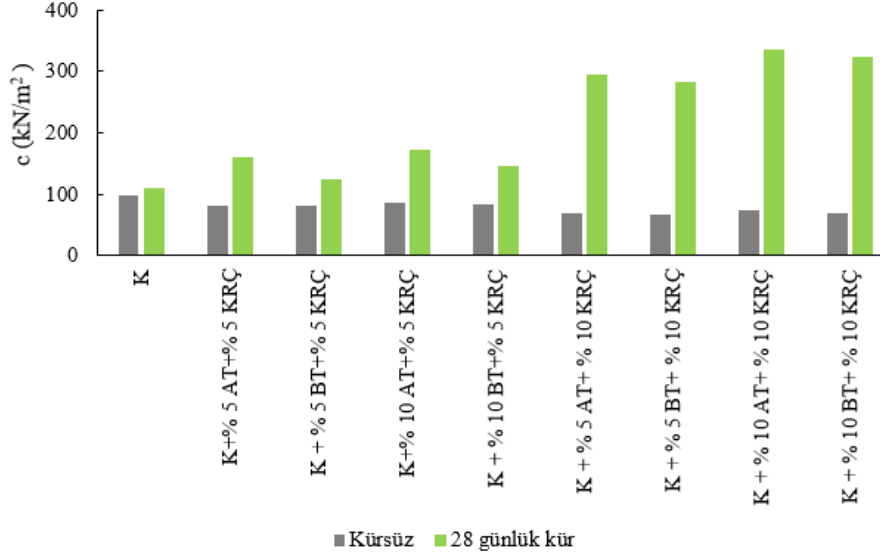
Bu aşamada farklı oranlardaki asidik ve bazik tuf katkıları kireç ile karıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde kür öncesi q_u değerleri 146.12-240.25 kN/m², kür sonrasında ise 288.33-627.12 kN/m² olarak belirlenmiştir (Tablo 4, Şekil 9). Kür öncesi ve kür sonrasında en büyük dayanım değeri, %10 AT + %10 KRÇ katkılı örnekte, en küçük dayanım değeri ise %5 BT + %5 KRÇ katkılı örnekte tespit edilmiştir. Tuf ve kireç katkı oranı arttıkça tüm örneklerde dayanımın arttığı, özellikle kürle birlikte asidik tuf ve kirecin birlikte kullanıldığı örneklerde dayanım değerlerinin çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Tablo 4).



Şekil 9. İki Katkı Malzemesi Kullanılan Örneklere Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u Değerlerini Gösteren Histogram

İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde c değerleri incelendiğinde ise dayanımla benzer değişimler geliştiği gözlenmiştir. Örneklerde kür öncesi c değerleri 66.69-87.01 kN/m², kür sonrasında ise 124.55-335.50 kN/m² arasında

değişmektedir Kür öncesinde c değeri katkısız kile göre tüm örneklerde azalmıştır ve en yüksek c değeri ise %10 AT + %5 KRÇ, en düşük c değeri ise %5 BT + %10 KRÇ katkılı örnekte belirlenmiştir. Kür sonrasında ise en yüksek c değeri %10 AT + %10 KRÇ katkılı örnekte, en düşük c değeri ise %5 BT + %5 KRÇ katkılı örnekte meydana gelmiştir (Tablo 5, Şekil 10). c değerlerinde belirlenen değişimler, dayanımda meydana gelen değişimlerle paralellik sunmaktadır ve asidik tufün kireçle kullanıldığı örnekler özellikle maksimum dayanım ve kohezyon değerlerini vermiştir.



Şekil 10. İki Katkı Malzemesi Kullanılan Örneklere Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası c Değerlerini Gösteren Histogram

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Kür öncesi serbest basınç dayanımı katkısız kile göre %10 KRÇ, %5 AT + %10 KRÇ, %5 BT + %10 KRÇ, %10 AT + %10 KRÇ, %10 BT + %10 KRÇ katkılı örnekler hariç diğer örneklerde azalmıştır. Kür sonrasında ise asidik ve bazik tufün tek başına kullanıldığı örnekler hariç tamamında q_u değerleri artmıştır.

%10 KRÇ katkılı örnekte kür öncesinde q_u değerindeki artış oranı %35.54 iken, kür sonrasındaki artış oranı ise %186.22'dir. Dayanımın en az arttığı örnek olan %5 BT + %5 KRÇ katkılı örneğin q_u değerinde ise kür sonrasında %15.75 oranında artış görülmüştür (Tablo 6). Asidik tuf, bazik tuf ve kireç katkı oranının artmasıyla birlikte kür öncesi ve kür sonrası dayanım değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Özellikle kireç katkılı örneklerin dayanım değerleri belirgin bir şekilde artış göstermiştir.

c değerleri ise kür öncesinde katkısız kile göre %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örnek hariç tüm örneklerde azalmıştır. Ancak kür sonrasında bütün örneklerde c değerleri artış göstermiştir.

Kür öncesinde kohezyon değerindeki en büyük artış %10 KRÇ katkılı örnekte (%36.00), kür sonrasında da aynı durum söz konusu olup %10 KRÇ katkılı örnekte c değeri %243.36 oranında bir artış göstermiştir. %5 BT katkılı örnekte ise en küçük artış %1.65 olarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Kür öncesinde kil ve katkı malzemeleri arasında yeterli puzolanik reaksiyon gelişmediği için dayanım ve kohezyon değerleri azalmıştır. Hem dayanım hem de kohezyon açısından en etkili karışımların sadece kirecin kullanıldığı tekli karışımlar ve kireç-asidik tufün birlikte kullanıldığı ikili karışımlar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu katkıların artan oranlarında kür uygulanmasıyla birlikte q_u ve c değerlerinde daha belirgin artışlar olduğu ortaya konmuştur.

Katkı eklendikten sonra zamana bağlı olarak kil daneleri arasındaki boşluklarda gelişen puzolanik reaksiyonlar sonucunda, daneler arası boşluklar azalmakta ve dayanım artmaktadır (Özyadın, 2000). Kil mineralleri ile sönmüş kireç arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan kalsiyum silikat jeli boşlukları doldurarak zemin daneleri arasında bağlayıcı görevi görmekte ve böylece zeminin dayanımını artırmaktadır (Ghabaee, 2015; Asgari et al., 2015). Bu çalışmada, kür öncesi ve kür sonrasında özellikle 10 KRÇ katkılı örneğin c ve q_u değerlerinde büyük oranda artış meydana gelmiştir.

Tablo 6. Katkısız ve Katkılı Kil Örneklerinin q_u ve c Değerlerinin % Değişim Değerleri

Örnek	Kürsüz Değişim (%)		28 günlük kür Değişim (%)	
	q_u	c	q_u	c
K	-	-	-	-
K + %5 AT	-41.89	-38.81	-25.65	4.66
K + %5 BT	-44.28	-41.65	-34.92	1.65
K + %10 AT	-37.59	-35.55	-22.83	14.70
K + %10 BT	-41.95	-38.52	-31.71	6.48
K + %5 KRÇ	-3.3	28.00	75.59	103.54
K + %10 KRÇ	35.54	36.00	186.22	243.36
K + %5 AT + %5 KRÇ	-27.96	-16.00	23.23	46.02
K + %5 BT + %5 KRÇ	-29.39	-17.00	15.75	12.39
K + %10 AT + %5 KRÇ	-24.78	-11.28	26.10	55.61
K + %10 BT + %5 KRÇ	-27.42	-13.65	22.36	31.66
K + %5 AT + %10 KRÇ	6.60	-30.00	147.24	165.48
K + %5 BT + %10 KRÇ	3.05	-32.00	138.58	155.75
K + %10 AT + %10 KRÇ	16.10	-25.36	151.75	202.74
K + %10 BT + %10 KRÇ	13.56	-27.98	145.12	193.27

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

Tek başına %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkısının kullanıldığı örneklerde görülen belirgin artışın sebebi ise diğer karışımlara göre meydana gelen puzolanik reaksiyonların daha hızlı ve daha fazla gerçekleşmesidir. Kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımlarında görülen artış puzolanik reaksiyonların oluştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sönmüş kireçle birlikte tüflerin kullanılmasının çimentolaşma reaksiyonlarında negatif bir etki oluşturduğu söylenebilir. %10 KRÇ katkılı örneklerin, serbest basınç dayanımı ve kohezyon değerleri incelendiğinde diğer karışımlara göre çok daha fazla iyileşme sağladığı görülmektedir.

Kirecin bazik tüf ile birlikte kullanıldığı örneklerde dayanımdaki azalma biraz daha fazladır. Bu sonuçlara göre stabilizasyonda asidik tüfün bazik tüfe göre daha etkili olduğu söylenebilir. Tüflerin plastik özelliği olmaması nedeniyle karışımların kohezyonunu azaltmakta dolayısıyla serbest basınç dayanımı değerlerini düşürmektedir. Asidik tüfün düşük aktif CaO içeriği, bazik tüfün ise düşük $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ sebebiyle tüflerin tek başına kullanıldığı örneklerde taneleri birbirine kenetleyen ürünler kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H), kalsiyum alümina hidrat (C-A-H), kalsiyum alümina-silika hidrat (C-A-S-H)'yi oluşturacak puzolanik reaksiyonların gerçekleşmemesi/az gerçekleşmesi ve düşen kohezyonu karşılayamaması nedeniyle serbest basınç dayanımı değerlerinde düşüşlerin meydana geldiğini söylemek mümkündür. Kirece tüf katkılarının eklenmesi dayanımı bir miktar azaltmıştır fakat kür öncesi değerlere göre yine de oldukça yüksek dayanım ve kohezyon değerleri elde edilmiştir. Kirecin bazik tüfle birlikte kullanılması, dayanımı asidik tüfle birlikte kullanıldığı duruma göre daha fazla azaltmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak farklı özellikteki tüfler ile birlikte sönmüş kireç kullanımının bentonitin serbest basınç ve drenajsız kayma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla kile farklı oranlarda sönmüş kireç ve kireçle birlikte asidik/bazik tüf katılarak toplam 15 ayrı karışım hazırlanmış ve optimum su içeriğinde sıkıştırılan örneklerde serbest basınç ve üç eksenli sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

Kür öncesinde;

- Kür öncesinde q_u değerleri %10 KRÇ katkılı örnek hariç, c değerleri ise %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örnekler hariç tüm örneklerde azalmıştır.
- Kirecin tek katkı malzemesi olarak kullanıldığı örneklerde en büyük c ve q_u değerleri belirlenmiştir ve %10 KRÇ katkılı örnekte en büyük değerler bulunmuştur.
- Tek katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerde asidik ve bazik tüfün kullanılması c ve q_u değerlerini düşürmektedir.

- %5 KRÇ katkılı örnekler, %10 KRÇ katkılı örneklerle ile karşılaştırıldığında c ve q_u değerlerindeki artış %10KRÇ katkılı örneklerde daha fazladır.
- Hem %5 KRÇ hem de %10 KRÇ katkılı örneklerde bazik tuf katkısı kullanılması asidik tufe oranla c ve q_u değerlerinde daha fazla azalma meydana getirmiştir.

Kür sonrasında;

- c ve q_u değerleri tüm karışımlarda büyük oranda artış göstermiştir ve en büyük artış %10 KRÇ katkılı örnekte meydana gelmiştir.
-Tek katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerde asidik ve bazik tufün kullanılması c ve q_u değerlerini düşürmektedir.
- İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde c ve q_u değerlerindeki artış %10 KRÇ katkılı örneklerde, %5 KRÇ katkılı örneklere göre daha fazladır.
- Hem %5 KRÇ hem de %10 KRÇ katkısıyla birlikte asidik/bazik tufün kullanıldığı örneklerde c ve q_u değerleri bir miktar azalmıştır, bu azalma bazik tufün kullanıldığı örnekte daha fazladır.
Sonuç olarak sönmüş kireçle birlikte tufelerin kullanılmasının çimentolaşma reaksiyonlarında negatif bir etki oluşturduğu, kireçle birlikte kullanılan asidik tufün bazik tufe göre stabilizasyonda daha etkin olduğu, fakat kirecin tek başına daha fazla iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.16.64 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, A. (1996). Bentonit. MTA Eğitim Serisi-32, Ankara.
- Aksoy, H.S., Yılmaz, M., & Akarsu, E.E. (2008). Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. *Doğu Anadolu Bölgeleri Araştırmaları*, 6(3), 88-92
- Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and artificial pozzolan on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building & Environment*, 40(5), 681-687. doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028
- Asgari, M. R., Dezfuli Baghebanzadeh, A., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences* 8(3), 1439-1452. doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1
- Aslan Topçuoğlu, Y. (2020). Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ 316s.
- ASTM C 618-12, (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in Concrete. West Conshohocken, ASTM International, PA.
- ASTM D 698-12e2, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2850-15, (2015). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2166M-16, (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Attoh-Okine, N.O. (1995). Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. *Construction and Building Materials*, 9(5), 283-287. doi.org/10.1016/0950-0618(95)00030-J
- Azadegan, O.A., Jafari, S.H., & Li, J. (2012). Compaction characteristics and mechanical properties of lime/cement treated granular soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2275-2284.
- Boardman, D.I., Glendinning, S., & Rogers, C.D.F. (2001). Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), 533-543. doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533

- Bulut, Ü. (2007). Perlitin Puzolanik Aktivitesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul 175s.
- Bulut Karaca, Ü., & Tanaçan, L. (2009). Perlitin puzolanik aktivitesi. *İTÜ Dergisi/A Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 8(1), 81-89.
- Calik, U., & Sadoglu, E. (2014). Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and Perlite. *Geomechanics and Engineering*, 6(4), 403–418. doi.org/10.12989/gae.2014.6.4.403
- Chong, S.Y., & Kassim, K.A. (2014). Consolidation characteristics of lime column and Geotextile Encapsulated Lime Column (GELC) stabilized pontian marine clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 129–141
- Cuisinier, O., Auriol, J-C., Le Borgne, T. & Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology*, 123(3), 187-193. doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010
- Çelik, Z.H. (2020). Zemin stabilizasyonunda pomza taşının incelik etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bayburt
- Çimen, Ö., & Coşan, F.Ş., (2019) Volkanik tüf ve amorf silikanın kilin mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 7(3), 459-466. DOI: 10.21923/jesd.427775
- Çimen, Ö., Dereli, B., & Keleş, E. (2020). Üç Farklı Bölgeye Ait Pomzanın Yüksek Plastisiteli Kile Etkisinin Karşılaştırılması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU Journal of Science*, 9 (1), 427-433.
- Fındık, S. (2005). Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta
- Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W., & Missoum, H. (2011). Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux. Proceedings of 29th meeting of AUGC-Tlemcen, Algeria, 65–75
- Hossain, K.M.A., & Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495–3501. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042
- Geiman, C.M. (2005). Stabilization of soft clay subgrades in virginia phase 1 laboratory study. M.A. Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University, Civil Engineering.
- Genç, S. (2009). Şişen zeminler ve bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ghabaee, S. (2015). Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 129s.
- Goodarzi, A. R., Goodarzi, Sh., & Akbari, H. R. (2015). Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 39, 333–350. doi.org/10.22099/IJSTC.2015.3138
- Kalkan, E., & Akbulut, S. (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*, 73(1-2), 145–156. doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001
- Kavlak, Y. (2008). Isparta Gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta 91s.
- Kinuthia, J.M., Wild, S., & Jones, G.I. (1999). Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite. *Applied Clay Science*, 14(1-3), 27–45. doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00046-5
- Keskin, S.N., & Çimen, Ö. (1997). Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması. I. Isparta Pomza Sempozyumu, (pp. 97-101).
- Lin, B., Cerato, Amy, B., Madden, Andrew S., & Madden, Megan E Elwood. (2013). Effect of Fly Ash on the Behavior of Expansive Soils: Microscopic Analysis. *Environmental Engineering Geoscience*, 19(1), 85–94. doi.org/10.2113/gseegeosci.19.1.85

- Little, D.N., Scullion, T., Kota, P.B.V.S., & Bhuiyan, J. (1995). Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades. Texas A and M University.
- Locat, J., Berube, M.A., & Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 294–304, doi.org/10.1139/t90-040
- Mahamedi, A., & Khemissa, M. (2013). Cement stabilization of compacted expansive clay. *The Online Journal of Science and Technology*, 3(1), 33–38
- Mallela, J., Harold Von Quintus, P., Smith, K.L., & Consultants, E. (2004). Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA.
- Okucu, A. (1998). Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzolanik özellikleri. Doktora Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir 152s.
- Önem, Y. (2000). Sanayi Madenleri. Kozan Ofset, Ankara.
- Özaydın, K. (2012). Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, Ondördüncü Ulusal Kongresi, İstanbul
- Puppala A.J., Ramakrishna A.M., & Hoyos L.R. (2003). Resilient moduli of treated clays from repeated load triaxial test. *Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board*, 1821(1), 68–74, doi.org/10.3141/1821-08
- Ramadas, T, Kumar, N.D., & Yesuratnam, G. (2011). Geotechnical characteristics of three expansive soils treated with lime and flyash. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6), 46-49.
- TS 25, (2008). Doğal puzolan (tras) - çimento ve betonda kullanılan-tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri.
- Ün, H. (2007). PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Ders Notları, Denizli.
- Voottipruex, P., & Jamsawang, P. (2014). Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand. *Geomechanics and Engineering*, 6(5), 437–453. doi: 10.12989/gae.2014.6.5.437
- Yang, G., Liu, H., Lv, P., & Zhang, B. (2012). Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 112–118. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.09.001
- Yılmaz, F. (2017). Stabilizasyonunda puzolanik katkı inceliğinin dayanıma etkisi. *AKÜ FEMÜBİD 17*, 035601 (1048-1054). doi: 10.5578/fmbd.64080
- Wang, A., Zhang, C., & Sun, W. (2003). Fly ash effects: I. the morphological effect of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 33, 2023–2029. doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00217-5
- Wild, S., Kinuthia, J., Robinson, R. and Humphreys, I. (1996). Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates. *Clay Minerals*, 31(3), 423–433. doi: 10.1180/claymin.1996.031.3.12



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.05.2022
Kabul Tarihi : 21.08.2022

Received Date : 23.05.2022
Accepted Date : 21.08.2022

BİNALARDA ISI KAYBINA NEDEN OLAN YAPISAL SORUNLARIN TERMAL KAMERA GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF STRUCTURAL PROBLEMS THAT CAUSE HEAT LOSS IN BUILDINGS WITH THERMAL CAMERA IMAGING TECHNIQUE

Ali ELHUYEYDİ¹ (ORCID: 0000-0003-0607-3350)

Faruk ORAL^{2*} (ORCID: 0000-0002-4114-0785)

¹Rasus Chemistry Cleaning and Cosmetics, Gaziantep, Türkiye

² Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitlis, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Faruk ORAL, foral@beu.edu.tr

ÖZET

Türkiye’de kullanılan enerjinin önemsenecek miktarı binalarda ısıtma amaçlı tüketilmektedir. Kış aylarında binalarda oluşan ısı kayıplarını azaltarak enerji tüketimini etkin ve verimli kullanmak mümkündür. Isı yalıtımı, binalarda oluşan ısı kayıplarının azaltılmasında kullanılan en önemli yöntemdir. Ayrıca binada uygulanan ısı yalıtımının uygunluğu ve verimliliği araştırılmalıdır. Bu çalışmada, Bitlis İli Rahva yerleşkesinde bulunan Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi hizmet binası temel çalışma alanı olarak seçilmiştir. Binanın ısıtılması için kullanılacak teorik yakıt tüketim miktarı belirlenmiş ve gerçek tüketim değeri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca ısıtma sezonunda binanın farklı dış cephelerinden termal kamera ile görüntüleri çekilerek ısı ve yalıtım verimliliği değerlendirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda; binanın birim kullanım alanı başına ısı enerjisi ihtiyacının TS 825 standardında belirtilen değerin üzerinde olduğu, ısıtma amaçlı kullanılan gerçek yakıt tüketiminin teorik yakıt tüketiminden fazla olduğu belirlenmiştir. Binanın termal kamera ile incelenmesi sonucunda, pencere çerçevelerinin duvar ile birleşim yerlerinde ve bazı dış duvarlarda izolasyonun iyi uygulanmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal kamera, binalar, ısı kaybı, ısı yalıtımı, enerji tasarrufu.

ABSTRACT

The significant amount of energy used in Turkey is for heating purposes. It is possible to use energy consumption effectively and efficiently by reducing the heat losses in buildings during the winter months. Thermal insulation is the most important method used to reduce heat losses in buildings. In addition, the suitability and efficiency of the thermal insulation applied in the building should be investigated. In this study, Bitlis Eren University Faculty of Arts and Sciences service building located in Rahva campus of Bitlis Province was chosen as the main study area. The theoretical fuel consumption amount to be used for heating the building was determined and compared with the actual consumption value. In addition, during the heating season, thermal and insulation efficiency was evaluated by taking images of the building from different facades with a thermal camera. As a result of the calculations; It has been determined that the heat energy requirement per unit usage area of the building is above the value specified in the TS 825 standard, and the actual fuel consumption used for heating purposes is higher than the theoretical fuel consumption. As a result of the examination of the building with a thermal camera, it was determined that the insulation was not applied well at the junction of the window frames with the wall and on some exterior walls.

Keywords: Thermal camera, buildings, heat loss, thermal insulation, energy conversion.

GİRİŞ

Enerji ihtiyacının giderek arttığı bu zamanda, yeni ve temiz enerji kaynaklarının bulunmasının yanında enerjiyi etkin ve verimli kullanmakta önem kazanmıştır. Son yıllarda, dünyada binalarının enerji verimliliğinin iyileştirilmesinde önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Bu iyileştirmelerin amacı, enerjiyi daha verimli kullanmak ve ülkelerin ekonomik büyümesini arttırmaktadır. Ayrıca kullanıcıların iç mekânlarında daha fazla konfor sağlamak ve binalarda enerji tüketiminden kaynaklanan zararlı sera gazlarının çevreye olan salınımını azaltmaktadır (Zalewski et al., 2010). Binalarda yapılan en önemli iyileştirmelerden biri olarak, bina kaplamalarının (zarflarının) termal verimliliğinin incelenmesidir. Bu inceleme sonucunda, binanın ana bileşenlerine (duvarlar, pencereler vb.) uygulanan ısı yalıtımının kalitesi belirlenir.

Binalarda enerjiyi verimli kullanmak için uygulanan en etkili yöntemlerin başında, binanın dış cephe ısı yalıtımını yaparak oluşan ısı kayıplarını asgari seviyeye indirmektir. Bu şekilde binalarda kış aylarında ısı kayıplarını, yaz aylarında ise ısı geçirimini azaltmak mümkün olabilmektedir. Binalarda meydana gelen ısı kayıpları; proje hataları, kalitesiz malzeme, işçilik, imalat hataları, denetim eksikliği gibi uygulamalardan kaynaklanmaktadır. Türkiye’de soğuk iklim bölgelerinde binaların dış cephe yalıtımının yaygınlaşması ile birlikte yapılan yalıtımın verimliliğinin araştırılması önemli hale gelmiştir (Oral ve Elhuveydi, 2021).

Isıya duyarlı termal görüntüleme cihazı ile binaların dış cephelerinde oluşan ısı kayıplarının tespiti yapılabilmektedir. Termal görüntüleme cihazı, doğrudan temas gerçekleştirilmesizin kızıl ötesi dalga boyu spektrumunda yüzey sıcaklıklarını tespit edebilmektedir. Termal görüntüleme cihazı kullanılarak binaların yalıtımlı dış cephelerinde ısı kayıplarının gerçekleştiği yerler belirlenebilmektedir. Böylece bina dış cephe yalıtımının uygunluğu, hangi yapı elemanlarında daha fazla ısı kayıplarının meydana geldiği, hatalı yalıtımın yapıldığı yerlerin tespiti mümkün olmaktadır. Kızıl ötesi termografi, bazı ülkelerde kentsel binalardaki ısı kayıplarını belirlemek ve aynı zamanda yapısal başarısızlıkları ve nem ile ilgili sorunları tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ocaña, Guerrero and Requena, 2004).

Konu ile ilgili literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır. Aytaç Gülten ve Aksoy (2011) çalışmalarında Elazığ’da kentsel bir alanın ısı dağılımını termal kamera ile görüntüleyerek yapı elemanlarının termal davranışlarını incelemişlerdir. Çaylı vd. (2016) çalışmalarında, seralardaki imalat hatalardan kaynaklanan ısı kayıplarının belirlenmesinde termal kamera cihazının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Araştırma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi uygulama alanında bulunan seralarda yapılmıştır. Sonuçta termal kamera ile hatalı ısı yalıtım uygulamalarının tespit edilebileceğini belirtmişlerdir. Ünal ve Bayram (2017) çalışmalarında, Ankara ilinde seçilen bir binanın ısı kayıplarını incelemişlerdir. Binanın ısı yalıtım etkinliğinin belirlenmesi ve ısı kayıplarının olduğu alanların tespiti için, termal kamera cihazı kullanmışlardır. Bu uygulamada, termal kameradaki kızıl ötesi görüntüler incelenerek binadaki yalıtım uygulamalarının performansı değerlendirilmiştir. Rüşen vd. (2018) çalışmalarında, Karamanoglu Mehmetbey Üniversitesi (KMÜ) kampüsünün enerji verimliliğini inceleyerek tasarruf potansiyelini belirlemişlerdir. Bu amaç ile yapılan ölçümler sonucunda üniversitenin yaklaşık %18’lik enerji tasarrufu potansiyelinin olduğunu belirtmişlerdir. Kotan vd. (2018) EPS ile genişletilmiş perlitin ısı yalıtım performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaç ile oluşturdukları deney odasında her iki yalıtım malzemesinin performansını termokupl ve termal kamera cihazlarını kullanarak ölçmüşlerdir. Sonuçta EPS malzemesinin birim kalınlık başına ısı yalıtım performansının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Karagüzel (2019) çalışmasında talaşlı imalat esnasında oluşan kesme sıcaklığını deneysel ve teorik incelemiştir. Kesme sıcaklığının deneysel ölçümünde termal kamera kullanılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçların birbirine çok yakın gerçekleştiği belirtilmiştir. Büyüktaş vd. (2019) Akdeniz Bölgesinde kullanılan polietilen sera örtülerinin şiddetli dolu yağışı sonucu üzerinde oluşan hasarların tespitinde termal kameranın kullanılmasını araştırmışlardır. Oluşan zararın belirlenmesi ile ilgili bir model geliştirmişlerdir. Zengin vd. (2019) Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi içinde bulunan bina ve çevre bitki örtüsünü, ortam sıcaklığı açısından termal kamera ile incelemişlerdir. Doğal bitki örtüsünün daha serin bir ortam oluşturduğu sonucuna varmışlardır. Demircan (2020) binalarda oluşan ısı kayıplarının termal kamera ile belirlenmesini araştırmıştır. Sonuçta Adapazarı ilinde yalıtımsız dört adet binanın termal kamera görüntülerini kullanarak binalarda meydana gelen ısı kaçaklarının yerlerini tespit ederek öneriler sunmuştur. Abdelhafiz vd. (2022) termal kamera ile binaların yalıtım verimliliğini araştırmışlardır. Bu amaç için bina cephelerinde her noktada iç ve dış sıcaklık farklarını belirlemek için yeni bir yazılım geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, binalarda ısıtma amaçlı ısı enerjisi ve yakıt tüketim ihtiyacının termal kamera ile elde edilen sonuçlar ile birleştirilip değerlendirilmesi üzerine yeterli bir çalışma görülmemektedir.

Kış aylarının soğuk ve yoğun kar yağışı ile geçtiği Bitlis ilinde, binaların ısıtılmasında kullanılan yakıt ve bunun sonucu oluşan maliyet fazla olmaktadır. Yakıtların yanması sonucu oluşan baca gazı emisyonları insan sağlığı bakımından olumsuz çevre şartlarına neden olmaktadır. Bu nedenle binalarda kış aylarında oluşan ısı kayıplarının azaltılması hem çevre sağlığı hem ekonomik bakımından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Bitlis İli Rahva yerleşkesinde bulunan Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi hizmet binasında ısı kaybına neden olan yapısal sorunlar ve binanın yalıtım uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaç ile binanın birim kullanım alanı başına ısı enerjisi ihtiyacı, ısıtma amaçlı yakıt tüketim değerleri ve termal görüntüleme cihazı ile elde edilen dış cephe görüntüleri kullanılarak muhtemel yapısal sorunlar ve uygulanan yalıtımın verimliliği değerlendirilmiştir. Çalışma ile binalarda ısı kaybına neden olan muhtemel yapısal kusurlar özellikle bina dış cephe yüzeylerinde yanlış yalıtım uygulamalarının belirlenerek ısıtma amaçlı yakıt maliyetlerinin azaltılması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Türkiye’de binalarda ısı enerjisi kayıplarının hesaplanmasında ve birim hacim başına müsaade edilebilecek en büyük ısı enerjisinin belirlenmesinde TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardı kullanılmaktadır (Atmaca, 2016). Bu standarda göre Bitlis ili dördüncü derece gün bölgesi içinde yer almaktadır. Araştırma kapsamında Bitlis İli Rahva yerleşkesinde bulunan Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi (FEF) hizmet binası temel çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bina; iki bodrum (BK), bir zemin (ZK), üç normal (NK) olmak üzere 6 kattan oluşmaktadır. Çalışma sahası, 42.163560°E – 38.478214°N coğrafi koordinatlarında olup deniz seviyesinden 1795 m yüksekliğindedir. Seçilen binanın özellikleri Tablo 1’de, binaya ait yapı elemanlarının yüzey alanı ve toplam ısı geçiş katsayı değerleri (U) ise Tablo 2’de verilmiştir (Elhuveydi, 2020). Çalışmada binalara ait bilgiler, bina ısıtılmasında kullanılan yakıt tüketim miktarları, ilgili kurum kayıtlarından alınmıştır.

Tablo 1. İncelenen Binanın Özellikleri

Özellikler	
Bina durumu	Ayrık nizam
Kat adedi	6 (2BK+1ZK+3NK)
Pencereler	Plastik doğramalı, çift camlı
Binanın eni (m)	41.00
Binanın boyu (m)	83.20
Kat yüksekliği (m)	3.30
Toplam ısıtılan alan (m ²)	10543
Brüt hacim (m ³)	49228

Tablo 2. Bina Yapı Elemanları Yüzey Alanı ve Toplam Isı Geçiş Katsayı Değerleri

Yapı elemanı tipi	Yüzey alanı (m ²)	U (W/m ² K)
Dış havaya açık tuğla duvar	1956.08	0.358
Dış havaya açık kolon-kiriş donatısı	805.57	0.794
Dış havaya açık perde duvar	458.52	0.847
Toprak temaslı kolon-kiriş donatısı	186.33	0.531
Toprak temaslı perde duvar	655.25	0.560
Isıtılmayan iç ortam ile bitişik tuğla duvar	359	0.347
Üstü çatılı tavan	2313	0.247
Toprak temaslı taban	2313	0.414
Dış pencere	1460	2.9
Dış kapı	33.88	5.5

Matematiksel Yöntem

İnsanların binalarda ısı konfor şartlarında üşümeden sağlıklı bir şekilde yaşamlarını sürdürmeleri için binaların ısıtılması gerekmektedir. Bu amaçla binaların yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının hesaplanması gerekmektedir. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, binada ısıtma sezonu boyunca oluşan toplam ısı kaybından güneş enerjisi kazancı ile iç kazançların çıkarılmasıyla belirlenir (Ateş vd. 2021).

Binalarda ısı kaybı, sıcaklık farkı nedeniyle duvar, döşeme, tavan, zemin, pencere, kapı gibi binayı oluşturan yapı bileşenlerinde meydana gelir. Bir hacmin toplam özgül ısı kaybı (Q_{Top}), iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen özgül ısı kaybı (Q_i) ile hava sızıntısı sonucu oluşan özgül ısı kaybının (Q_v) toplanması ile bulunur (Genceli ve Parmaksızoğlu, 2012). İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, hacmi çevreleyen yapı bileşenlerinde oluşan ısı kayıplarının toplamıdır. Özgül ısı kayıpları aşağıda verilen eşitliklerden hesaplanabilir (Najjar vd. 2019; TSE, 2013).

$$Q_{Top} = Q_t + Q_v \quad (1)$$

$$Q_t = \sum U.A \quad (2)$$

$$Q_v = \rho c V' = 0.33 n_h V_h \quad (3)$$

Eşitliklerde U her bir yapı bileşeninin toplam ısı geçiş katsayısını, A ısı geçişinin gerçekleştiği her bir yapı bileşeninin yüzey alanını, ρ havanın yoğunluğunu, c havanın özgül ısını, V' hacimce hava değişim debisini, n_h hava değişim oranını ve V_h ısıtılan alanın hacmini ifade etmektedir. Bir binanın ısı kaybı, binayı oluşturan tüm hacimlerde meydana gelen ısı kayıplarının toplamı ile hesaplanır.

Bir binanın yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı ($Q_{yıl}$), aylık ısı ihtiyaçlarının (Q_{ay}) toplamına eşittir. Aylık ısı ihtiyacı, aylık ısı enerjisi kaybından ısı enerjisi kazançlarının (iç ve güneş enerjisi) çıkarılması sonucu hesaplanır. Yıllık ve aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir (TSE, 2013).

$$Q_{yıl} = \sum Q_{ay} \quad (4)$$

$$Q_{ay} = \left[Q_{Top}(T_i - T_d) - \eta_{ay} (\phi_{i,ay} + \phi_{s,ay}) \right] t \quad (5)$$

Eşitliklerde yer alan T_i aylık ortalama iç sıcaklığını; T_d aylık ortalama dış sıcaklığını; η_{ay} aylık ortalama kazanç kullanım faktörünü; $\phi_{i,ay}$ aylık ortalama iç ısı kazancını; $\phi_{s,ay}$ aylık ortalama güneş enerjisi kazancını; t zamanı ifade etmektedir. Bu çalışmada aylık ortalama dış sıcaklık ve aylık ortalama güneş enerjisi kazancı değerleri Bitlis Meteoroloji İstasyonundan elde edilmiştir.

Bir binanın yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacına göre tüketilen yakıt miktarı aşağıda verilen eşitlik ile belirlenebilir (Genceli ve Parmaksızoğlu, 2012).

$$B_y = Q_{yıl} / (H_u \eta_k) \quad (6)$$

Bu son eşitlikte, B_y yıllık yakıt tüketimini (kg veya m^3); H_u kullanılan yakıtın alt ısıl değerini (kJ/kg veya kJ/m^3) ve η_k kazanın verimini (%) ifade etmektedir. Binada ısıtma sezonlarında kullanılan yakıtların alt ısıl değeri ve kazan verimi Tablo 3'de verilmiştir (Karakoç, 2011).

Tablo 3. Yakıtların Alt Isıl Değerleri ve Kazan Verimi

Yakıt türü	Yakıtın Alt Isıl Değeri (H_u)	Kazan Verimi (η_k) (%)
Linyit kömür	23020 (kJ/kg)	0.60-0.65
Doğalgaz	34535 (kJ/m^3)	0.85-0.92

Binanın ısıtma enerjisi ihtiyacı, TS 825 standardına göre bulunduğu derece gün bölgesine göre maksimum ısıtma enerjisi ihtiyacı sınır değerini geçmemesi gerekmektedir (Ateş vd. 2012; TSE, 2013). Çalışmada seçilen bina TS 825 standardına göre dördüncü derece gün bölgesinde olması nedeniyle yıllık ısıtma enerjisinin maksimum sınır değeri (Q') aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanabilir (TSE, 2013).

$$Q' = 82.5 \left(\frac{A_{Top}}{V_{brüt}} \right) + 50.7 \quad (7)$$

Eşitlikte, A_{Top} binanın ısı kaybeden yüzeylerinin toplam alanını; $V_{brüt}$ binanın ısıtılan brüt hacmini ifade etmektedir.

Fen Edebiyat Fakültesi binasının 2017-2019 ısıtma yıllarını kapsayan ısı kaybı ve yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı TS 825 standardına göre yapılmıştır. Fakülte binasında ikinci öğretim faaliyetlerinin olması nedeniyle ısıtma sistemi olarak günlük işletme süresi 16 saat uygulanmaktadır. Bu neden ile ısı kaybı hesabında bu süre dikkate alınmıştır. Hesaplama sonucunda binanın yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı ve gerekli teorik yakıt miktarı (kömür ve doğalgaz) belirlenmiştir. Sonraki aşamada, teorik yakıt miktarı ile ilgili birimden elde edilen gerçek yakıt tüketim değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Termal Kamera Uygulaması

Kızıl ötesi görüntüleme, yüzey sıcaklığı iki yöntemle belirlenebilir. İlk yöntemde, sadece kamera ile odaklanan noktadaki sıcaklık değeri doğrudan belirlenir. İkinci yöntemde ise, görüntü renkleri ekranın sağ tarafındaki renk/sıcaklık kombinasyonu yapan gösterge çubuğu vasıtasıyla koyu renk soğuk olan bölgeyi, açık sarı renkli kısımlar ise sıcak olan bölgeyi gösterir ve bu şekilde bir görüntüde çoklu lokal sıcaklık değerlendirmesi veya karşılaştırması yapılabilir.

Belirtilen binanın ısı kayıp yerlerinin belirlenmesi amacıyla Fluke marka termal kamera cihazı (Fluke Ti110) kullanılarak dış yüzey sıcaklıkları ve muhtemel ısı kayıp alanları tespit edilmiştir. Bunun için binanın kış aylarında, farklı günlerde ve farklı saatlerde termal kamerayla periyodik olarak görüntüleri alınmıştır (Şekil 1). Uygulamada aynı anda aynı yüzeyin birden fazla termal görüntüsü alınıp içlerinden en net olanı kullanılmıştır. Ayrıca, aynı cihaz ile ısıtma sistemlerindeki kazan gidiş dönüş hatlarında bulunan sıcak su borularının yüzey sıcaklıklarının ölçümü yapılmıştır. İzole edilmiş boruların termal kamera görüntüleri alınarak yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu şekilde incelenen sıcak su boru hattında yalıtım hatası olup olmadığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan termal kameranın teknik özellikleri Tablo 4’de verilmiştir (Web, 2021).



Şekil 1. Termal Kamera ile Görüntü Elde Edilmesi

Tablo 4. Termal Kamera Cihazının Teknik Özellikleri

Cihazın markası	Fluke Ti110
Sıcaklık ölçüm aralığı	-20°C ile +250°C aralığı
Ekran çözünürlüğü	160x120 (19,200 pixel)
Minimum yakınlık mesafesi	15 cm
Termal hassasiyet	30°C’lik hedef sıcaklığında $\leq 0.10^\circ\text{C}$ hata payı
Yerleşik dijital kamera	2 megapixel
Resim karesi hızı	30 Hz veya 9 Hz versiyonlu
Koruma sınıfı	IP54
Batarya	Şarjlı versiyonda (AC), LED ekranda beş aşamalı kalan şarj göstergesi, cihaz şarj adaptörü ile veya harici şarj istasyonunda batarya şarj edilme, değiştirilebilir batarya
Tasarım	Pürüzlü, hafif ve tek el ile kullanım için ergonomik yapıda
Boyutlar	28.4 cm x 8.6 cm x 13.5 cm
Ağırlık (batarya dâhil)	0.73 kg

BULGULAR

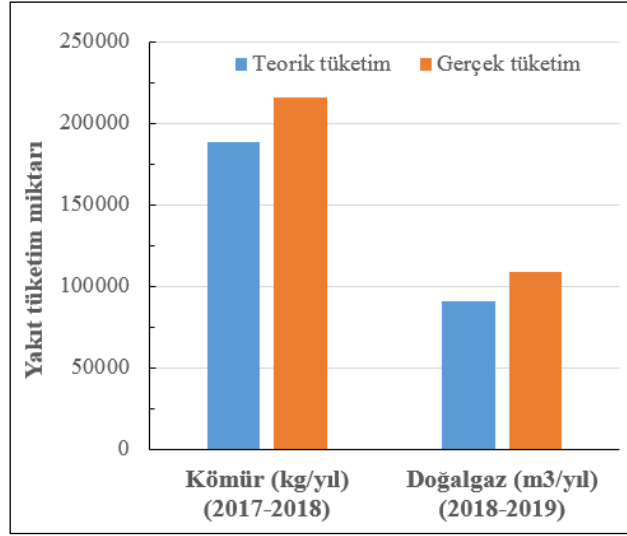
Fen Edebiyat Fakültesi binası için yapılan ısı enerjisi hesaplamaları sonucu elde edilen değerler Tablo 5’te verilmiştir. TS 825 standardına göre, binalardaki birim başına düşen yıllık ısı enerjisi ihtiyacı yine bu standartta belirtilen derece gün bölgelerine göre olması gereken maksimum ısı enerjisi ihtiyacını geçmemesi gerekmektedir. Tablo 5’te binanın birim kullanım alanı başına düşen yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, olması gereken maksimum ısıtma enerjisi ihtiyacından daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla binada uygulanmış olan ısı yalıtımı hesap metoduna uygun

değildir.

Tablo 5. Binanın Yıllık Toplam Özgül Isı Kaybı ve Isıtma Enerjisi İhtiyacı

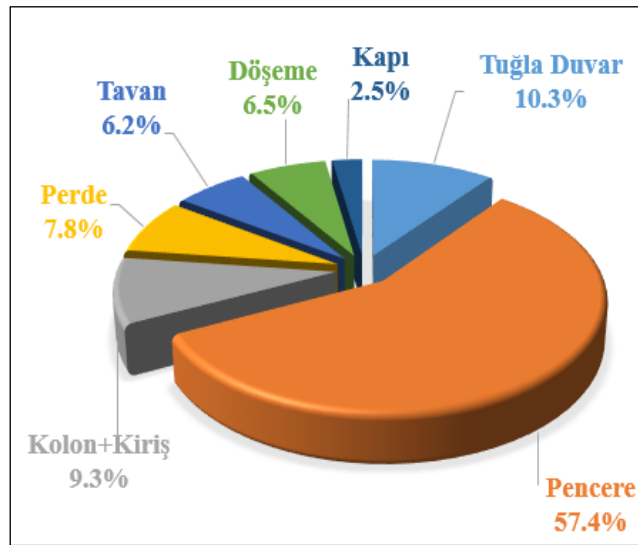
Toplam özgül ısı kaybı (W/°C)	17777
Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh)	1175047
Birim kullanım alanı başına ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m ²)	79.59
Birim kullanım alanı başına olması gereken en büyük ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m ²)	68.42

Binada ısıtma sezonları için hesaplanan teorik yakıt tüketim miktarı ile gerçek yakıt tüketim miktarları Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde yakıt türü olarak Kömürün kullanıldığı 2017-2018 ısıtma sezonunda gerçek tüketimin teorik tüketimden yaklaşık %12.81 oranında fazla olduğu belirlenmiştir. Yine yakıt türü olarak doğalgazın tüketildiği 2018-2019 sezonunda ise gerçek tüketimin teorik tüketimden %16.38 fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Binanın Yıllık Yakıt Tüketimi

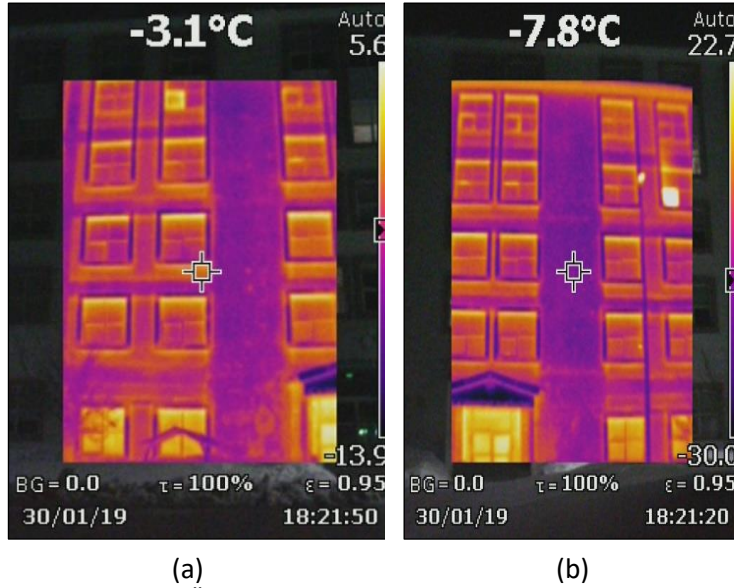
Şekil 3’de binanın yapı bileşenlerinde meydana gelen ısı kaybının oransal dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü gibi bina bileşenlerinde en fazla özgül ısı kaybı %57.4 oranı ile pencerelerde gerçekleşmiştir. Isı kaybının pencerelerden sonra %10.3 oranında duvarlarda meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 3. Yapı Bileşenlerinde Oluşan Isı Kaybı Oranları

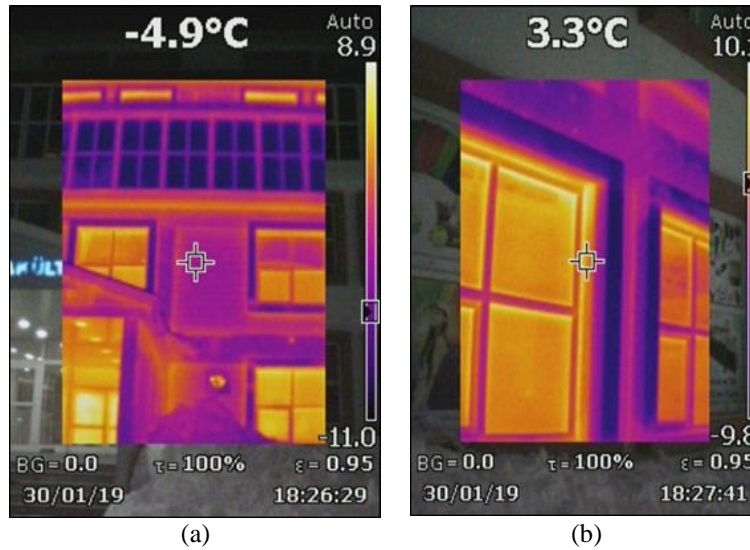
Şekil 4’de FEF binası ön dış cephesinin termal görüntüleri verilmiştir. Şekillerde, Koyu renkli kısımlar açık renkli kısımlara göre dış yüzey sıcaklığının düşük olduğu ısı kaybının az yaşandığı bölgelerdir. Bu görüntüler incelendiğinde, Şekil 4(a) ve 4(b)’de gösterilen açık sarı renkteki dış kapının yüzey sıcaklığının diğer yüzeylerden

çok daha büyük olduğu bu nedenle bu yapı elemanında önemsenerek büyüklükte ısı kaybının oluştuğu belirlenmiştir. Görüntülerde; pencerelerin altındaki duvar bölgelerinin yüzey sıcaklıklarının diğer duvar bölgelerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, bu duvarların iç yüzeyinde bulunan radyatör peteklerinde, iletim ve taşınım yoluyla oluşan ısı kaybıdır.



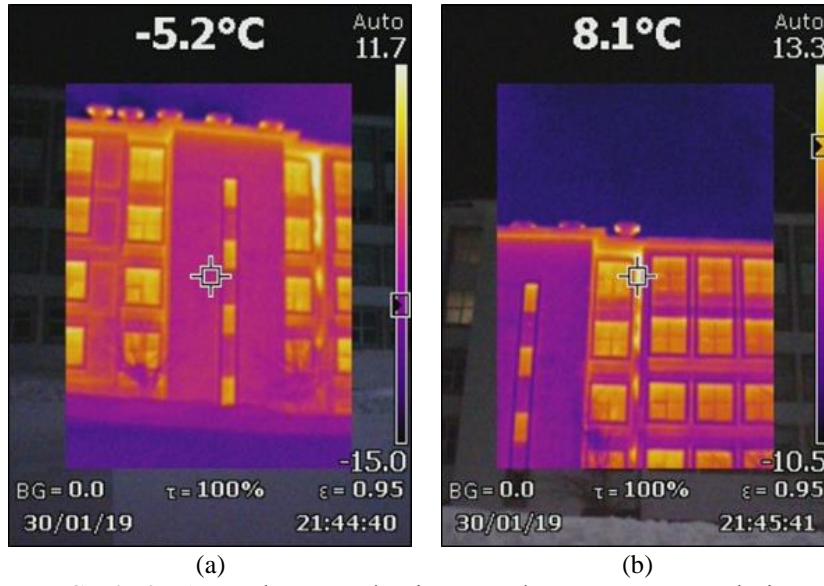
Şekil 4. Bina Ön Dış Cephenin Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 5’de FEF binası arka dış cephesinin termal görüntüleri verilmiştir. Şekil 5(a)’deki görüntüde 2. katın bu cephesi teras kat olup ısıtılmamaktadır. Bu nedenle iç ortam sıcaklık değeri dış ortama yakın olduğu için ısı kaybının fazla oluşmadığı görülmüştür. Diğer katlardaki açık sarı renkli olan kapı ve pencereler ise ısı kaybının daha fazla olduğu bölgelerdir. Şekil 5(b)’ye bakarak, genel olarak binadaki tüm pencere kenarlarında da ısı kaçakları olduğu söylenebilir.



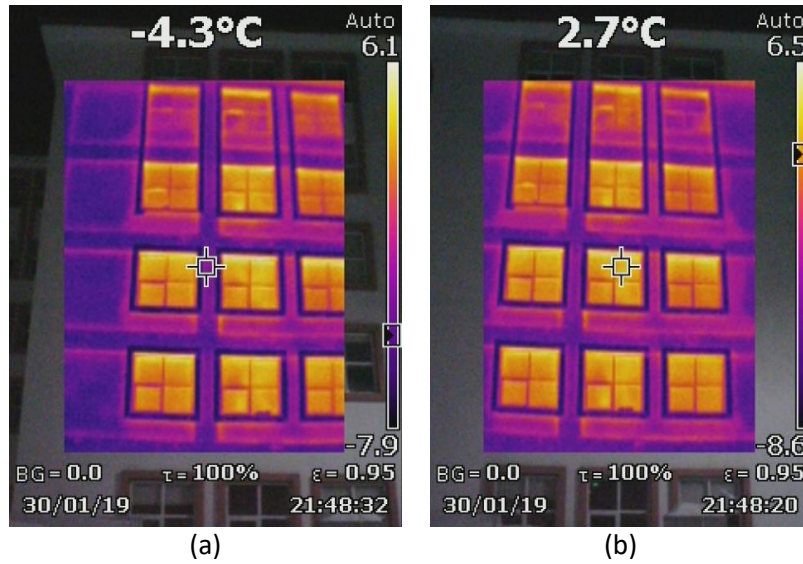
Şekil 5. Bina Arka Dış Cephenin Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 6’de FEF binası sol dış cephesinin termal görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde, Şekil 6(a)’da iç mahallin ortam sıcaklığının düşük derecede ısıtılması nedeniyle (lavabo ve WC bölümü) belirtilen dış duvar yüzey sıcaklığı yaklaşık -5.2°C olarak ölçülmüştür. Şekil 6(b)’de belirtilen pencere kenar bitimi dış duvar yüzey sıcaklığı ise 8.1°C ’ye ulaşmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi pencere ile duvar birleşim yerlerinin ısı yalıtımının uygun bir şekilde yapılmadığı anlaşılmıştır. Sakarya ili Adapazarı merkez ilçesinde yapılan benzer bir çalışmada, termal kamera görüntülerinden incelenen binalarda uygulanan bazı yalıtımların TS 825’de belirtilen standartlara uygun olmadığı, yalıtımın kalifiye işçiler tarafından yapılması gerektiği belirtilmiştir (Demircan, 2020).



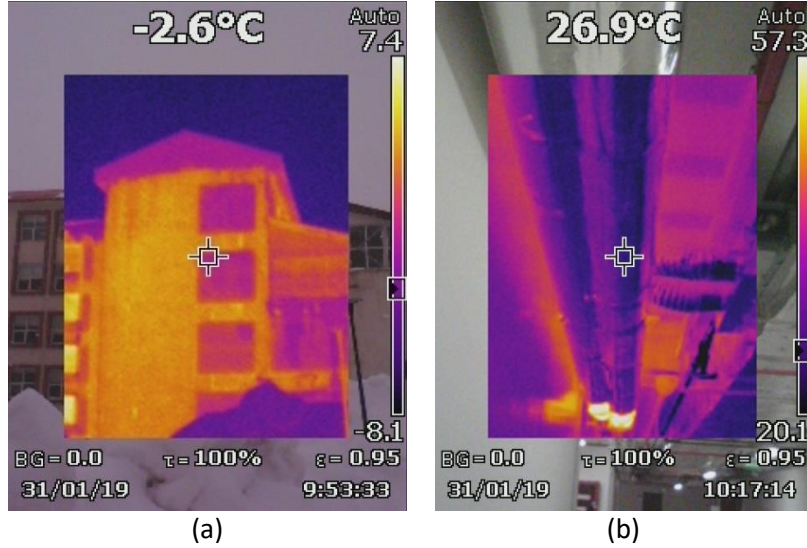
Şekil 6. Bina Sol Dış Cephenin Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 7(a) ve Şekil 7(b)'de aynı binanın sağ dış cephesinin termal görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde açık sarı renkli olan pencereler en fazla ısı kaybının olduğu bölgelerdir.



Şekil 7. Bina Sağ Dış Cephenin Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 8(a)'da koyu renkli olan bölgelerde önceden pencereler bulunmaktaydı. Daha sonra pencereler kaldırılıp bu bölgeler tuğla duvar ile kapatılmıştır. Bu görüntüde, kapatılmış yerlerin renginin diğer duvar bölgelerinin rengine göre daha koyu olmasının nedeni, kapatılmış yerlerde daha kalın ve kaliteli izolasyon malzemesi kullanılmış olmasıdır. Şekil 8(b)'de ise binadaki ısıtma sisteminden çıkan sıcak su borularının termal görüntüsü verilmiştir. Burada, borunun şekil üzerinde belirtilen noktada dış yüzey sıcaklığının yaklaşık 27 °C olduğu, sıcak su borusu boyunca yüzeyin koyu renkte olduğu, herhangi bir açık rengin olmadığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar sıcak su borusu yüzeyi üzerinde herhangi bir izolasyon probleminin olmadığını, boru izolasyonunun iyi yapıldığını, sıcak su borularından çevreye olan ısı kaybının daha az olacağını göstermektedir.



Şekil 8. Binanın Sağ Dış Cephesi ve İçteki Sıcak Su Borularının Termal Kamera Görüntüleri

SONUÇ

Bu çalışmada, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi binasının ısıtma amaçlı kullanılan yakıt tüketim değerleri de dikkate alınarak termal görüntüleme cihazı kullanılarak ısı kaybına neden olan yapısal sorunlar ve yalıtım uygulanma verimliliği değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Mevcut bina için yapılan ısı kayıp hesaplamaları sonucu, yapı bileşenleri içerisinde en fazla ısı kayıplarının %57.4 oranında pencerelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Binanın birim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının, derece gün bölgesine göre olması gereken en büyük ısıtma enerjisi ihtiyacından büyük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle mevcut binanın dış duvarlarında uygulanan ısı yalıtımının istenilen verimlilikte olmadığı, ısı yalıtım kalınlığının artırılması veya daha uygun yalıtım malzemesi kullanılmasının gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Binada ısıtma amaçlı kullanılan gerçek yakıt tüketiminin ısı hesaplamaları sonucu elde edilen teorik yakıt tüketimi değerlerinden yaklaşık %12-16 oranlarında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum binada mevcut yalıtım uygulamasının iyi yapılmadığını göstermektedir.
- Bina dış duvarlarının termal kamera ile elde edilen kızıl ötesi görüntüleri incelenerek binadaki yalıtım uygulamalarının performansı değerlendirilmiştir. Özellikle yapı bileşenlerinden olan pencere ve dış kapılarda ısı kayıpların fazla olduğu, pencere çerçevelerinin duvar ile birleştiği yerlerin iyi derecede izole edilmediği, bazı dış duvar izolasyonlarının uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu husus yukarıda ilk iki maddede verilen sonuçları da teyit etmektedir. Bu durum binada ısı kayıpların ve dolayısıyla ısıtma maliyetlerinin artacağı sonucunu göstermektedir.
- Sonuç olarak, ısı kayıplarını azaltarak ısıtma maliyetini düşürmek amacı ile mevcut binanın dış duvar, pencere ve dış kapılardaki yalıtım ve sızdırmazlık problemlerinin giderilmesi gerektiği önerilmektedir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

η_{ay}	Aylık ortalama kazanç kullanım faktörü
η_k	Kazan verimi [%]
ρ	Havanın yoğunluğu [kg/m^3]
$\phi_{i,ay}$	Aylık ortalama iç ısı kazancı [W]
$\phi_{s,ay}$	Aylık ortalama güneş enerjisi kazancı [W]
A	Yapı elemanı yüzey alanı [m^2]
A_{Top}	Binanın ısı kaybeden yüzeylerinin toplam alanı [m^2]
BK	Bodrum katı
B_y	Yıllık yakıt tüketimi [kg, m^3]
c	Havanın özgül ısı [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
FEF	Fen Edebiyat Fakültesi

H_u	Yakıtın alt ısıl değeri [kJ/kg, kJ/m ³]
NK	Normal kat
n_h	Hava değişim oranı [h ⁻¹]
Q'	Yıllık ısıtma enerjisi maksimum sınır değeri [kWh]
Q_{ay}	Aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı [kWh]
Q_{Top}	Toplam özgül ısı kaybı [W/K]
Q_t	İletim ve taşınım ile oluşan özgül ısı kaybı [W/K]
Q_v	Hava sızıntısı ile oluşan özgül ısı kaybı [W/K]
$Q_{yıl}$	Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı [kWh]
t	Zaman [s]
T_d	Aylık ortalama dış sıcaklık [°C]
T_i	Aylık ortalama iç sıcaklık [°C]
U	Toplam ısı geçiş katsayısı [W/m ² K]
V'	Hacimce hava değişim debisi [m ³ /h]
V_h	Isıtılan alan hacmi [m ³]
$V_{brüt}$	Binanın ısıtılan brüt hacmi [m ³]

YAZARLARIN KATKISI

Bu çalışma, Dr. Öğr. Üyesi Faruk ORAL danışmanlığında Ali ELHUYEYDİ tarafından hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdelhafiz, A., Balabel, A., Alwetaishi, M., Shamseldin, A., Issa, U., Sharaky, I., Al-Surf, M., & Al-Harhi, M. (2022). An Innovative Approach to Check Buildings Insulation Efficiency Using Thermal Cameras. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101740.
- Ateş, A.M., Kestane, Ö., & Ülgen, K. (2021). Üniversite Binalarının Enerji Performans Değerlendirmesi: MCBÜ Köprübaşı Meslek Yüksekokulu Örneği. *Mühendis ve Makine*, 704(62):534-555.
- Atmaca, U. (2016). TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardındaki Güncellemeler. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 154:21-35.
- Aytaç Gülten, A., & Aksoy, U.T. (2011). Kentsel Bir Alanda Isı Dağılımının Termal Görüntüleme Yöntemiyle İncelenmesi. *Engineering Sciences*, 6(4):1582-1589.
- Büyüктаş, K., Tezcan, A., Karaca, C., Gümüş, Z., & Çalışkan, R. (2019). Akdeniz Bölgesindeki Polietilen Örtülü Seraların Dolu Hasar Yoğunluğunun Termal Kamera İle Belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 24:135-141.
- Çaylı, A., Akyüz, A., Baytorun, A.N., Üstün, S., & Boyacı, S. (2016). Seralarda Isı Kaybına Neden Olan Yapısal Sorunların Termal Kamera ile Belirlenmesi. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(1):5-14.
- Demircan, H. (2020). Binalarda Meydana Gelen Isı Kayıplarının Termal Kamera Yöntemiyle Tespit Edilmesi (Adapazarı Örneği). *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 3(1):26-31.
- Elhuveydi, A. (2020). Enerji verimliliği bakımından Bitlis Eren Üniversitesi Kampüs Binalarının Enerji Etüdü. Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 103s.
- Genceli, O.F., & Parmaksızoğlu, İ.C. (2012). Kalorifer Tesisatı. İstanbul: TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları No: MMO/352/7.
- Karagüzel, U. (2019). Ti6Al4V Alaşımının Talaşlı İmalatı Sırasında Termal Kamera ile Sıcaklık Ölçümü ve Sonlu Elemanlarla Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2):265-271.
- Karakoç, T.H. (2011). KTH Kalorifer Tesisatı Hesabı Verimli Sistemler. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Nisan Kitabevi Ders Kitapları Yayınları.

- Kotan, T., Fırat, İ., Kaya, M., & Ulusu, İ. (2018). Binalarda Kullanılan Farklı Isı Yalıtım Malzemelerinin Isı İletkenlik Katsayılarının Erzincan İli Şartlarında Termokupl ve Termal Kamera ile İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2):367-381.
- Najjar, M.K., Figueiredo, K., Hammad, A.W., Tam, V.W., Evangelista, A.C.J., & Haddad, A. (2019). A framework to estimate heat energy loss in building operation. *Journal of Cleaner Production*, 235:789-800.
- Ocaña, S.M., Guerrero, I.C., & Requena, I.G. (2004). Thermographic Survey of Two Rural Buildings in Spain. *Energy and Buildings*, 36:515-523.
- Oral, F., & Elhuveydi, A. (2021). Bitlis İli Şartlarında Merkezi Isıtma Sisteminde Kullanılan Farklı Yakıt Türlerinin Ekonomik ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1):186-196.
- Rüşen, S.E., Topçu, M.A., Celep, G.K., Çeltek, S.A., & Rüşen, A. (2018). Üniversite Kampüs Binaları İçin Enerji Etüdü: Örnek Çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2): 83-92.
- TSE. (2013). TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 2013.
- Ünal, Ö., & Bayram, M. (2017, Nisan). Binalardaki Isı Kayıplarının Termal Kamera Ölçüm ve Görüntüleriyle Tespit Edilmesi Analizi ve Değerlendirilmesiyle İlgili Bir Çalışma. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 19-22 Nisan, İzmir.
- Web. (2021). <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/ti110>, Erişim tarihi: 02.11.2021.
- Zalewski, L., Lassue, S., Rouse, D., & Boukhalfa, K. (2010). Experimental and Numerical Characterization of Thermal Bridges in Prefabricated Building Walls. *Energy Conversion and Management*, 51:2869-2877.
- Zengin, M., Yılmaz, S., & Ertem Mutlu, B. (2019). Mekânsal Termal Konfor Açısından Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi Termal Kamera Görüntülerinin Analizi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50(3):239-247.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.05.2022
Kabul Tarihi : 07.07.2022

Received Date : 24.05.2022
Accepted Date : 07.07.2022

DİZEL MOTORLARDA DİMETİL ETER KULLANIMININ NO_x EMİSYONLARINA ETKİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

A REVIEW STUDY ON THE EFFECTS OF DIMETHYL ETHER ON NO_x EMISSIONS IN DIESEL ENGINES

İsmet SEZER¹ (ORCID: 0000-000-342-9172)

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İsmet SEZER, isezer@gumushane.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, dizel motorlarda dimetil eter (DME)'in saf veya yakıt katkısı olarak kullanımı üzerine yapılmış çeşitli çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak derlenmiştir. Dizel motorlarda zararlı egzoz emisyonlarını azaltmanın birkaç yöntemi vardır. Bunlardan ilki motor tasarımında ve yakıt enjeksiyon sisteminde modifikasyonlar yaparak yanmanın iyileştirilmesidir, ancak bu pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir. İkinci yöntem ise katalitik konvektör ve partikül fitresi gibi donanımlar kullanmaktır, ancak bu donanımlar motor performansını olumsuz yönde etkiler. Hem egzoz emisyonlarını azaltmak hem de motor performansını artırmak için uygulanan son yöntem çeşitli alternatif yakıtların veya yakıt katkılarının kullanılmasıdır. Dizel motorlardaki en önemli emisyonlar azot oksitler (NO_x) ve partikül maddelerdir (PM). Çoğu araştırmacı emisyonları azaltmanın en iyi yolunun doğalgaz, biyogaz, biyodizel gibi alternatif yakıtların veya konvansiyonel veya alternatif yakıtlarla birlikte çeşitli yakıt katkılarının kullanılması olduğunu bildirmektedir. Bu nedenle, alternatif yakıtlar ve yakıt katkıları üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar için oldukça önemlidir. Bu çalışma, dimetil eterin dizel motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılmasının azot oksit (NO_x) emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor performansı, dimetil eter, NO_x emisyonları, yakıt katkıları

ABSTRACT

This review study was created from the various studies which were completed on the use of dimethyl ether (DME) in diesel engines as a fuel or fuel additive. The several methods are available for the decreasing of the harmful emissions in diesel engines. The first method for the reduction of harmful emissions is improved the combustion by modification of engine design and fuel injection system, but this process is expensive and time consuming. The second method is the using various exhaust gas devices like catalytic converter and diesel particulate filter. However, the use of such devices affects negatively diesel engine performance. The last method to reduce emissions and also improve diesel engine performance is the use of various alternative fuels or fuel additives. The major pollutants of diesel engines are oxides of nitrogen (NO_x) and particulate matter (PM). It is very difficult to reduce NO_x and PM simultaneously in practice. The most researches declare that the best way to reduce these emissions is the use of various alternative fuels i.e. natural gas, biogas, biodiesel or using some additives with the alternative fuels or conventional diesel fuel. Therefore, it is very important that the results of various studies on alternative fuels or fuel additives are evaluated together to practice applications. Especially, this study focuses on the usage of dimethyl ether in diesel engines as fuel or fuel additive. This review study investigates the effects of using dimethyl ether on nitrogen oxides (NO_x) emissions.

Keywords: Diesel engine performance, dimethyl ether, NO_x emissions, fuel additives

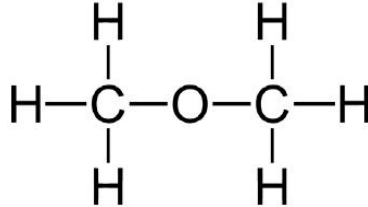
ToCite: SEZER, İ., (2022). DİZEL MOTORLARDA DİMETİL ETER KULLANIMININ NO_x EMİSYONLARINA ETKİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 381-398.

GİRİŞ

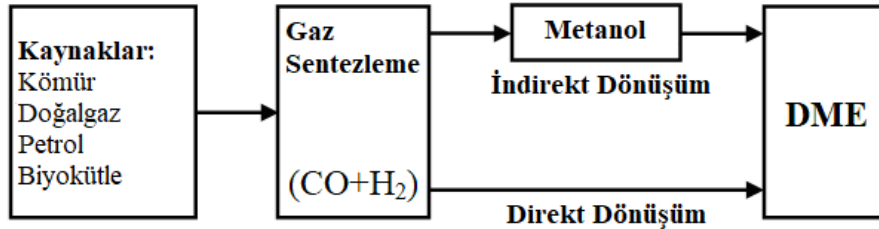
Dizel motorlar yüksek tork, düşük yakıt tüketimi ve benzin motorlarına kıyasla daha düşük hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) emisyonu seviyeleri nedeniyle taşıtlar için başlıca güç kaynağıdır (Yoon vd., 2010). Ancak, dizel motorları atmosfere benzin motorlarından daha yüksek seviyede partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonu yaymaktadırlar. Bu nedenle, birçok araştırmacı daha düşük emisyon değerlerine sahip dizel motorlar geliştirmeye yönelik ve daha temiz emisyon üretebilecek alternatif yakıtlar üzerine sürekli araştırmalar yapmaktadır (Youn vd., 2011). Çeşitli alternatifler arasında, dimetil eter (DME) kömürden, doğalgazdan ve farklı biyokütle kaynaklarından üretilebilmesi nedeniyle oldukça umut verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir (Alam & Kajitani, 2001). Ancak, DME'nin düşük viskozite, yetersiz yağlayıcılık, düşük yanma entalpisi ve düşük kaynama noktası gibi fiziksel özellikleri dizel motorların temel yapısında ve yardımcı donanımlarında modifikasyonlar yapılmasını gerektirmektedir. DME'nin saf olarak kullanılabilmesi dizel motorlu taşıtlar hala geliştirme aşamasındadır. Bununla birlikte, DME dizel yakıtı veya diğer alternatif yakıtlarla birlikte kullanılabilir (Maji vd., 2014). Bu nedenle, DME'in kullanımı üzerine yapılmış çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Bu derleme çalışması DME kullanımının PM emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

DİMETİL ETERİN KARAKTERİSTİKLERİ

DME, Şekil 1'de kimyasal yapısından da görüleceği gibi CH₃-O-CH₃ kimyasal formülüne sahip basit eterlerden birisidir. Genel olarak, DME'in fiziksel özellikleri sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)'nin özelliklerine çok benzerdir. Bu nedenle, DME'in depolanması, nakliyesi ve yakıt istasyonlarında taşıtların deposuna aktarılması ilgili gereklilik ve şartlar LPG ile aynıdır (Alam & Kajitani, 2001). Şekil 2'de gösterildiği gibi, DME direkt veya indirekt sentetik metotlarla üretilebilmektedir. Direkt üretim yönteminde DME doğrudan doğalgazdan üretilirken, indirekt üretim yönteminde metanolün sentetik dehidrasyonu ile üretilebilmektedir (Park & Lee, 2014). Enerji eşdeğerli değerlendirme yapıldığında DME'in üretimi benzin veya dizel yakıtından daha ucuza mal olmaktadır. Büyük çapta üretim tesisleri dikkate alındığında DME'nin üretim maliyeti sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) veya sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretim maliyetine benzerdir (Wattanavichien, 2009). DME oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta gaz fazında olup zehirsizdir. Bu nedenle, DME'nin 0.5 MPa üzerindeki bir basınçta sıvılaştırılması gerekir. DME'in taşıt üzerinde yakıt tankından motora sevk edilebilmesi sırasında buhar tıkaçı oluşumunu engellemek için yakıt enjeksiyon sisteminde basıncın 1.7–2.0 MPa aralığına yükseltilmesi gerekir (Duan vd., 2012; Kowalewicz & Wojtyniak, 2005).



Şekil 1. DME'in Kimyasal Yapısı (Park & Lee, 2014)



Şekil 2. DME'in Üretim Yöntemleri (Azizi vd., 2014)

Dizel yakıtı ve DME'in yakıt özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi DME'in yakıt özellikleri dizel yakıtından oldukça farklıdır. Yüksek buharlaşma basıncı ve düşük kaynama noktası değerlerine sahip olduğundan DME atmosferik basınç ve oda sıcaklığında gaz fazındadır. Diğer taraftan, DME'in ısıl değeri dizel yakıtının yarısı kadardır. Bu nedenle, yakıt besleme sistemi, yakıt püskürtme sistemi ve yanma odasının yeniden tasarlanması gerekmektedir (Huang vd., 2009). DME'nin setan sayısı dizel yakıtından daha yüksek olması

nedeniyle daha iyi tutuşma özelliklerine sahiptir. DME'in buharlaşma gizli ısısı dizel yakıtına kıyasla oldukça yüksek olduğundan yakıt-hava karışımının sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olur.

Tablo 1. DME ve Dizel Yakıtının Özellikleri

Özellik	DME	Dizel
Kimyasal formülü	CH ₃ -O-CH ₃	C _x H _y
Moleküler ağırlığı, g	46.07	170
Kaynama noktası, °C	-24.9	180-360
Sıvı fazdaki yoğunluğu, kg/lt	668	840
Sıvı fazdaki viskozitesi, cP	0.15	4.4-5.4
Alt ısı değeri, kJ/kg	28430	42500
Tutuşma sıcaklığı, °C	235	250
Setan sayısı	55-60	40-55
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	9	14.6
Elastisite modülü, N/m ²	6.37x10 ⁸	1.486x10 ⁹
Kütlesel karbon oranı	52.2	86
Kütlesel hidrojen oranı	13	14
Kütlesel oksijen oranı	34.8	0

DME sadece C-H ve C-O kimyasal bağına sahip olup direkt C-C bağına sahip değildir ve içeriğinde % 34.8 oksijen bulundurur. Bu özellikleri sayesinde, DME'nin yanması sırasında nerdeyse hiç PM üretimi olmaz, düşük gürültü seviyesi ortaya çıkar ve yüksek oranda egzoz gazı resirkülasyonunu (EGR) tolere edilebildiğinden NOx emisyonunun azaltılmasında dizel yakıtından daha avantajlıdır (Wattanavichien, 2009). DME'nin düşük viskozitesi yakıt besleme sisteminde sızıntılara neden olabileceğinden daha düşük toleranslı parçalar kullanılması gerekir. DME'in yetersiz yağlama özelliği yakıt sistemindeki hareketli parçalarda aşınmalara neden olabilir. Bu nedenle, DME'nin içerisine sızıntı ve aşınmayı önleyici katkıları katılması gereklidir. DME'in sıkıştırılabilirliği dizel yakıtından daha fazla olduğundan yakıt sisteminde yakıtın nakledilebilmesi için daha fazla pompalama işine ihtiyaç vardır. Genel olarak, DME korozif yapısı nedeniyle kauçuk esaslı materyallerin yapısını bozar. Bu nedenle, yakıt sistemindeki kauçuk esaslı materyaller DME'nin korozif etkilerine dayanıklı malzemelerle değiştirilmelidir (Yoon vd., 2010). DME'in bir diğer avantajı ise metal malzemeler için korozif olmayışıdır (Park & Lee, 2014).

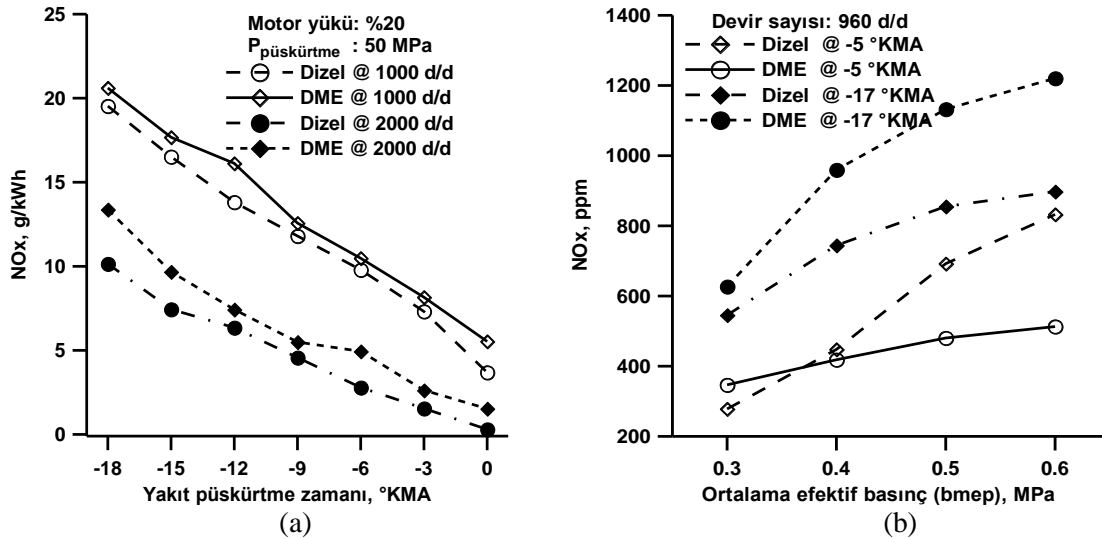
DİMETİL ETER İLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde, DME'in üretim teknolojileri, yakıt özellikleri, yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine yapılmış oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Üretim teknolojileri üzerine yapılmış çalışmalarda (Inayat vd., 2017; Lecksiwilai vd., 2016; Azizi vd., 2014) farklı üretim teknikleri incelenmiş ve bunlar maliyet açısından değerlendirilmiştir. Yakıt özellikleri üzerine yapılmış çalışmalarda (Maji vd., 2015; Park & Lee, 2014; Park & Lee 2013; Teng vd., 2001) özellikle DME'in dizel yakıtından farklı olan içeriğinde oksijen bulunması, düşük yoğunluk ve düşük viskozite gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra düşük yağlayıcılık gibi yetersiz yönleri incelenmiştir. Püskürtme karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Mohan vd., 2017; Jalanapurkar vd., 2015; Lim & Iida, 2015; Guangxin vd., 2013; Genbao vd., 2012; Xu vd., 2012; Kim vd., 2011; Suh & Lee, 2008) DME'in düşük yoğunluk ve düşük viskozite sayesinde püskürtme karakteristiklerini nasıl iyileştirdiğiyle ilgili incelemeler yapılmıştır. Yanma karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Benajes vd., 2018a; Benajes vd., 2018b; Lamani vd., 2017; Baskaran, 2015; Wang vd., 2015; El-Hagar, 2014; Jeon vd., 2014; Khunaphan vd., 2013; Park & Lee, 2013; Park, 2012; Chapman & Boehman, 2008; Ying vd., 2005; Oda vd., 2004; Song vd., 2004) DME'in tutuşma gecikmesi süresi, yanma süresi, kütleli yanma oranı, silindir basıncı ve yanma sıcaklıkları gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motor performans karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Abhishek vd., 2017; Hewu & Longbao 2017; Kropiwnicki vd., 2017; Smolec vd., 2017; Theinnoi vd., 2017; Vispute & Pawar, 2016; Deepak vd., 2015; Prabhakaran vd., 2015; Ryu vd l., 2014; Taghavifar vd., 2014; Wang vd., 2013; Patil & Thipse 2012; Li, 2011; Sezer, 2011; Namasivayam vd., 2010; Ying vd., 2010; Jang & Bae, 2009; Arcoumanis vd ., 2008; Semelsberger vd., 2006; Kajitani, 2004; Kajitani & Chen, 2003; Chen vd., 2000) DME'in döndürme momenti (tork), efektif motor gücü, özgül ve toplam yakıt tüketimi ve efektif verim gibi başlıca performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Egzoz emisyonu karakteristikleriyle ilgili yapılan çalışmalarda (Ambekar & Hole, 2018; Bogdan vd., 2017; Geng vd., 2017; Kim & Park, 2016; Park vd., 2016; Roh vd., 2015; Hou vd., 2014; Park vd., 2014; Thomas vd., 2014; Wang vd., 2014; Yanju vd., 2014; Zhao vd., 2014; Yoon vd., 2013; Kim vd., 2012; Loganathan vd., 2013; Loganathan vd., 2012; Zhu vd., 2012; Park vd., 2010;

Xinling & Zhen, 2009; Ying vd., 2006; Longbao vd., 2002; Wang vd., 2000) DME'in daha çok karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), partikül madde (PM) veya is, azot oksitler (NO_x) ve karbondioksit (CO₂) gibi genel emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sunulan çalışmada ise sadece DME'in NO_x emisyonlarına etkileri üzerine yoğunlaşmıştır.

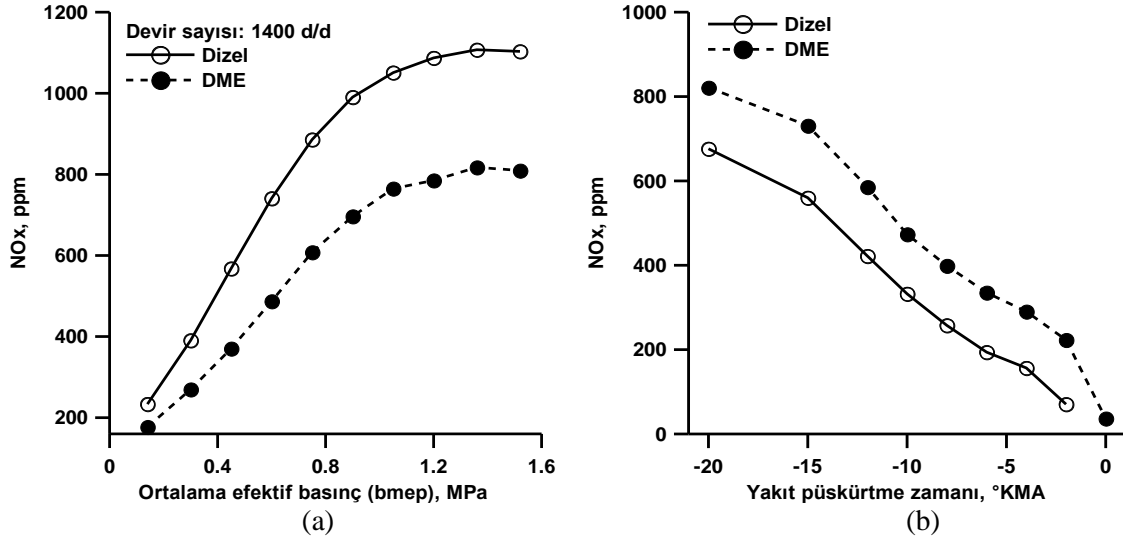
DİMETİL ETERİN NO_x EMİSYONLARINA ETKİLERİ

Şekil 3(a) dizel ve DME yakıtları için farklı yakıt püskürtme zamanı değerlerinde NO_x emisyonunun değişimi verilmiştir. NO_x emisyonu oluşumu yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlıdır. Şekilden görüldüğü gibi püskürtme avansının artırılması her iki yakıt için NO_x emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Bunun nedeni püskürtme avansının artırılmasının maksimum yanma sıcaklığının ve basıncının üst ölü nokta civarında ortaya çıkmasına neden olmasıdır. Diğer taraftan, DME yakıtı kullanıldığında NO_x emisyonu dizel yakıtına kıyasla bir miktar artmıştır. Bu durum DME'in tutuşma sıcaklığının düşük olması nedeniyle yanmanın daha erken başlaması sebebiyle yanma sıcaklığının artmasından kaynaklanmaktadır. DME'in içeriğinde bulunan oksijen de NO_x emisyonunun artmasına katkı sağlamaktadır (Youn vd., 2011). Şekil 3(b)'de dizel ve DME yakıtları için farklı yakıt püskürtme zamanı ve ortalama efektif basınç değerlerinde NO_x emisyonunun değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi püskürtme zamanının ve ortalama efektif basıncın artırılması NO_x emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Bunun muhtemel sebebi yanmanın erken başlaması veya ortalama efektif basıncın artması sebebiyle yanma sıcaklığının artmasıdır. Diğer taraftan DME içeriğindeki oksijen sayesinde yanma sıcaklığını artırarak dizel yakıtına göre daha yüksek NO_x emisyonu vermiştir (Alam & Kajitani, 2001).

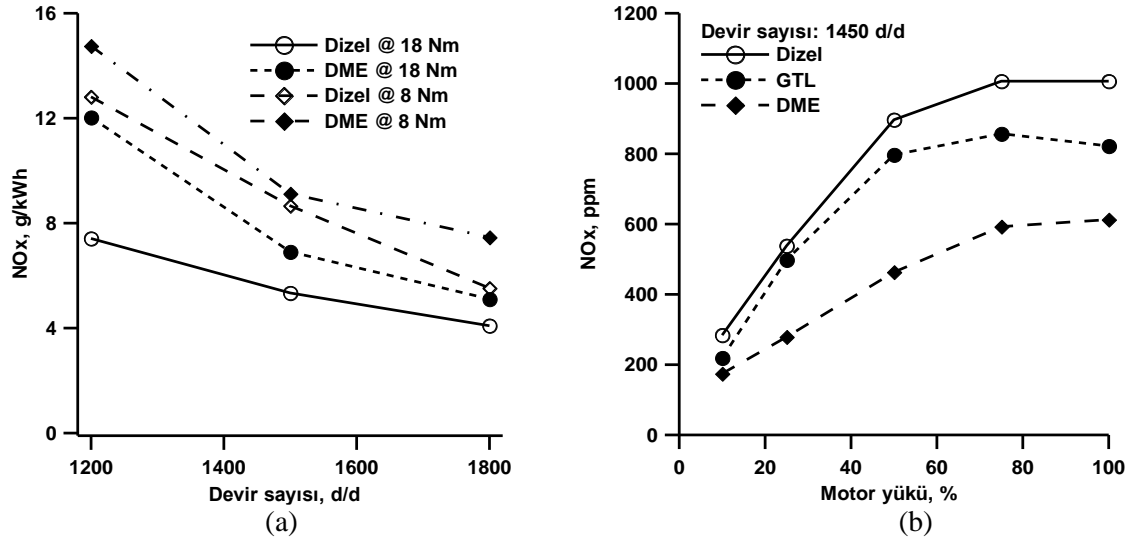


Şekil 3. NO_x Emisyonunun Dizel ve DME Yakıtları için A) Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Youn vd., 2011) ve B) Ortalama Efektif Basınç ile (Alam & Kajitani, 2001) Değişimi

Şekil 4(a)'da dizel yakıtı ve DME için farklı ortalama efektif basınç değerlerinde NO_x emisyonunun değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME dizel yakıtına kıyasla tüm ortalama efektif basınç değerlerinde daha düşük NO_x emisyonu değerleri vermiştir. 1.52 MPa ortalama efektif basınç değerinde DME dizel yakıtına göre NO_x emisyonunda %28.1 azalma sağlamıştır. DME kullanıldığında daha fazla yakıt püskürtülmesi sebebiyle tutuşma gecikmesi süresinin uzaması ve buharlaşma gizli ısısının yüksek olması sebebiyle yanma sıcaklığının düşmesi NO_x emisyonunun azalmasına neden olmaktadır (Huang vd., 2009). Şekil 4(b)'de dizel ve DME yakıtları için NO_x emisyonunun farklı yakıt püskürtme zamanı değerlerinde değişimi verilmiştir. DME'in yüksek setan sayısı sayesinde daha erken tutuşması yanma işlemini daha erken başlatmakta ve yanma sıcaklığını artırarak NO_x emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan, aynı gücü sağlamak için silindire daha fazla DME püskürtülmesi nedeniyle yanma işlemi daha uzun sürmekte ve silindirde daha uzun süre yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. NO_x oluşumu yanma sıcaklığına, silindirdeki oksijen miktarına ve yanma süresine bağlı olduğundan DME kullanıldığında NO_x emisyonu artmaktadır (Park & Lee, 2013).

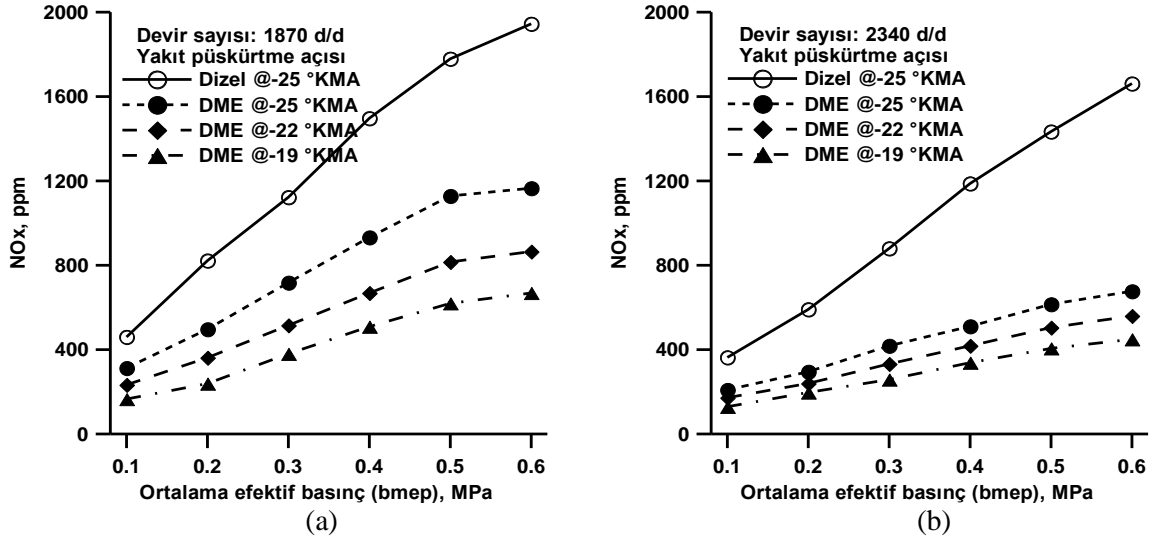


Şekil 4. NOx Emisyonunun Dizel ve DME Yakıtları için A) Ortalama Efektif Basınç ile (Huang vd., 2009) ve B) Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Park & Lee, 2013) Değişimi



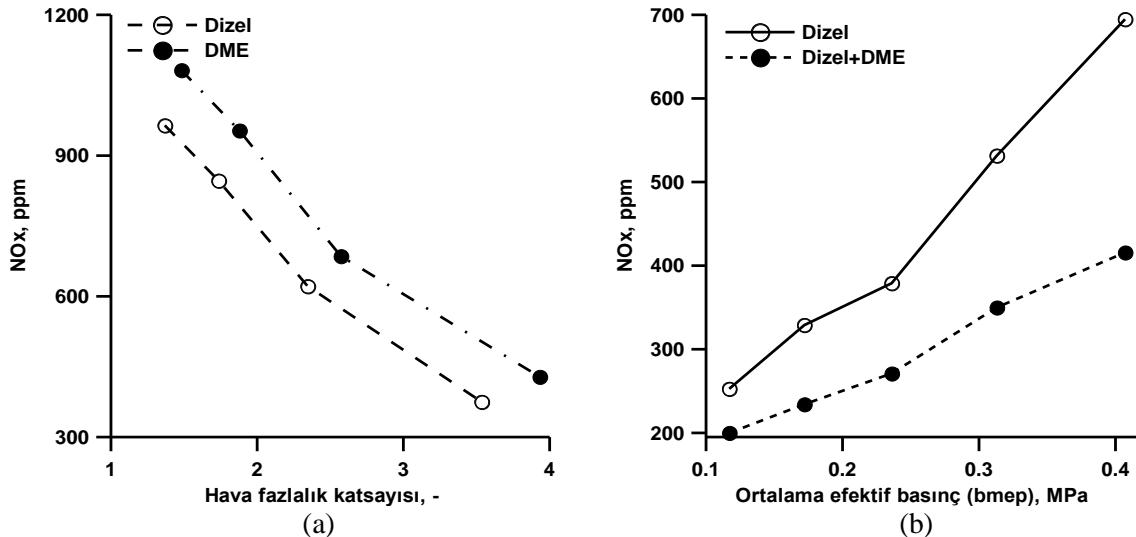
Şekil 5. NOx Emisyonunun A) Dizel ve DME Yakıtları için Devir Sayısı ile (Jeon vd., 2014) ve B) Dizel, GTL ve DME Yakıtları için Motor Yükü ile (Xinling & Zhen, 2009) Değişimi

Şekil 5(a)'da dizel ve DME yakıtları için farklı tork ve devir sayısı değerlerinde NOx emisyonunun değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME aynı tork değerinde dizel yakıtına göre daha yüksek NOx değerleri vermiştir. DME yüksek setan sayısı, hızlı yanma özelliği ve oksijen içeriği sayesinde NOx emisyonunun artmasına neden olmaktadır. NOx emisyonu oluşumu yanma sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısına kuvvetli şekilde bağlıdır. DME'in kısa tutuşma gecikmesi süresi ve hızlı buharlaşma karakteristikleri kısa süre içinde hızlı yanmaya neden olmaktadır. Diğer taraftan, DME'in içeriğindeki %38.4 oranındaki oksijen yanma için ekstra oksijen sağlayarak yüksek yanma sıcaklıklarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır ve yüksek sıcaklıkta NOx emisyonu oluşumu artmaktadır. İlave olarak DME'in düşük hava-yakıt oranı fakir karışımla çalışma sayesinde daha verimli bir yanma ve daha yüksek yanma sıcaklığı sağlayarak DME kullanıldığında NOx emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Düşük devir sayılarında yanma işlemi üst ölü nokta civarında gerçekleştiğinden NOx emisyonu artmakta, yüksek devir sayılarında yanma işlemi genişleme zamanına kaydığından yanma sıcaklıkları düşer ve NOx emisyonu üretimi azalır (Jeon vd., 2014). Şekil 5(b)'de dizel, GTL ve DME yakıtları için 1450d/d devir sayısında motor yüküne bağlı olarak NOx emisyonunun değişimi verilmiştir. GTL ve DME yakıtları tüm motor yükü değerlerinde dizel yakıtına kıyasla daha düşük NOx emisyonu değerleri vermiş ve NOx emisyonunu ortalama %15.6 ve %48.2 oranında azaltmışlardır. GTL ve DME yakıtları kullanıldığında NOx emisyonundaki azalma bu yakıtların kısa tutuşma gecikmesi süresi sayesinde sağladığı düşük yanma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, GTL ve DME yakıtlarının düşük yoğunluğu ve aromatik içeriklerinin NOx emisyonunun azalmasına katkı sağladığı düşünülmektedir (Xinling & Zhen, 2009).



Şekil 6. NOx Emisyonunun Dizel ve DME Yakıtları için A) 1870 d/d’da ve B) 2340 d/d’da Ortalama Efektif Basınç ile Değişimi (Zhu vd., 2012)

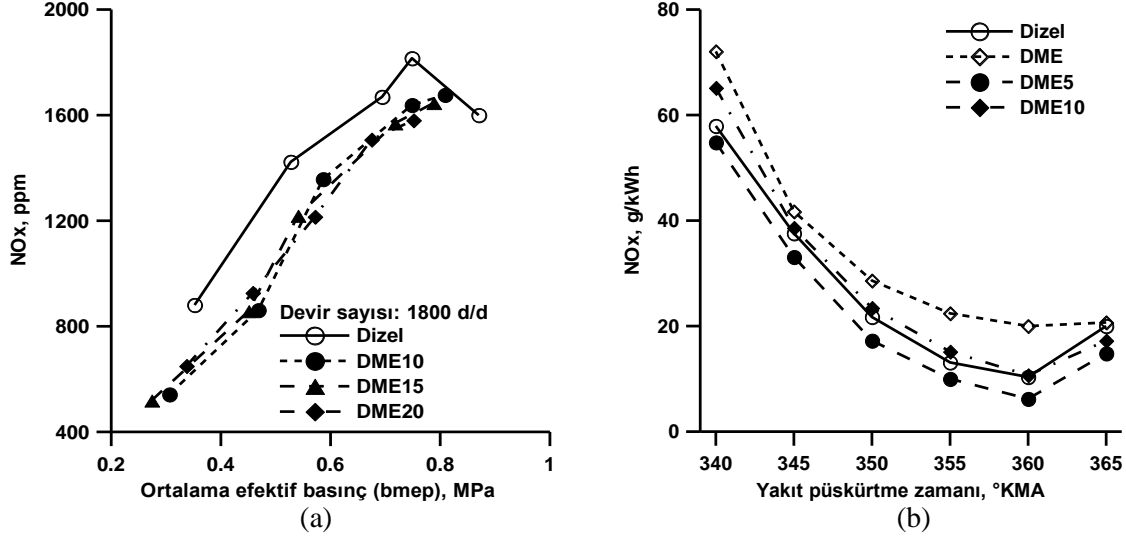
Şekil 6(a) ve (b)’de iki farklı devir sayısında dizel ve DME yakıtları için NOx emisyonunun ortalama efektif basınç ve yakıt püskürtme açısı ile değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi motor yükü arttıkça yanan yakıt miktarının artmasıyla yanma sıcaklığının yükselmesi NOx emisyonu miktarını artırmaktadır. Diğer taraftan, devir sayısı arttıkça NOx emisyonu azalmaktadır. Devir sayısının artması sürtünme kayıplarını artırmakta bu nedenle daha fazla güç elde etmek için daha fazla yakıt yakılması gerekir ve yanma sıcaklığı yükselir. Ancak bu yüksek sıcaklık kısa sürer ve reaksiyon süresi azaldığından NOx emisyonu oluşumu azalır. DME yakıtı kullanıldığında ise dizel yakıtına kıyasla NOx emisyonu %50’den daha fazla azalmaktadır. Bu durum DME’in yüksek setan sayısı ve yüksek buharlaşma gizli ısı gibi yakıt özelliklerinden kaynaklanmaktadır. DME’in yüksek setan sayısı sayesinde tutuşma gecikmesi süresini kısaltması böylece yanmanın daha kısa sürmesi ve hızlı buharlaşma sayesinde yanma sıcaklığı düşmektedir. Bunun sonucunda DME kullanıldığında NOx emisyonu azalmaktadır. Öte yandan, püskürtme avansının geciktirilmesi NOx emisyonunun %20-35 oranında azalmasını sağlamaktadır. Püskürtme zamanının geciktirilmesi DME’in kısa tutuşma gecikmesi süresi sayesinde üst ölü nokta civarında yanan yakıt miktarını azaltmakta ve böylece yanma sıcaklığı ve NOx emisyonu azalmaktadır (Zhu vd., 2012).



Şekil 7. NOx Emisyonunun A) Dizel ve DME Yakıtları için Hava Fazlalık Katsayısı ile (Oda vd., 2004) ve B) Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımı için Ortalama Efektif Basınç ile (Duan vd., 2012) Değişimi

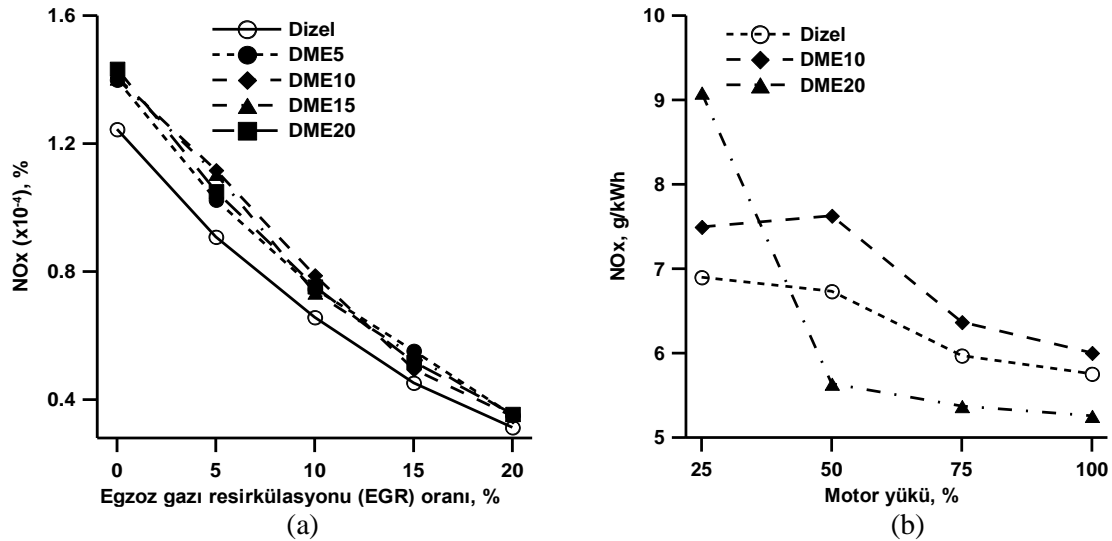
Şekil 7(a)’da NOx emisyonunun dizel ve DME yakıtları için hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. DME dizel yakıtına kıyasla biraz daha yüksek NOx emisyonu değerleri vermiştir. DME’in içeriğinde bulunan oksijen ve diğer yakıt özellikleri sayesinde daha verimli bir yanma sağlayıp yanma sıcaklığını artırması sebebiyle NOx emisyonu artmaktadır (Oda vd., 2004). Şekil 7(b)’de NOx emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımı için

ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME karışımı dizel yakıtına kıyasla daha düşük NO_x emisyonu vermiştir. Bu durum DME'in yüksek buharlaşma gizli ısısı ve düşük ısıl değeri nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek yük değerlerinde egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) miktarı arttığından dizel-DME karışımı için NO_x emisyonundaki düşüş daha fazla olmuştur (Duan vd., 2012).



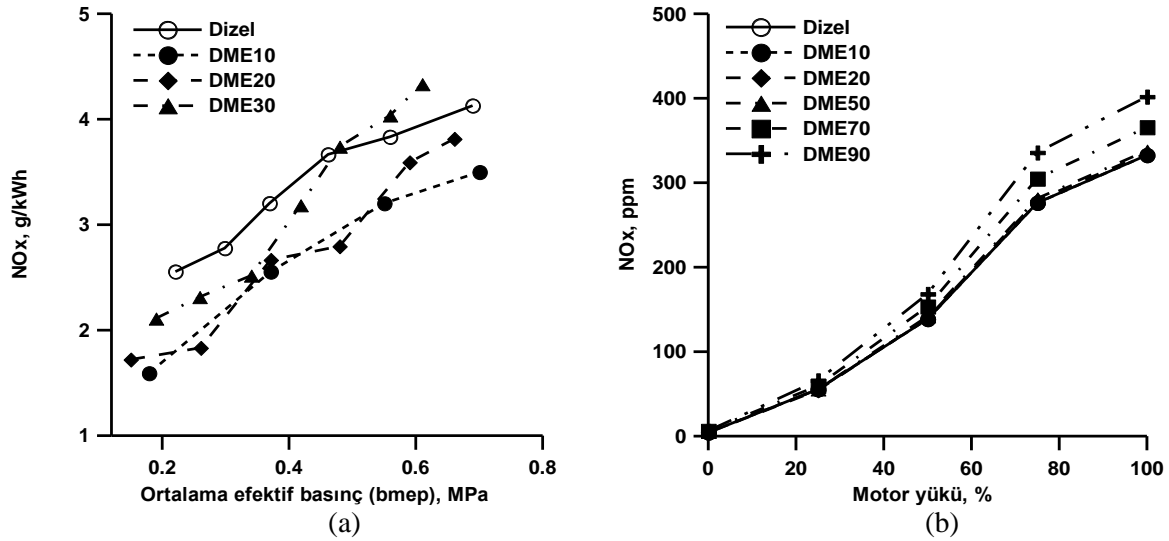
Şekil 8. NO_x Emisyonunun Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımları için A) Ortalama Efektif Basınç ile (Jalanapurkar vd., 2015) ve B) Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Lim & İida, 2015) Değişimi

Şekil 8(a)'da NO_x emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada DME10, DME15 ve DME20 olmak üzere üç farklı yakıt karışımı kullanılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi dizel yakıtına DME katılması NO_x emisyonunun bir miktar azalmasını sağlamıştır. Bu durum DME'in buharlaşma gizli ısısının yüksek ve ısıl değerinin düşük olması sebebiyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır (Jalanapurkar vd., 2015). Şekil 8(b)'de dizel yakıtı, DME ve dizel-DME karışımları için NO_x emisyonunun yakıt püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi saf DME dizel yakıtına göre biraz yüksek NO_x değerleri verirken DME karışımları NO_x emisyonunun bir miktar azalmasını sağlamıştır. DME saf olarak kullanıldığında bazı yakıt özellikleri sayesinde yanma sıcaklığını artırması ve içeriğindeki oksijen nedeniyle NO_x emisyonu artmaktadır. Diğer taraftan, DME dizel yakıtına katıldığında ısıl değeri düşük ve buharlaşma gizli ısısı yüksek olduğundan yanma sıcaklığını düşürerek NO_x emisyonunu azaltmaktadır. Şekilden görülen diğer bir durum ise püskürtme zamanı geciktirildikçe yanma işleminin genişleme sürecine sarkması sonucu yanma sıcaklığının düşmesi nedeniyle NO_x emisyonunun azalmasıdır (Lim & İida, 2015).



Şekil 9. NO_x Emisyonunun Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımları için A) EGR Oranı ile (Lamani vd., 2017) ve B) Motor Yükü ile (Prabhakaran vd., 2015) Değişimi

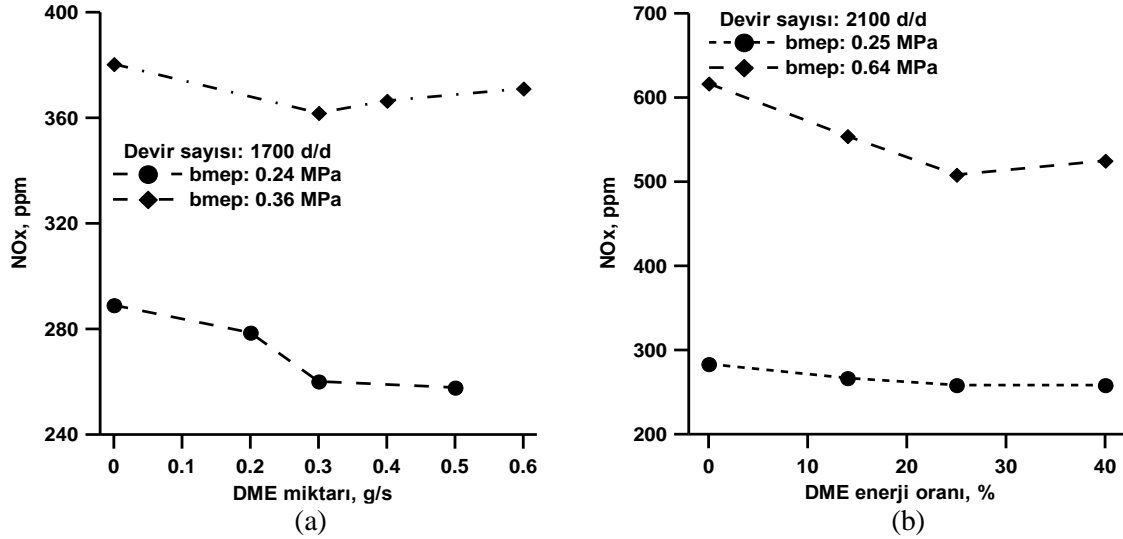
Şekil 9(a)'da NO_x emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için EGR oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME karışımları kullanıldığında NO_x emisyonu bir miktar artmıştır. NO_x oluşumu yanma odasındaki bölgesel sıcaklıklara, reaksiyon süresine ve oksijen miktarına bağlı olarak değişmektedir. DME yüksek setan sayısı sayesinde daha erken tutuşma sağlayarak yanma sıcaklığını artırdığından ve içeriğinde oksijen bulunması nedeniyle NO_x emisyonunu artırmaktadır. Diğer taraftan EGR oranının artması yanma odasındaki oksijen miktarını düşürdüğünden NO_x emisyonu azalmaktadır (Lamani vd., 2017). Şekil 9(b)'de NO_x emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME10 karışımı kullanıldığında NO_x emisyonu dizel yakıtına göre bir miktar artarken DME20 karışımı kullanıldığında genelde dizel yakıtından daha düşük NO_x değerleri elde edilmiştir. Bu durum DME10 karışımı kullanıldığında DME'in içeriğindeki oksijen sayesinde yanma sıcaklığının artmasından DME20 karışımı kullanıldığında ise DME'in gizli buharlaşma ısısı nedeniyle yanma sıcaklığının azalmasından kaynaklanmaktadır (Prabhakaran vd., 2015).



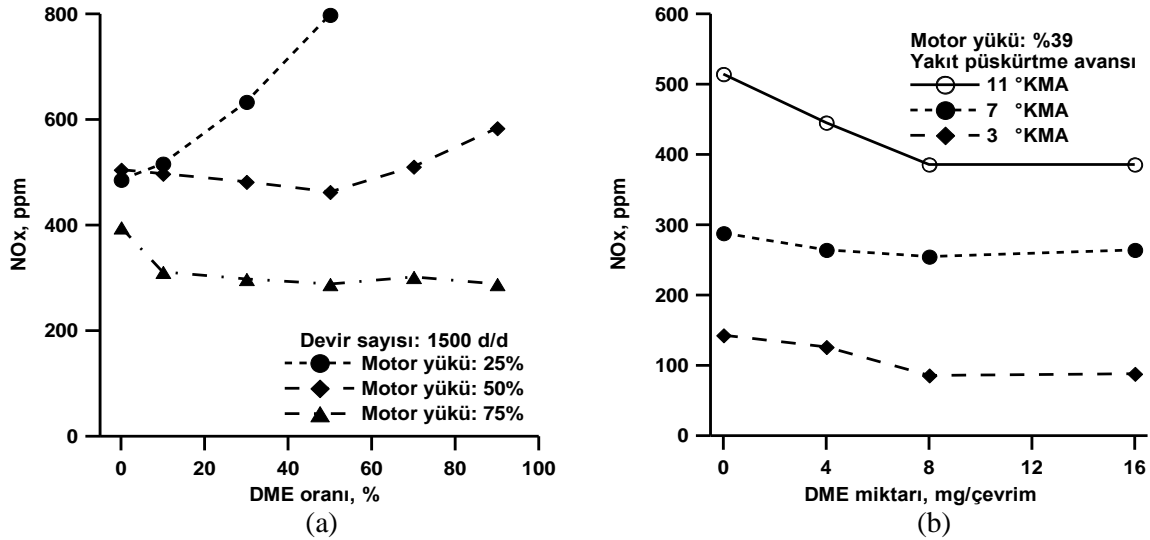
Şekil 10. NO_x Emisyonunun Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımları için A) Ortalama Efektif Basınç ile (Ying vd., 2006) ve B) Motor Yükü ile (Ambekar & Hole, 2018) Değişimi

Şekil 10(a)'da NO_x emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME karışımları dizel yakıtına göre daha düşük NO_x değerleri vermiştir. DME yüksek setan sayısına ve düşük tutuşma sıcaklığına sahip olduğu için tutuşma gecikmesini kısaltmakta ve ilk yanma fazı kısa sürdüğünden yanma sıcaklığı düşük olmaktadır. Bu ise DME karışımları kullanıldığında daha düşük NO_x emisyonu değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME'in elastisite modülü düşük olduğundan DME karışımları kullanıldığında püskürtme zamanı geciktirilmekte ve yanma işlemi genişleme sürecine sarktığından yanma sıcaklığı düşmekte bu ise NO_x emisyonunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Ying vd., 2006). Şekil 10(b)'de NO_x emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME karışımları dizel yakıtına göre biraz daha yüksek NO_x emisyonu değerleri vermiş ve karışımdaki DME oranı arttıkça NO_x emisyonu da artmıştır. Bu durum DME'in yanmayı iyileştirici yakıt özellikleri sayesinde yanma sıcaklığını artırmasından ve içeriğinde oksijen bulunmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, motor yükü arttıkça silindire püskürtülen yakıt miktarının artması yanma sıcaklığını artırarak NO_x emisyonunun artmasına neden olmaktadır (Ambekar & Hole, 2018).

Şekil 11(a)'da NO_x emisyonunun iki farklı ortalama efektif basınç değerinde ve 1700 d/d devir sayısında dizel-DME çift yakıtlı motor için DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtlı çalışma durumunda NO_x emisyonu bir miktar azalmıştır. Bu durum DME'in yanma sıcaklığını düşüren etkilerinden kaynaklanmaktadır (Wang vd., 2015). Şekil 11(b)'de NO_x emisyonunun iki farklı ortalama efektif basınç değerinde ve 2100 d/d devir sayısında dizel-DME çift yakıtlı motor için DME enerji oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtlı çalışma durumunda NO_x emisyonu bir miktar azalmıştır. NO_x emisyonu oluşumu kullanılan yakıtın özelliklerine ve yanma işlemine bağlı olup genellikle yüksek yanma sıcaklığında ve yanma odasındaki oksijen miktarı arttığında artar. Bu nedenle DME oranı arttıkça NO_x emisyonu azalma eğilimi göstermiştir. Diğer taraftan, DME oranı arttıkça silindire gönderilen EGR oranı artırıldığından yanma odasındaki oksijen miktarı ve yanma sıcaklığı azalarak NO_x emisyonu oluşumunu azaltmaktadır (Wang vd., 2013).



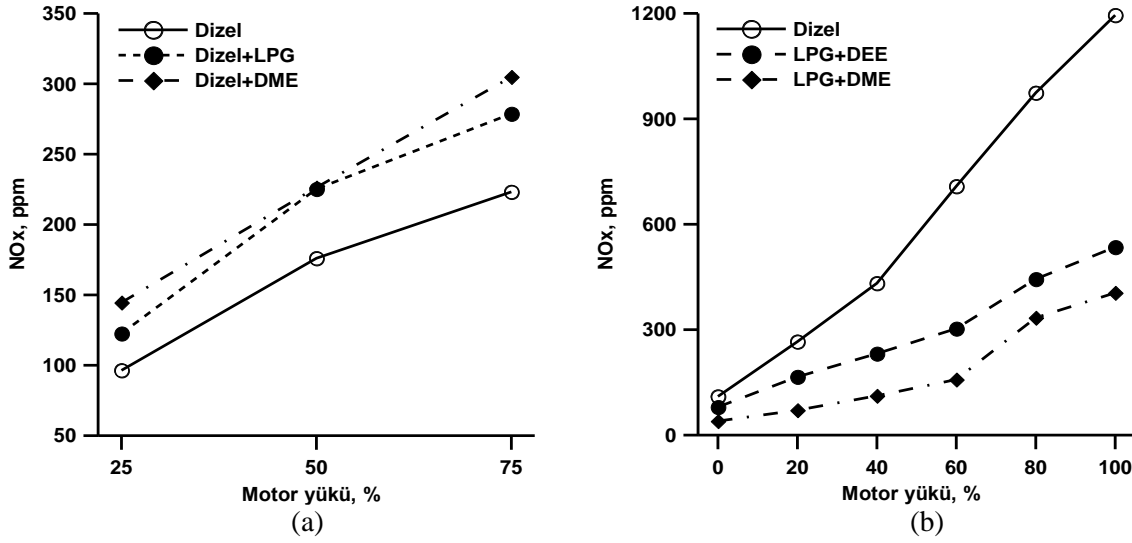
Şekil 11. NOx Emisyonunun Dizel-DME Çift Yakıtlı Motor için A) DME Miktarı ile (Wang vd., 2015) ve B) DME Enerji Oranı ile (Wang vd., 2013) Değişimi



Şekil 12. NOx Emisyonunun Dizel-DME Çift Yakıtlı Motor için A) DME Oranı ile (Theinnoi vd., 2017) ve B) DME Miktarı ile (Wang vd., 2014) Değişimi

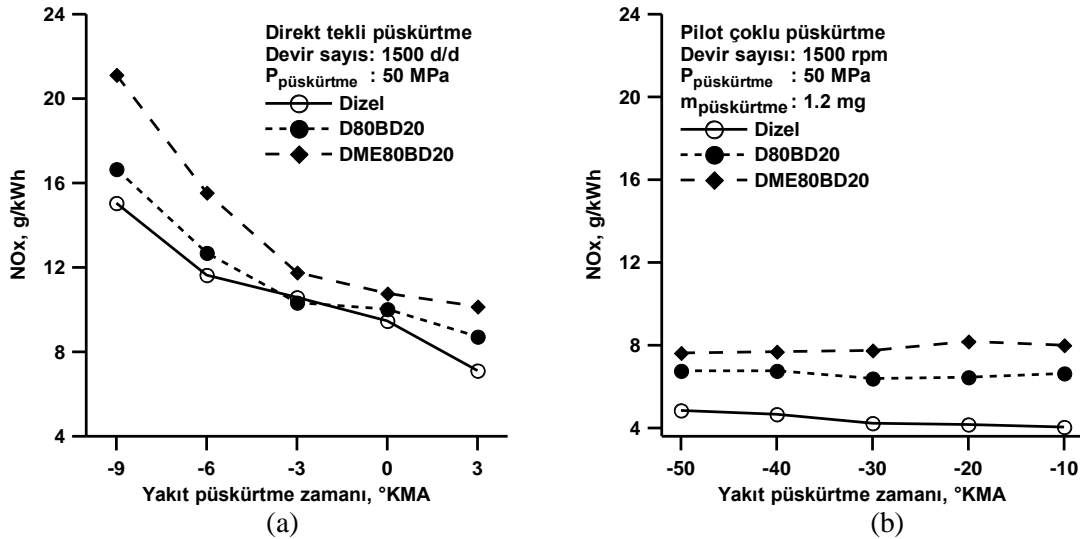
Şekil 12(a)'da NOx emisyonunun farklı motor yüklerinde ve 1500 d/d devir sayısında dizel-DME çift yakıtlı motor için DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtla çalışma durumunda özellikle %25 ve %50 motor yükü değerlerinde DME katkısı arttıkça NOx emisyonu bir miktar artmıştır. NOx emisyonu oluşumu temel olarak yüksek yanma sıcaklığına ve yanma odasındaki oksijen miktarına bağlıdır. DME'in yanmayı iyileştirici özellikleri sayesinde yanma sıcaklığının artması ve içeriğinde oksijen bulunması NOx emisyonunun artmasına neden olmaktadır (Theinnoi vd., 2017). Şekil 12(b)'de NOx emisyonunun %39 motor yükünde ve farklı yakıt püskürtme avansı değerlerinde dizel-DME çift yakıtlı motor için DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtla çalışma durumunda NOx emisyonu DME oranının artmasıyla azalmıştır. Bu durum DME'in yanma sıcaklığını düşürmesinden ve DME oranı arttıkça EGR oranının artırılması sonucu yanma odasındaki oksijen miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır (Wang vd., 2014). Şekil 13(a)'da NOx emisyonunun dizel yakıtı, dizel-LPG karışımı ve dizel-DME karışımı için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-LPG ve dizel-DME karışımları kullanıldığında NOx emisyonu dizel yakıtına kıyasla bir miktar artmıştır. Bu durum LPG ve DME'in daha yüksek yanma sıcaklıkları vermesinden ve DME'in içerinde oksijen bulunmasından kaynaklanmaktadır (Khunaphan vd., 2013). Şekil 13(b)'de NOx emisyonunun dizel yakıtı, dizel-DEE karışımı ve dizel-DME karışımı için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DEE ve dizel-DME karışımları kullanıldığında özellikle orta ve yüksek motor yüklerinde NOx emisyonu dizel yakıtına kıyasla önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum DEE ve DME'in yüksek gizli

buharlaştırma ısıları ve düşük ısı değerleri nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır (El-Hagar, 2014).



Şekil 13. NOx Emisyonunun A) Dizel Yakıtı, Dizel-LPG Karışımı ve Dizel-DME Karışımı için Motor Yüğü ile (Khunaphan vd., 2013) ve B) Dizel Yakıtı, LPG-DEE Karışımı ve LPG-DME Karışımı için Motor Yüğü ile (El-Hagar, 2014) Değişimi

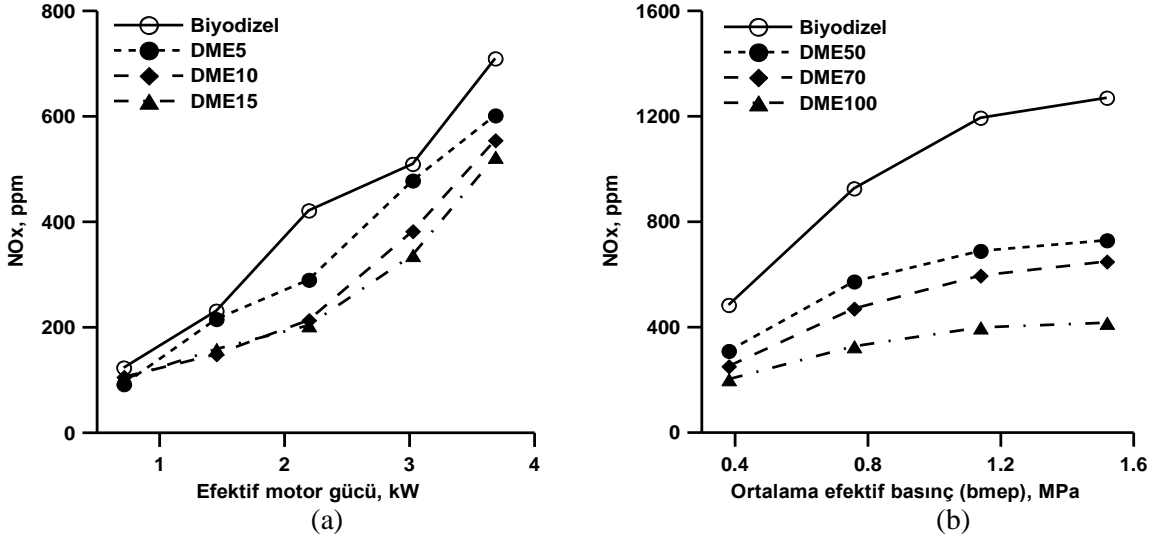
Şekil 14(a) ve (b)'de NOx emisyonunun dizel yakıtı, dizel-biyodizel (BD80D20) karışımı ve biyodizel-DME (DME80BD20) karışımı için direkt tekli püskürtme ve pilot çoklu püskürtme durumunda 1500 d/d devir sayısında değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi hem direkt tekli püskürtme hem de pilot çoklu püskürtme durumunda BD80D20 ve DME80BD20 karışımları dizel yakıtına göre daha yüksek NOx emisyonu değerleri vermiş pilot püskürtme durumunda NOx emisyonu değerleri tüm yakıtlar için önemli ölçüde azalmıştır. BD80D20 ve DME80BD20 karışımları kullanıldığında NOx emisyonundaki artış biyodizel ve DME yakıtlarının içeriğinde oksijen bulunmasından ve bu yakıtların yanma sıcaklığını artırmasından kaynaklanmaktadır (Roh vd., 2015).



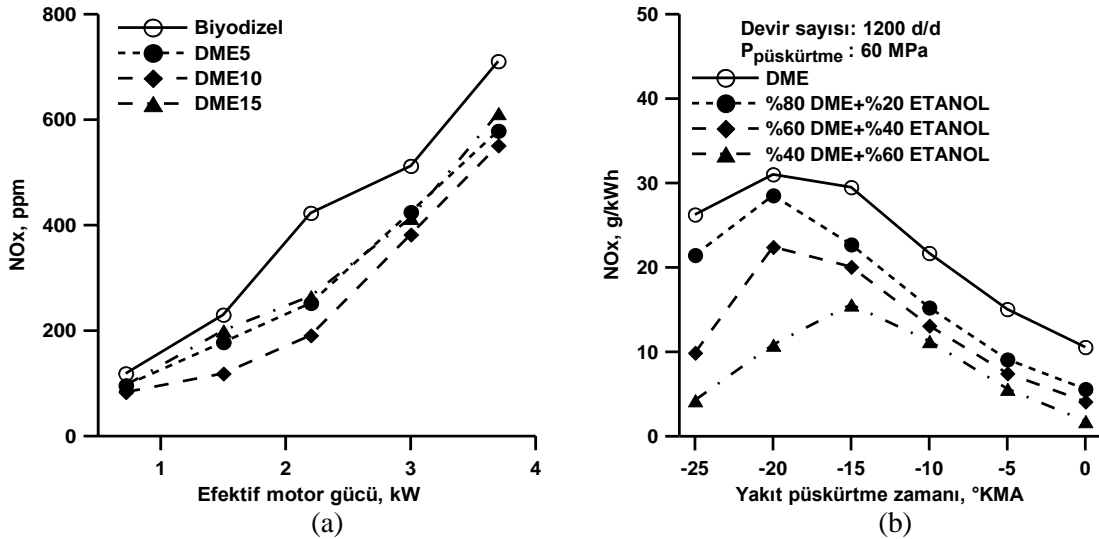
Şekil 14. NOx Emisyonunun Dizel Yakıtı, Dizel-Biyodizel Karışımı ve Biyodizel-DME Karışımı için A) Direkt Tekli Püskürtme ile ve B) Pilot Çoklu Püskürtme ile Değişimi (Roh vd., 2015)

Şekil 15(a)'da NOx emisyonunun biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için efektif motor gücü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motor gücü artırıldıkça NOx emisyonu değerleri artmış ve biyodizel-DME karışımları kullanıldığında karışımdaki DME oranı arttıkça NOx emisyonu azalmıştır. NOx emisyonu oluşumu; yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmektedir. DME'in buharlaştırma gizli ısısının yüksek olması nedeniyle oluşan soğutucu etki ve ısı değerinin düşük olması yanma sıcaklıklarını düşürerek NOx emisyonunu azaltmaktadır. Biyodizel yakıtına kıyasla DME5, DME10 ve

DME15 karışımları için NO_x emisyonundaki azalma sırasıyla %17, %28 ve %35 civarında olmuştur (Loganathan vd., 2013). Şekil 15(b)'de NO_x emisyonunun biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ortalama efektif basınç artırıldıkça artan yanma sıcaklığı nedeniyle NO_x emisyonu değerleri artmış ve biyodizel-DME karışımları kullanıldığında karışımdaki DME oranı arttıkça NO_x emisyonu azalmıştır. 1.52 MPa ortalama efektif basınç değerinde NO_x emisyonu değerleri biyodizel yakıtı, DME50, DME70 ve DME100 karışımları için sırasıyla 1266 ppm, 723 ppm, 649 ppm ve 413 ppm olarak elde edilmiş ve biyodizel yakıtı ile karşılaştırıldığında NO_x emisyonu DME50, DME70 ve DME100 karışımları kullanıldığında %43, %49 ve %67 oranlarında azalmıştır. DME biyodizel yakıtına katıldığında püskürtme özelliklerini iyileştirerek yanma odasında daha homojen bir karışım oluşturup yüksek sıcaklıklı yanma bölgelerini azaltmakta ve DME'in yüksek buharlaşma gizli ısıyı yanma odasından daha yüksek miktarda ısı çekilmesini sağlayarak yanma sıcaklığını düşürüp NO_x emisyonunu azaltmaktadır (Hou vd., 2014).



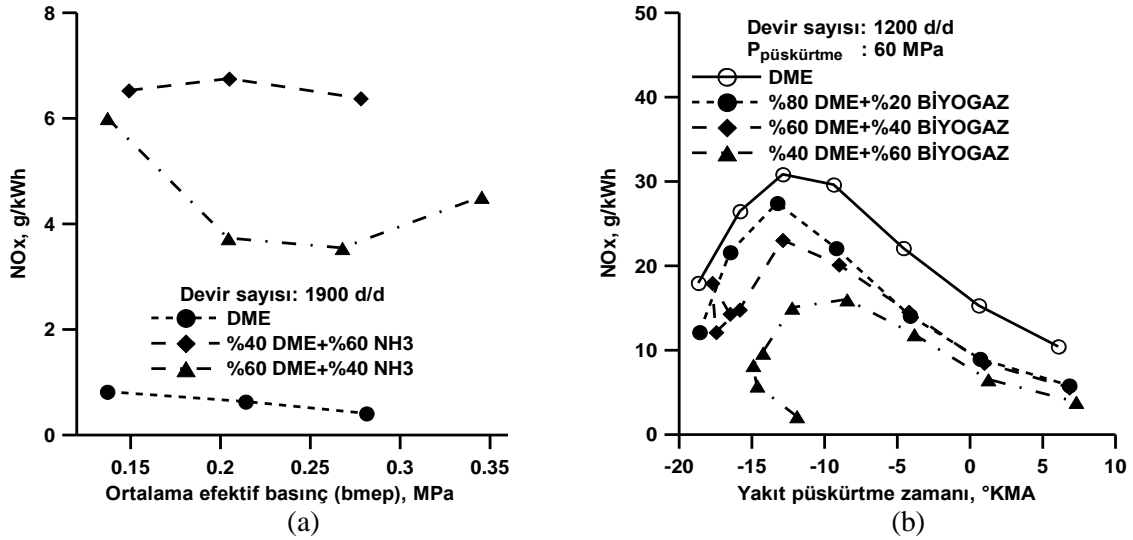
Şekil 15. NO_x Emisyonunun Biyodizel Yakıtı ve Biyodizel-DME Karışımları için A) Efektif Motor Gücü ile (Loganathan vd., 2013) ve B) Ortalama Efektif Basınç ile (Hou vd., 2014) Değişimi



Şekil 16. NO_x Emisyonunun A) Biyodizel Yakıtı ve Biyodizel-DME Karışımları için Efektif Motor Gücü ile (Loganathan vd., 2012) ve B) DME ve DME-Etanol Karışımları için Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Park vd., 2016) Değişimi

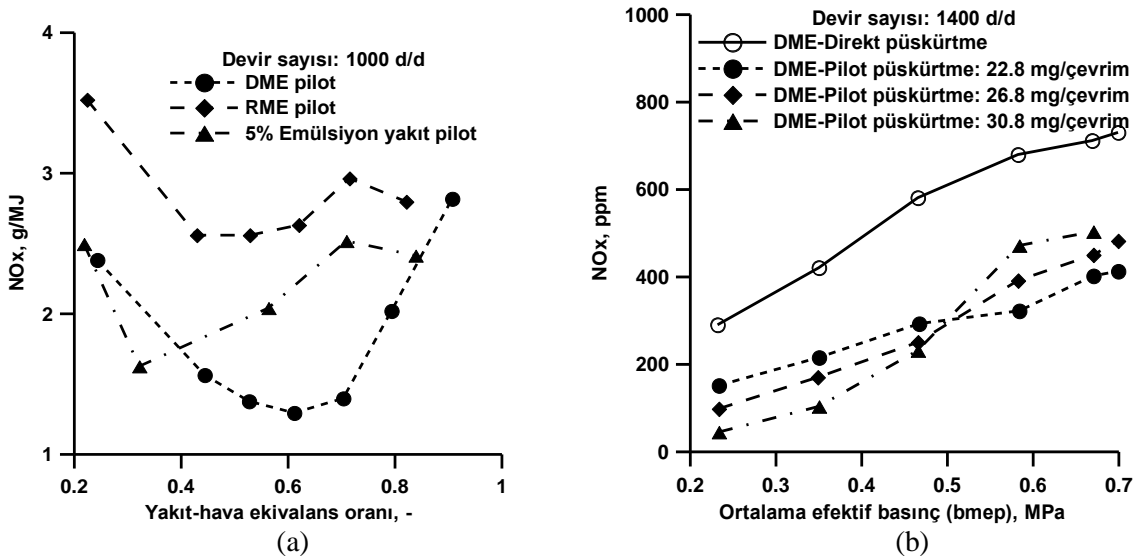
Şekil 16(a)'da NO_x emisyonunun biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için efektif motor gücü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motor gücü artırıldıkça yanma sıcaklığının artması sebebiyle NO_x emisyonu değerleri artmış ve biyodizel-DME karışımları kullanıldığında karışımdaki DME oranı arttıkça NO_x emisyonu azalmıştır. NO_x emisyonu oluşumu; yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmektedir. DME'in buharlaşma gizli ısısının yüksek olması nedeniyle oluşan

soğutucu etki ve ısı değerinin düşük olması yanma sıcaklıklarını düşürerek NOx emisyonunu azaltmaktadır. Biyodizel yakıtına kıyasla DME5, DME10 ve DME15 karışımları için NOx emisyonundaki azalma sırasıyla %14, %10 ve %7 civarlarında olmuştur (Loganathan vd., 2012). Şekil 16(b)'de NOx emisyonunun DME ve DME-etanol karışımları için yakıt püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME-etanol karışımları saf DME yakıtına göre daha düşük NOx emisyonu değerleri vermiş ve karışımdaki etanol oranı arttıkça NOx emisyonu giderek azalmıştır. NOx emisyonu oluşumu yanma sıcaklığının artmasına ve reaksiyon süresinin uzamasına bağlı olarak artmaktadır. Etanolun yüksek buharlaşma gizli ısı ve düşük ısı değeri nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesi NOx emisyonunun azalmasını sağlamaktadır (Park vd., 2016).



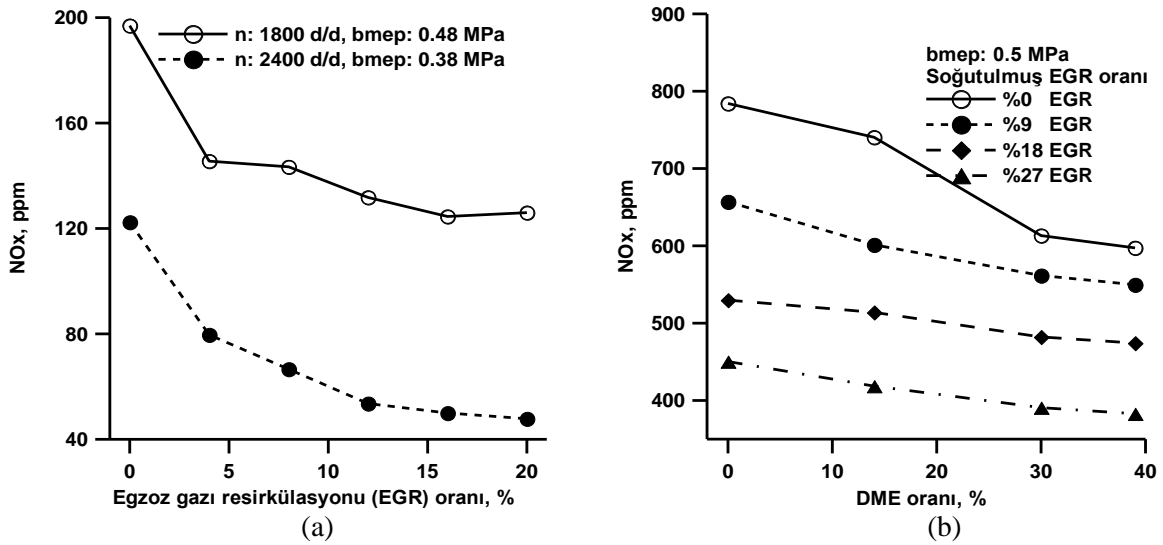
Şekil 17. NOx Emisyonunun A) DME ve DME-NH3 Karışımları için Ortalama Efektif Basınç ile (Ryu vd., 2014) ve B) DME ve DME-Biyogaz Karışımları için Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Abhishek vd., 2017) Değişimi

Şekil 17(a)'da NOx emisyonunun DME ve DME-NH3 (amonyak) karışımları için 1900 d/d devir sayısında ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME ile kıyaslandığında DME-NH3 karışımları kullanıldığında NOx emisyonu önemli oranda artmıştır. Bu durumun amonyağın yapısında bulunan azotun ve DME'in içeriğinde bulunan oksijenin NOx emisyonu oluşumunu artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Ryu vd., 2014). Şekil 17(b)'de NOx emisyonunun DME ve DME-biyogaz karışımları için yakıt püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME ile kıyaslandığında DME-biyogaz karışımları kullanıldığında NOx emisyonunda azalma sağlanmış ve karışımdaki biyogaz oranı arttıkça NOx emisyonu daha da azalmıştır. Bu durumun biyogazın içerisinde bulunan CO₂ gazının yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Abhishek vd., 2017).



Şekil 18. NOx Emisyonunun A) DME, RME ve %5 Emülsiyon Pilot Yakıtları için Yakıt-Hava Ekivalans Oranı ile (Namasivayam vd., 2010) ve B) DME Direkt ve DME Pilot Enjeksiyon için Ortalama Efektif Basınç ile (Ying vd., 2010) Değişimi

Şekil 18(a)'da NO_x emisyonunun DME, RME ve %5 emülsiyon pilot yakıtları için 1000d/d devir sayısında yakıt-hava ekivalans oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi %5 emülsiyon yakıtının pilot enjeksiyonu RME pilot enjeksiyonuna göre daha düşük NO_x emisyonu üretmiş DME'in pilot enjeksiyonu ise ekivalans oranının 0.4 değerinden sonra en düşük NO_x emisyonu değerlerini vermiştir. %5 emülsiyon yakıtı kullanıldığında yanma sırasında oluşan mikro patlamalar esnasında suyun buharlaşması yanma sıcaklığını düşürerek NO_x emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME'in yüksek buharlaşma gizli ısı sayesinde oluşan soğutucu etkisi ve nispeten düşük yanma hızı yanma sıcaklığını düşürerek düşük NO_x emisyonu değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Namasivayam vd., 2010). Şekil 18(b)'de 1400 d/d devir sayısında DME'in direkt püskürtme (enjeksiyon) ve pilot püskürtme durumları için NO_x emisyonunun ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME'in pilot enjeksiyonu durumlarında direkt enjeksiyona göre NO_x emisyonu önemli ölçüde azalmış ve NO_x emisyonunda %29.2-48 arasında değişen oranlarda azalma elde edilmiştir. Bu durum pilot enjeksiyon durumunda daha homojen bir karışım elde edilmesi sonucu yanma odasında yüksek sıcaklıklı yerel bölgelerin azalmasından kaynaklanmaktadır (Ying vd., 2010).



Şekil 19. NO_x Emisyonunun A) Farklı Motor Yüğü ve Devirleri için EGR Oranı ile (Park & Lee, 2013) ve B) Farklı EGR Oranları için DME Oranı ile (Zhao vd., 2014) Değişimi

Şekil 19(a)'da NO_x emisyonunun farklı ortalama efektif basınç ve devir sayıları için EGR oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi EGR oranı arttıkça NO_x emisyonu önemli oranda azalmış ve %20 EGR oranında NO_x emisyonunda %40 oranında azalma elde edilmiştir. Bu durum EGR oranı arttıkça yanma odasındaki oksijen miktarının azalmasından ve yanma sıcaklığının düşmesinden kaynaklanmaktadır (Park & Lee, 2013). Şekil 19(b)'de NO_x emisyonunun farklı EGR oranları için DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi EGR oranı arttıkça NO_x emisyonu önemli ölçüde azalmaktadır. Diğer taraftan, DME oranının artırılması da NO_x emisyonunun bir miktar azalmasını sağlamıştır. Bilindiği gibi, NO_x emisyonu yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmekte olup yüksek yanma sıcaklığı ve yüksek oksijen konsantrasyonu NO_x emisyonu oluşumunu artırmaktadır. EGR oranının artması yanma odasındaki oksijen miktarını ve yanma sıcaklığını düşürerek NO_x emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME oranının artırılması yanma odası içerisinde daha homojen bir karışım oluşturarak yüksek sıcaklıklı ve yüksek oksijen içerikli yerel bölgelerin azalmasına neden olmakta ve NO_x emisyonu azalmaktadır (Zhao vd., 2014).

SONUÇLAR

Bu derleme çalışmasında dizel motorlarda DME kullanımının NO_x emisyonları üzerindeki etkileri literatüre dayalı olarak incelenmiştir. Yapılan derleme çalışması sonucunda aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Bazı çalışmalarda DME'in saf olarak kullanıldığında içeriğindeki oksijen sayesinde dizel yakıtına kıyasla daha yüksek NO_x emisyonu verdiği tespit edilmekle birlikte bazı çalışmalarda DME'in düşük ısı değeri, yüksek buharlaşma gizli ısı, kısa tutuşma gecikmesi süresi, tutuşma gecikmesi süresinde daha az yakıt püskürtülmesi ve daha az yakıt yanması sayesinde dizel yakıtına göre daha düşük NO_x emisyonu sağladığı da tespit edilmiştir. Saf olarak kullanıldığında DME'in NO_x emisyonlarında %50'ye varan azalma sağladığı literatürdeki çalışmalarda bildirilmiştir.

- DME, düşük yoğunluk, düşük viskozite ve %34,8'lik oksijen içeriği gibi olumlu yakıt özellikleri sayesinde dizel yakıtı veya biyodizel yakıtı ile birlikte kullanıldığında püskürtme ve yanma karakteristiklerini iyileştirerek genelde NOx emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. DME'in dizel veya biyodizel yakıtları ile birlikte kullanıldığında %15 kadar olan düşük karışım oranlarında NOx emisyonunda %15'e kadar azalma sağlarken %50 veya daha yüksek karışım oranlarında kullanıldığında NOx emisyonunda %50'ye kadar azalma sağladığı bildirilmiştir.
- DME'in etanol, LPG ve biyogaz gibi alternatif yakıtlarla birlikte kullanılmasının NOx emisyonunda önemli oranda azalma sağladığı bildirilirken amonyak ile birlikte kullanılmasının NOx emisyonunda artışa neden olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, DME'in pilot enjeksiyonu durumunda direkt enjeksiyona kıyasla NOx emisyonunda %29-48 arasında değişen oranlarda azalma elde edildiği bildirilmiştir.
- DME'in saf veya diğer yakıtlarla birlikte kullanılması durumunda egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranının artırılması yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını azaltarak NOx emisyonunun önemli oranda azalmasını sağlamaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, %20 oranında EGR uygulanması durumunda NOx emisyonunda %40'a varan azalma elde edildiği bildirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abhishek, Rahul K., Santosh K. & Martha O. (2017). Blending impacts of biogas and dimethyl ether (DME) on compressed ignition engine. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(4), 2174-2177.
- Alam M. & Kajitani S. (2001-December). DME as an alternative fuel for direct injection diesel engine. In 2001 4th International Conference on Mechanical Engineering (pp. 87-92).
- Ambekar Y. & Hole, J. A. (2018). Preliminary optimization of duel fuel engine using dimethyl ether premixed combustion. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(10), 274-278.
- Arcoumanis C., Bae C., Crookes R. & Kinoshita E. (2008). The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. *Fuel*, 87(7), 1014-1030.
- Azizi Z., Rezaeimanesh M., Tohidian T. & Rahimpour M. R. (2014). Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing*, 82, 150-172.
- Baskaran R. (2015). Analysis on synthesis, storage & combustion characteristics of DME as fuel in CI engines. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 3(1), 133-140.
- Benajes J., Novella R., Pastor J.M., Hernández-López A. & Kokjohn S. L. (2018a). Computational optimization of the combustion system of a heavy duty direct injection diesel engine operating with dimethyl-ether. *Fuel*, 218, 127-139.
- Benajes J., Novella R., Pastor J.M., Hernández-López A. & Kokjohn S.L. (2018b). Computational optimization of a combustion system for a stoichiometric DME fueled compression ignition engine. *Fuel*, 223, 20-31.
- Bogdan J., Nicolae B., Călin I. & Vlad B. N. (2017). Study of emissions for a compression ignition engine fueled with a mix of DME and diesel. *Materials Science and Engineering*, 252, 1-9.
- Chapman E. M. & Boehman A. L. (2008). Pilot ignited premixed combustion of dimethyl ether in a turbodiesel engine. *Fuel Processing Technology*, 89, 1262-1271.
- Chen Z., Konno M. & Kajitani S. (2000). Performance and emissions of DI compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *JSME International Journal*, 43(1), 82-88.
- Deepak K. M., Karthick M., Dineshbabu D., Srikanth P. & Ramachandran M. G. (2015). Investigation on the effect of dimethyl ether in compression ignition engine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(2), 401-407.
- Duan J., Sun Y., Yang Z. & Sun Z. (2012, December). Combustion and emissions characteristics of diesel engine operating on composite combustion mode of DME and diesel. In 2012 Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (pp. 463-466).
- El-Hagar M. M. E-G. (2014). Effect of diethyl ether and dimethyl ether with liquefied petroleum gas on combustion and emissions characteristics of diesel engine. *International Journal of Computer Science and Engineering*, 2(3), 193-198.

- Genbao L., Jianming C., Minglong L., Yuhua Q. & Zhaoyang C. (2012). Experimental study on the size distribution characteristics of spray droplets of DME/diesel blended fuels. *Fuel Processing Technology*, 104, 352-355.
- Geng P., Cao E., Tan Q. & Wie L. (2017). Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 523-534.
- Guangxin G., Zhulin Y., Apeng Z., Shenghua L. & Yanju W. (2013). Effects of fuel temperature on injection process and combustion of dimethyl ether engine. *Journal of Energy Resources Technology*, 135, 1-5.
- Hewu W. & Longbao Z. (2017). Performance of a direct injection diesel engine fuelled with a dimethyl ether/diesel blend. *Journal of Automobile Engineering*, 819-824.
- Hou J., Wen Z., Jiang Z. & Qiao X. (2014). Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends. *Journal of the Energy Institute*, 87, 102-113.
- Huang Z., Qiao X., Zhang W., Wu J. & Zhang J. (2009). Dimethyl ether as alternative fuel for CI engine and vehicle. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 3(1), 99-108.
- Inayat A., Ghenai C., Naqvi M., Ammar M., Ayoub M. & Hussin M. N. B. (2017). Parametric study for production of dimethyl ether (DME) as a fuel from palm wastes. *Energy Procedia*, 105, 1242-1249.
- Jalanapurkar M., Patel K., Patel T., Rathod G. & Granipa H. (2015). A literature review on combine effect of dimethyl ether (DME) as an additive & the injection pressure on the performance & emission of 4 stroke C.I engine. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2(1), 262-266.
- Jang J. & Bae C. (2009). Effects of valve events on the engine efficiency in a homogeneous charge compression ignition engine fueled by dimethyl ether. *Fuel*, 88, 1228-1234.
- Jeon J., Kwon S., Park Y.H., Oh Y. & Park S. (2014). Visualizations of combustion and fuel/air mixture formation processes in a single cylinder engine fueled with DME. *Applied Energy*, 113, 294-301.
- Kajitani S. (2004). A study of low compression ratio diesel engines operated with neat dimethyl ether (DME). *JSME TED Newsletter*, 42, 1-14.
- Kajitani S. & Chen Z. (2003). Fundamental research on next generation fuel (dimethyl ether) engines. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 62, 133-144.
- Khunaphan S., Hartley U. W. & Theinnoi K. (2013). Characterization and potential of dimethyl ether (DME) as dual fuel combustion in a compression ignition engine. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2(3), 79-85.
- Kim H. J. & Park S. H. (2016). Optimization study on exhaust emissions and fuel consumption in a dimethyl ether (DME) fueled diesel engine. *Fuel*, 182, 541-549.
- Kim H. J., Park S.H., Lee K. S. & Lee C. S. (2011). A study of spray strategies on improvement of engine performance and emissions reduction characteristics in a DME fueled diesel engine. *Energy*, 36, 1802-1813.
- Kim H. J., Park S. W. & Lee C. S. (2012). Numerical and experimental study on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether (DME) fueled compression ignition engine. *Oil & Gas Science and Technology*, 67(3), 479-489.
- Kowalewicz A. & Wojtyniak M. (2005). Alternative fuels and their application to combustion engines. *Journal of Automobile Engineering*, 219, 103-125.
- Kropiwnicki J., Dominiczak P. & Kneba Z. (2017). Analysis of the possibilities of using of DME fuel in motor boat drive systems. *Combustion Engines*, 171(4), 74-80.
- Lamani V. T., Yadav A. K. & Narayanappa K. G. (2017). Influence of low-temperature combustion and dimethyl ether-diesel blends on performance, combustion, and emission characteristics of common rail diesel engine: a CFD study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 15500-15509.
- Lecksiwilai N., Gheewala S. H., Sagisaka M. & Yamaguchi K. (2016). Net energy ratio and life cycle greenhouse gases (GHG) assessment of bio-dimethyl ether (DME) produced from various agricultural residues in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 134, 523-531.

- Li G. (2011). Dimethyl ether (DME): a new alternative fuel for diesel vehicle. *Advanced Materials Research*, 156-157, 1014-1018.
- Lim O. T. & Iida N. (2015). A study on the spray and engine combustion characteristics of diesel-dimethyl ether fuel blends. *Journal of Automobile Engineering*, 229(6), 782-792.
- Loganathan M., Anbarasu A. & Velmurugan A. (2013). Emission characteristics of jatropha-ethanol and jatropha-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine. *Journal of Mechanical Engineering*, 42(1), 38-46.
- Loganathan M., Anbarasu A. & Velmurugan A. (2012). Emission characteristics of jatropha-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 1(8), 28-32.
- Longbao Z., Hewu W. & Ying W. (2002-December). Experimental study on performances and combustion characteristics of DME powered vehicle. In 2002 Conference on Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities (BAQ 2002) (pp. 1-6).
- Maji S., Ahmed S., Siddiqui W. A. & Kumar A. (2014). Impact of di-methyl ether (DME) as an additive fuel for compression ignition engine in reduction of urban air pollution. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(11), 17221-17228.
- Maji S., Ahmed S., Siddiqui W. A., Aggarwal S. & Kumar A. (2015). Impact of di-methyl ether (DME) as an additive fuel for compression ignition engine in reduction of urban air pollution. *American Journal of Environmental Protection*, 3(2), 48-52.
- Mohan B., Yang W., Yu W. & Tay K. L. (2017). Numerical analysis of spray characteristics of dimethyl ether and diethyl ether fuel. *Applied Energy*, 185, 1403-1410.
- Namasivayam A. M., Korakianitis T., Crookes R. J., Bob-Manuel K. D. H. & Olsen J. (2010). Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines. *Applied Energy*, 87, 769-778.
- Oda Y., Osafune Y., Ueda H. & Fujimura K. (2004). Clean combustion technology in diesel engines operated with dimethyl ether. *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review*, 40(6), 1-5.
- Park S. (2012). Optimization of combustion chamber geometry and engine operating conditions for compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *Fuel*, 97, 61-71.
- Park S. H. & Lee C. S. (2013). Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39, 147-168.
- Park S. H. & Lee C. S. (2014). Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. *Energy Conversion and Management*, 86, 848-863.
- Park S. H., Kim H. J. & Lee C. S. (2010). Effects of dimethyl-ether (DME) spray behavior in the cylinder on the combustion and exhaust emissions characteristics of a high speed diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 91, 504-513.
- Park S. H., Shin D. & Park J. (2016). Effect of ethanol fraction on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether-ethanol dual-fuel reactivity controlled compression ignition engine. *Applied Energy*, 182, 243-252.
- Park S. H., Yoon S. H., Cha J. and Lee C. S. (2014). Mixing effects of biogas and dimethyl ether (DME) on combustion and emission characteristics of DME fueled high-speed diesel engine. *Energy*, 66, 413-422.
- Patil K. R. & Thipse S. S. (2012). The potential of DME-diesel blends as an alternative fuel for CI engines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(10), 35-41.
- Prabhakaran B., Thennarasu P. & Karthick S. (2015). Performance and characteristics of a CI engine using DME (Dimethyl Ether). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(2), 31-34.
- Roh H. G., Lee D. & Lee C. S. (2015). Impact of DME-biodiesel, diesel-biodiesel and diesel fuels on the combustion and emission reduction characteristics of a CI engine according to pilot and single injection strategies. *Journal of the Energy Institute*, 88, 376-385.
- Ryu K., Zacharakis-Jutz G. E. & Kong S.-C. (2014). Performance characteristics of compression- ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether. *Applied Energy*, 113, 488-499.

- Semelsberger T. A., Borup R. L. & Grene H. L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*, 156, 497-511.
- Sezer I. (2011). Thermodynamic, performance and emission investigation of a diesel engine running on dimethyl ether and diethyl ether. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1594-1603.
- Smolec R., Idzior M., Karpiuk W. & Kozak M. (2017). Assessment of the potential of dimethyl ether as an alternative fuel for compression ignition engines. *Combustion Engines*, 169(2), 181-186.
- Song J., Huang Z., Qiao X. & Wang W. (2004). Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether. *Energy Conversion and Management*, 45, 2223-2232.
- Suh H. K. & Lee C. S. (2008). Experimental and analytical study on the spray characteristics of dimethyl ether (DME) and diesel fuels within a common-rail injection system in a diesel engine. *Fuel*, 87, 925-932.
- Taghavifar H., Khalilarya S., Mirhasani S. & Jafarmadar S. (2014). Numerical energetic and exergetic analysis of CI diesel engine performance for different fuels of hydrogen, dimethyl ether, and diesel under various engine speeds. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 9515-9526.
- Teng H., McCandless J. C. & Scheneyer Jeffrey B. (2001). Thermochemical characteristics of dimethyl ether alternative fuel for compression-ignition. *Society of Automotive Engineers*, Paper no 2001-01-0154.
- Theinnoi K., Suksompong P. & Temwutthikun W. (2017). Engine performance of dual fuel operation with in-cylinder injected diesel fuels and in-port injected DME. *Energy Procedia*, 142, 461-467.
- Thomas G., Feng B., Veeraragavan A., Cleary M. J. & Drinnan N. (2014). Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review. *Fuel Processing Technology*, 119, 286-304.
- Vispute K. M. & Pawar T. J. (2016). Study and prospects of di-methyl ether as an alternative fuel in C.I. engine: review. *International Journal of Trend in Research and Development*, 3(4), 134-138.
- Wang H. W., Zhou L. B., Jiang D. M. & Huang Z. H. (2000). Study on the performance and emissions of a compression ignition engine fuelled with dimethyl ether. *Journal of Automotive Engineering*, 214, 101-106.
- Wang Y., Xiao F., Zhao Y., Li D. & Lei X. (2015). Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel. *Applied Energy*, 143, 58-70.
- Wang Y., Zhao Y. & Yang Z. (2013). Dimethyl ether energy ratio effects in a dimethyl ether-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, 54, 481-487.
- Wang Y., Zhao Y., Xiao F. & Li D. (2014). Combustion and emission characteristics of a diesel engine with DME as port premixing fuel under different injection timing. *Energy Conversion and Management*, 77, 52-60.
- Wattanavichien K. (2009). Implementation of DME in a small direct injection diesel engine. *International Journal of Renewable Energy*, 4(2), 1-12.
- Xinling L. & Zhen H. (2009). Emission reduction potential of using gas-to-liquid and dimethyl ether fuels on a turbocharged diesel engine. *Science of the Total Environment*, 407, 2234-2244.
- Xu S., Wang Y., Zhang X., Zhen X. & Tao C. (2012). Development of a novel common-rail type dimethyl ether (DME) injector. *Applied Energy*, 94, 1-12.
- Yanju W., Kun W., Wenrui W., Shenghua L., Xiao C., Yajing Y. & Shanwen B. (2014). Comparison study on the emission characteristics of diesel- and dimethyl ether-originated particulate matters. *Applied Energy*, 130, 357-369.
- Ying W., Li H., Longbao Z. & Wei L. (2010). Effects of DME pilot quantity on the performance of a DME PCCI-DI engine. *Energy Conversion and Management*, 51, 648-654.
- Ying W., Longbao Z. & Hewu W. (2006). Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels. *Atmospheric Environment*, 40, 2313-2320.
- Ying W., Longbao Z., Zhongji Y. & Hongyi D. (2005). Study on combustion and emission characteristics of a vehicle engine fuelled dimethyl ether. *Journal of Automotive Engineering*, 219, 263-269.

Yoon S. H., Cha J. P. & Lee C. S. (2010). An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust emission characteristics in a common-rail diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 91, 1364-1372.

Yoon S. H., Han S. C. & Lee C. S. (2013). Effects of high EGR rate on dimethyl ether (DME) combustion and pollutant emission characteristics in a direct injection diesel engine. *Energies*, 6, 5157-5167.

Youn I. M., Park S. H., Roh H. G. & Lee C. S. (2011). Investigation on the fuel spray and emission reduction characteristics for dimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel engine with common-rail injection system. *Fuel Processing Technology*, 92, 1280-1287.

Zhao Y., Wang Y., Li D., Lei X. & Liu S. (2014). Combustion and emission characteristics of a DME (dimethyl ether)-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy*, 72, 608-617.

Zhu Z., Li D. K., Liu J., Wei Y. J. & Liu S. H. (2012). Investigation on the regulated and unregulated emissions of a DME engine under different injection timing. *Applied Thermal Engineering*, 35, 9-14.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.06.2022
Kabul Tarihi : 28.06.2022

Received Date : 02.06.2022
Accepted Date : 28.06.2022

DC MOTORA UYGULANAN LQR KONTROLÇÜ İÇİN AĞIRLIK MATRİSLERİNİN NSGA-II TABANLI ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU

NSGA-II BASED MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF WEIGHT MATRICES FOR LQR CONTROLLER APPLIED TO DC MOTOR

Ali Fazıl UYGUR^{1*} (ORCID: 0000-0002-1049-4927)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali Fazıl UYGUR, fuygur@ksu.edu.tr

ÖZET

LQR kontrol yaklaşımıyla, Lineer Zamanla Değişmeyen bir sistemin kararlılığının temin edilmesi yanında, sistemin geri besleme kazancına, karesel bir performans ölçütü ya da maliyet fonksiyonunun minimizasyonu yoluyla ulaşılması, bu yaklaşımı, kapalı çevrim sistemden beklenen performansı, şekillendirme kabiliyetine sahip kılmaktadır. Bu noktada, minimize edilecek performans ölçütünün, içerdiği ağırlık matrisi parametreleriyle, optimum tayini, kontrolcü performansı bakımından önemlidir. Ağırlık matrislerinin optimizasyonu, kontrolcünden beklenen çoklu performans amaçları doğrultusunda gerçekleştirilmelidir. Bu çok amaçlı bir optimizasyon problemidir. Ağırlık matrisleri, optimizasyon yapılmaksızın, deneme yanılma, kutup atama gibi klasik yöntemlerle ayarlanabilir olsa da bu yorucu ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu zorluğu aşabilmek adına, çeşitli çok amaçlı optimizasyon teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada, *LQR* tabanlı optimal *DC* motor kontrolü amaçlanmıştır. Kontrolcünün, maliyet fonksiyonuna dair *Q* ve *R* ağırlık matrisi parametreleri, çok amaçlı optimizasyon tekniklerinden biri olan ve Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm (NSGA-II) olarak bilinen algoritma yardımıyla ayarlanmıştır. Elde edilen optimum parametrelerle sentezlenen, *LQR* kontrolcünün performans bulguları, simülasyon sonuçları ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: LQR, NSGA-II, çok amaçlı optimizasyon, pareto-optimal, DC motor

ABSTRACT

In addition to ensuring the stability of a linear time-invariant system with the LQR control approach, the feedback gain of the system is achieved by minimizing a quadratic performance measure or cost function, making this approach capable of shaping the performance expected from a closed-loop system. At this point, optimum determination of the performance criterion to be minimized with the parameters of the weight matrix is important for the controller performance. Optimization of the weight matrices should be performed with the multiple performance objectives expected of the controller. This is a multi-objective optimization problem. Although weight matrices can be adjusted by classical methods such as trial and error, pole assignment, without optimization, this can be tedious and time consuming. Various multi-objective optimization techniques can be used to overcome this difficulty. In this study, LQR-based optimal DC motor control is aimed. The Q and R weight matrix parameters of the controller's cost function are adjusted with the help of an algorithm known as Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm (NSGA-II), which is one of the multi-objective optimization techniques. The performance findings of the LQR controller, synthesized with the optimum parameters obtained, are presented with the simulation results.

Keywords: LQR, NSGA-II, multi-objective optimization, pareto-optimal, DC motor

GİRİŞ

Göz önüne alınan bir sistem için bir takım fiziksel kısıtlar altında önceden belirlenmiş olan performans kriterlerinin optimize edilmesini amaçlayan kontrolcü tasarımı yaklaşımını optimal kontrolün konusunu teşkil eder. Bu alandaki gelişmelerin ortaya çıkardığı ve çok değişkenli bir optimal kontrol yaklaşımı olan Lineer Kuadratik Regülatör (*LQR*), uygulandığı sistemin kararlılığını geliştirmesinin yanı sıra minimum kontrol çabasıyla sistemin durum yörüngelerindeki sapmayı en aza indirmeye kabiliyetine sahiptir. Lineer Zamanla Değişmeyen (*LTI*) bir sistem, *LQR* kontrol altında hem kararlı kılınmakta, hem de karesel bir performans ölçütünü minimum kılacak şekilde, sistem için optimal bir geri besleme kazancı elde edilmektedir (Lewis, 1986). *LQR* kontrol yaklaşımı, bir takım kontrol mühendisliği problemlerinin çözümü amacıyla kullanılıyorken aynı zamanda pek çok diğer kontrol yöntemine de temel teşkil ettiğinden modern kontrol teorisinde çok önemli bir yere sahiptir (Athans, 1966).

LQR kontrolcü karesel bir maliyet fonksiyonu minimize etmektedir. Öyle ki bu maliyet fonksiyonu içerisinde Q ve R gibi iki parametre matrisi bulunmakta olup, Q matrisi ile sistemin durumları, R matrisi ile de sisteme uygulanan kontrol işareti ağırlıklandırılmaktadır (Hassani and Lee, 2014). *LQR* kontrolcünün tasarımında, kapalı çevrim kontrol sistemi için arzulanan performansın yakalanması bakımından Q ve R ağırlık matrisi parametrelerinin en uygun biçimde ayarlanması büyük önem arz etmektedir (Nise, 2007; HG Kamil, 2015). Söz konusu bu parametrelerin ayarlanması için deneme yanılma, kutup atama ve Bryson yöntemi gibi klasik yaklaşımlar kullanılabilir olsa da bu yöntemler yorucu ve zaman alıcı olabilmektedir (Al-Mahturi and Wahid, 2017). Ancak kapalı çevrim sisteme dair yüzde aşım miktarı, yerleşme zamanı ve sürekli hal hatası gibi zaman domeni kriterleri ile Q ve R parametreleri arasında doğrudan bir ilişki söz konusu olmayıp, bu parametreleri ayarlayacak sistematik teknikler de bulunmamaktadır (Ata and Coban, 2015). Bununla beraber ilgili parametrelerin ayarlanması maksadıyla parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritması gibi çeşitli sürü zekâsı tabanlı optimizasyon tekniklerinin yanı sıra genetik algoritma vb. tekniklerde kullanılmaktadır (Bottura and Da Fonseca Neto, 1999; Mobayen et al., 2011).

Bu çalışma kapsamında, *LQR* tabanlı optimal *DC* motor kontrolü amaçlanmıştır. Bu maksatla *LQR* kontrolcü için söz konusu karesel maliyet fonksiyonuna dair Q ve R ağırlık matrisi parametrelerinin ayarlanması gerekmektedir. İlgili parametrelerin ayarlanması, çok amaçlı optimizasyon tekniklerinden biri olan ve NSGA-II olarak bilinen optimizasyon algoritması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen optimum parametreler kullanılarak sentezlenen *LQR* kontrolcünün sistem üzerindeki performansına dair bulgular, gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile sunulmuştur.

MATERYAL VE METOD

LQR Kontrol Yaklaşımı

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{1}$$

Denklem-1’de verilen lineer zamanla değişmeyen bir sistemi göz önüne alalım. Burada $x(t)$, $y(t)$ ve $u(t)$ sırasıyla n , r ve m boyutlu durum, çıkış ve kontrol vektörlerini ifade etmektedirler.

LQR kontrolcü tasarımı prosedürü Denklem-2’de verilmiş olan karesel maliyet fonksiyonunu minimize etmek amacıyla Denklem-3’te gösterildiği gibi bir lineer durum geri beslemesi kontrol kuralının elde edilmesine karşı gelir.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt\tag{2}$$

$$u(t) = -Kx(t)\tag{3}$$

Burada $x^T Q x$ ile kontrol işaretinin enerjisi ifade edilirken, $u^T R u$ ile ise transient enerji ifade edilmektedir.

Maliyet fonksiyonunda yer alan, simetrik yarı pozitif tanımlı $Q \in R^{n \times n}$ matrisi sistemin durumlarını ağırlıklandırmakta olup, simetrik pozitif tanımlı $R \in R^{m \times m}$ matrisi ise kontrol işareti ağırlıklarını ihtiva etmektedir.

Denklem-3'te verilen lineer durum geri beslemesi kuralındaki K kontrol kazanç matrisi Denklem-4'te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$K = R^{-1}B^T P \quad (4)$$

Bu denklemde görülen P matrisi ise Denklem-5'te verilmiş olan Cebirsel Riccati Denklemi'nin simetrik yarı pozitif tanımlı çözümüne tekabül etmektedir.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (5)$$

Bu sayede Denklem-3'teki lineer durum geri beslemeli kontrol kuralı kullanılmak suretiyle minimum kontrol eforu harcanarak, kapalı çevrim sistem çıkışının arzulanana değere mümkün olduğunca yakın seyretmesi garantilenmiş olmaktadır.

Çok Amaçlı Olarak LQR Kontrolcüye Dair Ağırlık Matrislerinin Optimizasyonu

Bu çalışmada LQR kontrolcü için ağırlık matrislerinin çok amaçlı optimizasyon yaklaşımıyla belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe istinaden, evvela çok amaçlı optimizasyon problemimizin yapısını kurgulayacak, sonrasında ise hızlı ve iyi sonuçlar ürettiği olması bakımından tercih edilen ve NSGA-II olarak bilinen çok amaçlı optimizasyon algoritması yardımıyla elimizdeki çok amaçlı optimizasyon problemini çözmeye çalışacağız. Bu anlamda, NSGA-II algoritması kullanılarak J karesel maliyet fonksiyonu içerisinde yer alan Q ve R ağırlık matrislerine dair Pareto-Optimal çözümler elde edilip, bu çözümlerden biri kullanılarak LQR için J karesel maliyet fonksiyonu belirlenir. J karesel maliyet fonksiyonunu minimize edecek olan lineer durum geri besleme kazancı K hesaplanarak, optimal LQR kontrolcü tasarımına ulaşılmış olur.

Çok amaçlı optimizasyon probleminin yapısını şekillendirirken iki amaç fonksiyonu üzerinde karar kılınmıştır. Amaç fonksiyonlarının oluşumunda istifade edilen faktörler, sistem durum vektörünün kararlı durumdan sapma miktarı ve kapalı çevrim sistem kutuplarının " s " düzlemindeki konumları olarak düşünülmüştür. Amaç fonksiyonları seçildikten sonra Q ve R ağırlık matrislerinin optimizasyonuna dair çok amaçlı optimizasyon probleminin yapısı belirlenecektir.

Amaç fonksiyonlarının ilki sistem durum vektörünün kararlı durumdan sapma miktarı üzerinden Q ve R matrislerinden f_1 'e gerçekleşen bir eşleme olarak, Denklem-6'da verildiği gibi seçilmiştir;

$$f_1(Q, R) = \int_0^{\infty} x^T x dt \quad (6)$$

Seçilen Q ve R değerleri üzerinden hesap yoluyla optimal LQR kontrolcü elde edilir ve bu kontrolcü yardımıyla sistem simüle edilerek f_1 amaç fonksiyonunun değeri hesaplanır. Kontrolcünün sergilediği performansın ölçüsü f_1 amaç fonksiyonunun değeri ile belirlenir. Daha küçük f_1 değerleri kontrolcünün daha iyi bir kontrol performansı sergilediğinin göstergesidir.

Kapalı çevrim sistemin kararlılığı sistem kutuplarının sol yarı " s " düzleminde bulunmasını gerektirir. LQR yaklaşımıyla tasarlanan kontrolcü bu anlamda kararlı olsa da kapalı çevrim kutuplarının sol yarı " s " düzleminde sanal eksenden olan uzaklıkları büyüdükçe sönüm etkisi hızlanacak, aksi taktirde ise yavaşlayacaktır. İşte, ikinci amaç fonksiyonunun ifadesi de kapalı çevrim sistem kutuplarının " s " düzlemindeki konumları kullanılarak Denklem-7'deki gibi verilmektedir.

$$f_2(Q, R) = \frac{1}{c + \max\{\text{abs}(\text{real}[\text{eig}(A - BK)])\}} \quad (7)$$

f_2 amaç fonksiyonu, kapalı çevrim kutupları ile sanal eksen arasındaki pozisyon ilişkisini ortaya koymaktadır. Yani f_2 'nin değeri küçüldükçe kapalı çevrim kutuplarının, sol yarı " s " düzleminde sanal eksenden olan uzaklıkları

artacaktır. f_2 'nin ifadesinde yer alan "c", hata oluşumunu engellemek amacıyla kullanılan pozitif bir düzeltme katsayısıdır.

Amaç fonksiyonları seçildikten sonra Q ve R ağırlık matrislerinin optimizasyonuna dair çok amaçlı optimizasyon probleminin yapısı, veya bir başka ifadeyle, çok amaçlı optimizasyon stratejisi belirlenmelidir. Öncelikle LQR ağırlık matrisleri Q ve R 'ye bir göz atılacak olursa, ağırlık matrislerinin pratikte köşegen formda aşağıdaki gibi kullanıldıkları görülür.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & q_{nn} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & r_{mm} \end{bmatrix}$$

Q ve R ağırlık matrislerinin köşegenleri üzerindeki elemanları birleştirmek suretiyle elde etmiş olduğumuz $n + m$ bileşenli $deg = [q_{11}, q_{22}, \dots, q_{nn}, r_{11}, r_{22}, \dots, r_{mm}]$ değişken vektörünü kullanıp, amaç fonksiyonları için (8) no'lu gösterimleri benimseyecek olursak, çok amaçlı optimizasyon problemimizin yapısı (9) no'lu ifadede gösterildiği gibi olacaktır.

$$f_1(deg) = \int_0^{\infty} x^T x dt, f_2(deg) = \frac{1}{c + \max(\text{abs}(\text{real}(A - BK)))}, f(deg) = (f_1(deg), f_2(deg)) \quad (8)$$

$$\min f(deg)$$

$$\text{kısıt: } deg_i > 0 \quad 0 < i \leq n + m$$

(9)

Burada " deg_i ", " deg " değişken vektörünün i . bileşenini ifade etmektedir.

NSGA-II Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritması

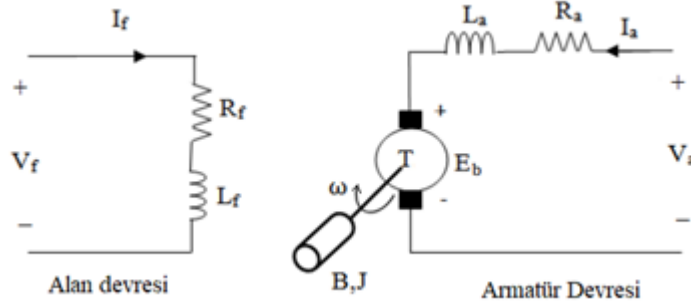
Kontrol sisteminin birden çok performans ölçütüne beraberce odaklanabilmesi, belirlemiş olduğumuz çok amaçlı optimizasyon probleminin amaç fonksiyonlarının mümkün olduğunca beraberce minimum yapılmasını gerektirir. Bunu sağlayacak olan şey LQR ağırlık matrisleri Q ve R 'nin optimal çözümleridir. Söz konusu çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü amacıyla kullanacağımız, NSGA-II algoritmasına dair optimizasyon sürecinin basamakları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- 1) deg bireylerinin oluşturduğu başlangıç nesli oluşturulur.
- 2) Her bir var bireyi için amaç fonksiyonu hesaplanır.
- 3) Bireyler her biri yek diğerine baskın olmayacak şekilde sıralanır ve sıralanan bireyler derecelendirilir.
- 4) Yığılma uzaklığı (YU) hesaplanır.
- 5) deg bireylerinden oluşan neslin yarısı, her bir bireyin derecesi ve YU değeri üzerinden ebeveyn nesil olarak seçilir. Yani rastgele seçilen iki bireyin dereceleri farklı ise derecesi büyük olan, aksi taktirde ise YU değeri büyük olan birey ebeveyn olarak seçilir.
- 6) İkili çaprazlama benzetimi ve polinomsal mutasyon gerçekleştirilir.
- 7) Ebeveyn nesil ile oluşan yeni nesil birleştirilerek, 3 ve 4 numaralı adımlar icra edilir. Tekrar başlangıç neslindeki birey sayısına ulaşıncaya kadar, derecelerine ve YU değerlerine bakılarak bireyler arasından seçim yapılır.
- 8) 2,3,4,5,6,7 numaralı adımlar, maksimum nesil sayısına ulaşıncaya kadar tekrar edilirler.

NSGA-II algoritması kullanılarak gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon tamamlandığında Q ve R ağırlık matrisleri için Pareto-Optimal çözümlere ulaşılmış olacaktır. Pareto-Optimal çözümlerden hangisi üzerinde uzlaşılacağı ya da en uygun çözümün hangisi olacağı konusunda, Pareto-Front'un şekli veya tercih sebebi belirleyici olacaktır. Pareto-Optimal çözümlerden, üzerinde uzlaşılan yani en uygun kabul edilen çözüme karar verildikten sonra bu çözüme karşı gelen Q ve R matris çifti kullanılarak, karesel maliyet fonksiyonu J hesaplanır. Son olarak hesaplanan J karesel maliyet fonksiyonunu minimum kılan LQR optimal kontrolcünün tasarımı gerçekleştirilir (Li, Liu, and Wang 2008).

DC Motorun Durum Uzayı Modeli

Bu çalışmada, LQR ağırlık matrislerinin, NSGA-II algoritması kullanılarak çok amaçlı optimizasyonu sonucu ulaşılan, optimal LQR kontrolcünün performansı doğru akım motoru üzerinde gerçekleştirilen simülasyon çalışması ile ortaya koyulacaktır. Bunun için öncelikle DC motorun matematik modelinin çıkarılması uygun olacaktır.



Şekil 1. DC Motorun Eşdeğer Devre Modeli

Şekil 1' de sabit alan uyarımlı DC motorun eşdeğer devresi görülmektedir. DC motorun armatür devresinin elektriksel denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_b \quad (10)$$

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b w$$

Burada V_a armatür gerilimini, R_a armatür direncini, L_a armatür indüktansını, E_b zıt elektromotor kuvvetini, K_b zıt elektromotor kuvveti sabitini, w motorun açısal hızını ve i_a armatür akımını göstermektedir. Mekanik kısma ait dinamikler, aşağıdaki tork denge denklemleriyle ifade edilmektedir.

$$T = K_T i_a = J \frac{dw}{dt} + Bw \quad (11)$$

Burada J motorun atalet momentini, T motor torkunu, B viskoz sürtünme katsayısını ve K_T tork çarpanı sabitini vermektedir. (10) ve (11) no'lu denklemler tekrar düzenlenip ifade edilecek olursa Denklem-12'ye ulaşılır.

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_b}{L_a} w + \frac{V_a}{L_a} \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{K_T}{J} i_a - \frac{B}{J} w \end{aligned} \quad (12)$$

Bu çalışmanın LQR kontrolcü tasarımını içermesi sebebiyle DC motor için durum uzayı modelinin elde edilmesi uygun olacaktır. Bu maksatla DC motor için açısal hız (w) ve armatür akımı (i_a)'yı durum değişkenleri olarak belirleyip, armatür gerilimi (V_a)'yı giriş, açısal hız (w)'yı da çıkış olarak seçersek DC motorun durum uzayındaki ifadesi Denklem-13' teki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{dw}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_T}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} V_a \quad (13)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ w \end{bmatrix}$$

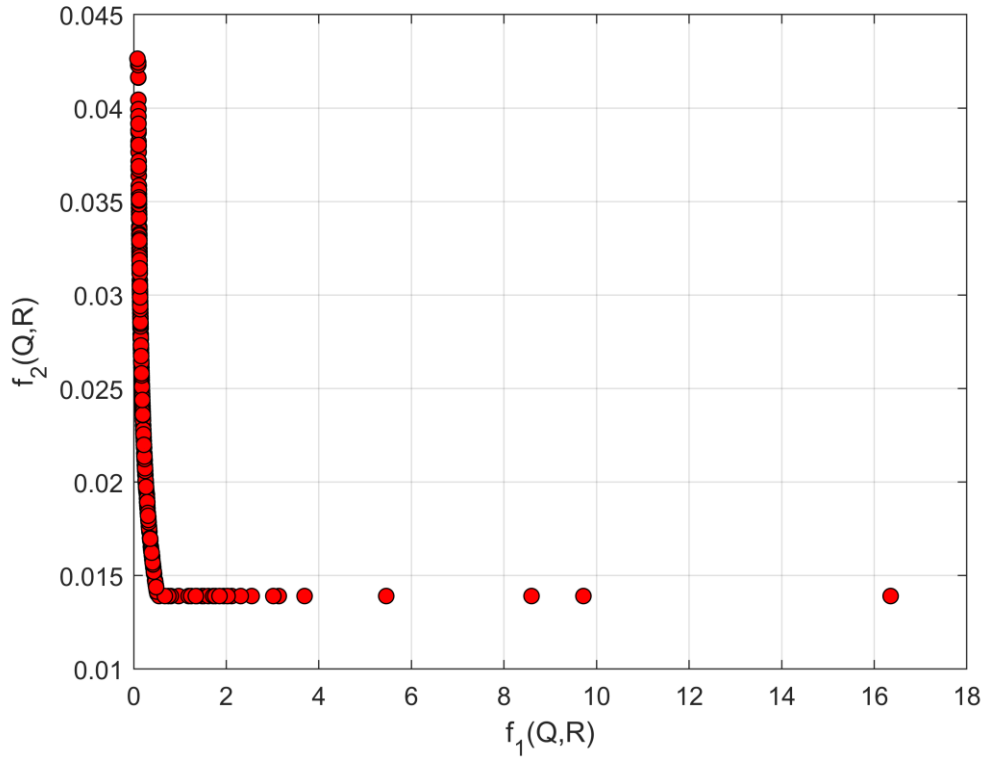
NSGA-II ile Ağırlık Matrisleri Optimize Edilmiş LQR Kontrolcünün DC Motora Uygulanması

Ağırlık matrisleri optimize edilerek DC motora uygulanacak olan **LQR** kontrolcünün tasarımı Denklem-13'teki DC motorun durum uzayı modeli kullanılarak gerçekleştirilecektir. Ağırlık matrislerinin optimizasyonu gerçekleştirilirken NSGA-II algoritması için seçilen ayarlar Tablo 1'de verilmiştir.

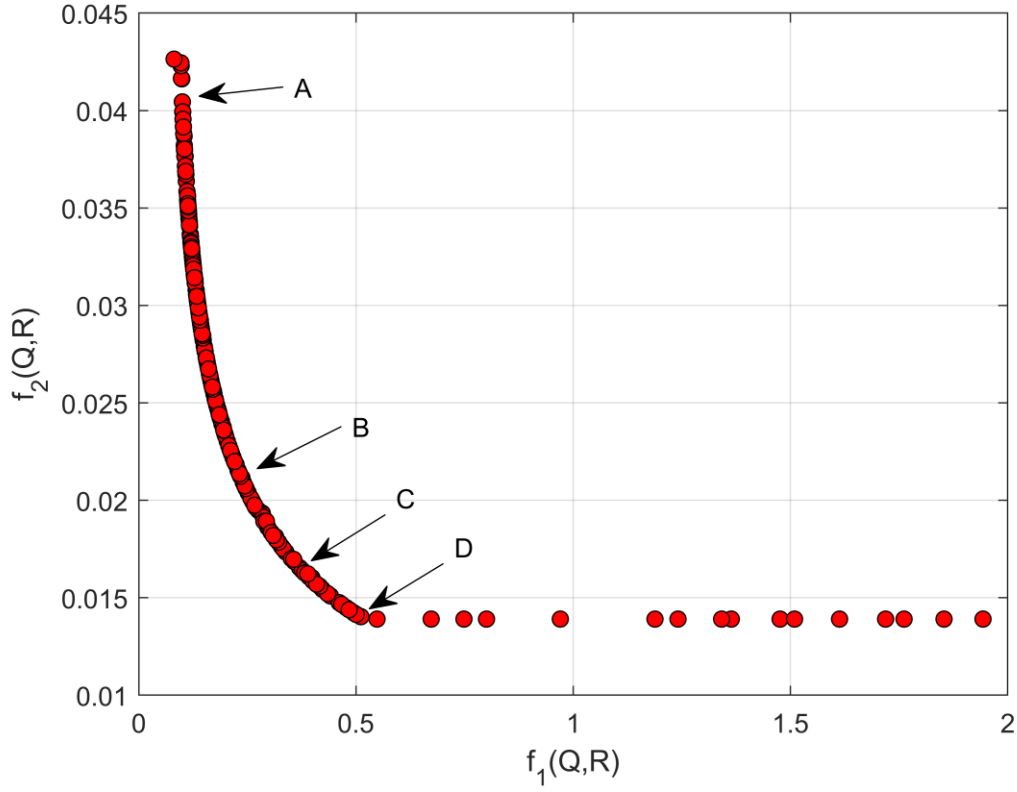
Tablo 1. NSGA-II için Uygulanan Ayarlar

NSGA-II parametresi	Değeri
Neslin birey sayısı	200
Çaprazlama olasılığı	0.9
Mutasyon olasılığı	0.5
Maksimum nesil sayısı	20
Mutasyon gücü	0.05

NSGA-II yardımıyla optimize edilmiş olan **Q** ve **R** ağırlık matrisleri için Pareto-Optimal çözümleri veren $f_1(Q, R)$ ve $f_2(Q, R)$ amaç fonksiyonlarına dair Pareto-Front grafiği Şekil 2'de gösterildiği gibi olmaktadır.

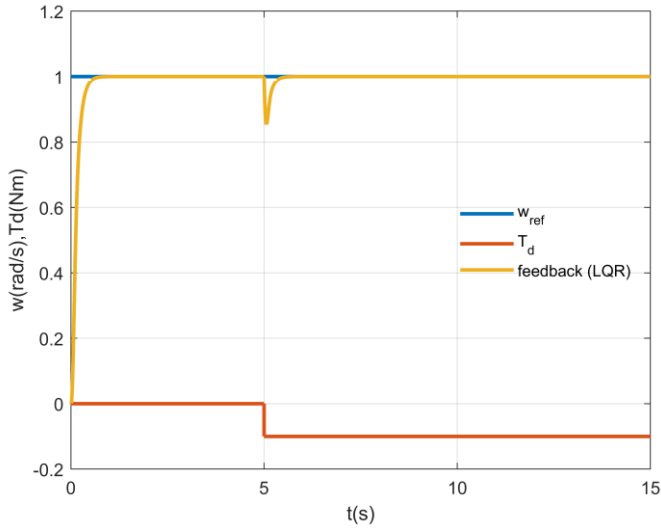


Şekil 2. Amaç Fonksiyonları için Pareto Front Grafiği

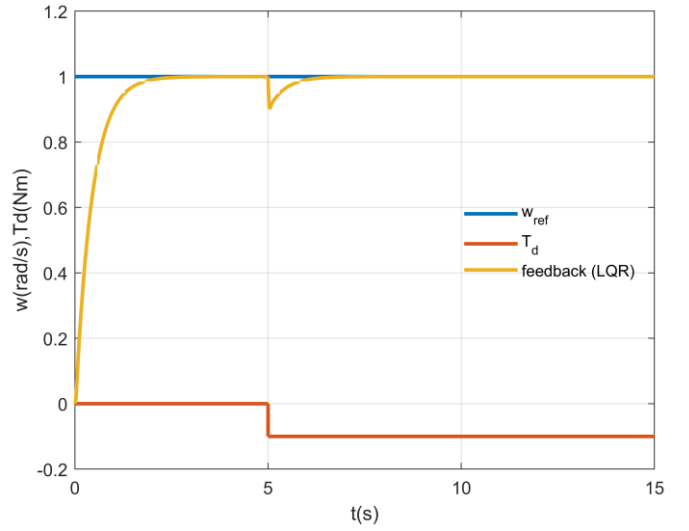


Şekil 3. [0,2] Aralığındaki f_1 Değerleri için Amaç Fonksiyonlarının Pareto Front Grafiği

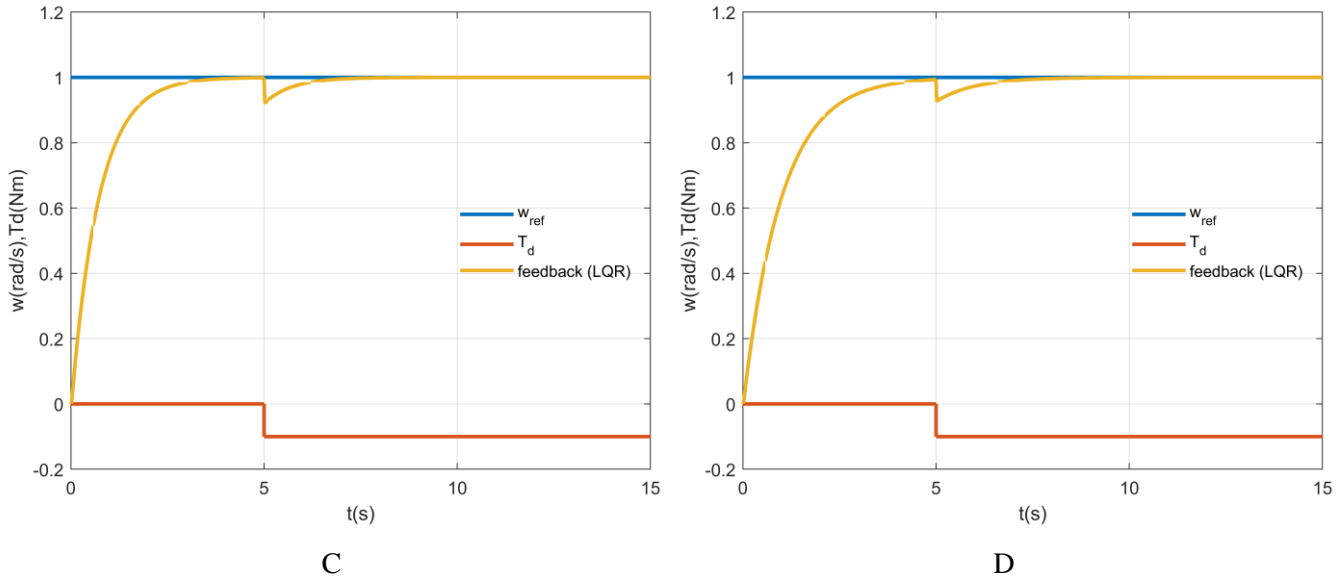
Şekil 3'teki amaç fonksiyonlarına dair Pareto Front grafiği üzerindeki **A, B, C, D** noktalarının tekabül ettiği, 4 farklı **Q** ve **R** ağırlık matrisi çiftine dair elde edilmiş olan, 4 farklı **LQR** optimal kontrolcünün performansı Şekil 4'te ayrı ayrı görülmektedir. Her durumda DC motora, bozucu giriş olarak, $t \geq 5s$ için motorun dönüş istikametinin aksine **0.1 Nm** tork uygulanmıştır.



A



B



Şekil 4. Pareto-Front Grafiğindeki 4 Farklı Nokta için Elde Edilen Kapalı Çevrim Sistem Cevapları

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çok amaçlı optimizasyon yardımıyla ağırlık matrisleri optimize edilen **LQR** optimal kontrolcünün DC motor örneği üzerindeki simülasyon sonuçları incelendiğinde, Şekil 3' teki Pareto-Front grafiğinde görülen A noktasından D noktasına doğru gidildikçe f_1 amaç fonksiyonunun değeri artmaktadır. Bu da kararlı duruma sapma miktarına dair integralin yani hatanın enerjisinin büyümekte olduğu anlamını taşır. Bu sebeple kararlı duruma ulaşma zamanı gitgide uzamakta sistemin referansı yakalaması daha uzun sürmektedir. Şekil 4'te verilen sistem cevabı grafiklerinde bu durum açıkça görülmektedir. Yine A noktasından D noktasına doğru gidildikçe f_2 amaç fonksiyonunun değeri azalmakta yani kapalı çevrim sistemin sol yarı "s" düzleminde yer alan kutupları imajiner eksenden uzaklaşmaktadır. Bu da yine Şekil 4'teki grafiklerden de görüleceği üzere sönüm etkisinin artmasına sebep olmaktadır. Burada aydınlatılması gereken önemli nokta, Pareto-Front grafiği üzerindeki Pareto-Optimal çözümlerden hangisi kullanılarak **LQR** kontrolcünün tasarlanacağı konusudur. Bu noktada, belirleyici olacak olan Pareto-Front'un şekli veya kapalı çevrim sistemden beklediğimiz performans konusunda neyi önemseydiğimizdir.

KAYNAKLAR

- Al-Mahturi, Ayad, and Herman Wahid. (2017). Optimal tuning of linear quadratic regulator controller using a particle swarm optimization for two-rotor aerodynamical system. *International Journal of Electronics and Communication Engineering* 11(2):196–202. doi: 10.5281/zenodo.1128899.
- Ata, Baris, and Ramazan Coban. (2015). Artificial bee colony algorithm based linear quadratic optimal controller design for a nonlinear inverted pendulum. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering* 3(1):1–6.
- Athans, M. (1966). The status of optimal control theory and applications for deterministic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 11(3):580–96. doi: 10.1109/TAC.1966.1098353.
- Bottura, C. P., and J. V Da Fonseca Neto. (1999). Parallel eigenstructure assignment via LQR design and genetic algorithms. Pp. 2295–99 vol.4 in Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251). Vol. 4.
- Hassani, Kaveh, and Won Sook Lee. (2014). Optimal tuning of linear quadratic regulators using quantum particle swarm optimization. *International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics* (59):1–8.
- HG Kamil. (2015). Intelligent model-based control of complex three-link mechanisms. Cardiff University.
- Lewis, Frank L. (1986). Optimal control. New York: Wiley.

Li, Yong, Jianchang Liu, and Yu Wang. (2008). Design approach of weighting matrices for lqr based on multi-objective evolution algorithm. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2008 (2):1188–92. doi: 10.1109/ICINFA.2008.4608180.

Mobayen, S., A. Rabiei, M. Moradi, and B. Mohammady. (2011). Linear quadratic optimal control system design using particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Physical Sciences* 6(30):6958–66. doi: 10.5897/IJPS11.726.

Nise, N. S. (2007). Control systems engineering. Wiley.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :04.06.2022
Kabul Tarihi :05.07.2022

Received Date : 04.06.2022
Accepted Date : 05.07.2022

BÖLGESEL OLARAK TOPLANAN ATIK Lİ-İYON PİLLERİNİN GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE İÇERİK VE MALİYET ANALİZLERİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINING THE CONTENT AND COST ANALYSIS OF RECYCLING REGIONALLY COLLECTED WASTE LI-ION BATTERIES

Hasan AKSU¹ (ORCID: 0000-0002-0343-3827)
Cengiz Ayhan ZIBA^{1*} (ORCID: 0000-0002-5021-4459)
Mehmet Hakan MORCALI² (ORCID: 0000-0003-2372-6819)

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye
²Gaziantep Üniversitesi, Naci Topçuoğlu Meslek Yüksek Okulu, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Cengiz Ayhan ZIBA, caziba@gmail.com

ÖZET

Modern hayatın vazgeçilmezi olan piller iletişim çağında çok daha fazla önem kazanmaktadır. Dolayısıyla kısa sürede çok fazla enerji depolama özelliğine sahip pillere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacımız ise Li-iyon piller ile karşılanmaktadır. Elbette hızlı bir tüketim toplumunun oluşması ile artan pil kullanımı çevre ve insan sağlığı için potansiyel bir tehlike oluşturmaktadır. Kullanım ömrünü doldurmuş pillerin çevreye geliş güzel bırakılması ciddi metal kirliliklerine sebep olmakla birlikte içeriğindeki ekonomik değeri olan malzemelerden dolayı da ekonomik kayıplar oluşmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul ili Ümraniye ilçesi Namık Kemal mahallesi sınırları içerisinde 12 atık pil toplama noktası belirlenmiş ve üç aylık süre içerisinde bu noktalarda toplanan kullanım ömrünü doldurmuş piller' sınıflandırılmış ve bileşenleri incelenmiştir. Bu süre içerisinde toplanan 110 adet Li-iyon pillinin ortalama kompozisyonu %20 Cu (Bakır), %8 Al (Alüminyum), %10 plastik, %55 pil pastası (LiCoO₂) ve %7 diğerleri olarak belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen metal ve plastik parçaların geri dönüşümde kullanılabilirliği görülmüş olup pil pastasının ise tekrardan kullanılabilirliği için bir takım spektroskopik analizler yapılmıştır. XRD, XRF ve SEM-EDX analizlerinden görüldüğü pil pastasındaki bileşiklerin morfolojik yapı bozulmaktadır. Pil pastasının tekrardan kullanılabilirliğini sağlanması için çok basamaklı kimyasal süreçlere ihtiyaç duyulmaktadır. Toplanan Li-iyon piller için ekonomik değer çalışması yapılmış ve atık bitmiş pillerin toplanarak ekonomiye kazandırılmasının önemi belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık piller; Li-iyon piller; pil içeriği; pillerin sınıflandırılması

ABSTRACT

Our need for portable energy is increased day by day. Batteries, which are indispensable for modern life, gain more importance in the communication time. Therefore, batteries with the ability to storage a lot of energy in a short time are need. This need is met by Lithium-ion batteries. Of course, the increasing use of batteries with the formation of a fast consumer society poses a potential danger to the environment and human health. Indiscriminate release end of life batteriesto the environment causes serious metal pollution, but there are also serious economic losses due to the materials that have economic value. In this study, 12 waste battery collection points were determined within the boundaries of Namık Kemal neighborhood of Umraniye district in Istanbul, and the "end-of-life batteries" collected at these points within a three-month period were classified and their components were examined. The average composition of 110 Li-ion batteries collected during this period was determined as 20% Cu (Copper), 8% Al (Aluminum), 10% plastic, 55% battery paste (LiCoO₂) and 7% others. The reusability of the metal and plastic parts obtained in the study was observed, and some spectroscopic analyzes were carried out for the reusability of the battery paste. Multi-step chemical processes are needed to ensure the reusability of the battery paste. An economic

ToCite: AKSU H., ZIBA C.A., MORCALI M.H.: (2022). BÖLGESEL OLARAK TOPLANAN ATIK Lİ-İYON PİLLERİNİN GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE İÇERİK VE MALİYET ANALİZLERİNİN BELİRLENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 408-417.

value study was carried out for the collected Li-ion batteries and the importance of collecting the waste batteries and bringing them into the economy was emphasized.

Keywords: Waste batteries, Li-ion batteries, battery content, classification of batteries

GİRİŞ

Bünyesinde bulunan kimyasal maddelerin arasındaki elektrokimyasal reaksiyonu elektrik enerjisine dönüştüren cihazlara pil denir. Piller dönüşümlü ve dönüşümsüz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu dönüşüm tek yönlü ise birincil veya tek kullanımlık pil denilmektedir. Dönüşümlü piller ise şarj edilebilir pil olarak tanımlanmaktadır. Bu piller üzerindeki yükü boşalttıktan sonra tekrar birçok kez yeniden şarj edilebilen pillerdir. Şarj edilebilir pillerin gelişimi ve enerjinin sürdürülebilir şekilde taşınması günümüzde birçok teknolojik cihazın geliştirilmesine yol açmıştır(Sait, 2010; Dell & Rand, 2001). Elbette teknolojik gelişmeler sonucu hızlı tüketimin artışı ve bu artış sonucu bitmiş/tükenmiş pillerin çevreye gelişi güzel bırakılmaları ciddi sorunları beraberinde getirmektedir. Yeryüzü kaynaklarının hızla tüketilmesi bilim insanlarını yeni kaynak arayışına sokmasıyla birlikte geri dönüştürülebilir malzemelerin önemini her geçen gün artırmaktadır. Ekonomik boyutu azımsanmayacak kadar fazla olan bitmiş pillerin ekonomiye geri kazandırılması günümüzdeki en popüler konu başlıkları arasındadır. İleriye dönük olarak elektrikli otomobillerin yaygınlaşmasıyla şarj edilebilen pillerin kullanımı artacak ve kullanım ömrü tamamlandığında büyük miktarlarda maden içeren bu atıkların geri dönüştürülme ihtiyacı doğacaktır. Bununla yeni bir kavram olan şehir madenciliği oluşacak ve ivmeli bir şekilde yeni iş kollarının doğmasına sebep olmuştur (Kanat vd., 1997).Bu atıklar birçok farklı disiplinin bir arada çalışmasına imkân sağlamaktadır. Günümüzde dahi atıkların ayrı bir şekilde değerlendirilmesi, taşınması, depolanması, izlenmesi ve bertaraf edilmesi gerektiği kanun ve yönetmeliklerle belirlenmiş ve bu konuda yaptırımlar uygulanmaktadır (Beyzanur, 2020; Bernardes vd., 2004; Erdin, 2004; Resmi Gazete, 2004)

Başlıca taşınabilir güç kaynağı türü olarak şarj edilebilir Li-iyon piller, elektronik cihazlar, cep telefonları ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pillerin performansı, fiyatı ve güvenliği esas olarak katot malzemelerinin özelliklerine bağlı olduğundan, yüksek kapasiteli, ucuz ve güvenli katot malzemelerinin araştırılmasına ve geliştirilmesine büyük önem verilmektedir (Dell & Rand, 2001). Lityum piller konusunda ilk gelişimin sağlandığı lityum polimer pil, ilk nesil cep telefonlarında, dizüstü bilgisayarlarda kullanılmıştır. Bu polimer piller yeni nesil lityum-iyon pil ile benzer bir teknolojiye sahipti. Fakat polimer piller yapı olarak jel elektrot malzemesine sahip oldukları için hafif ve esnektirler.Hafif olmaları sebebiyle genellikle dizüstü bilgisayarların pillerinde ve yüksek kapasiteli güç depolarında kullanılmıştır (Özcan, 2021).Ancak polimer piller yoğun sıcaklıklarda veya doğrudan güneş ışığı altında patlayabilmektedir.Ayrıca bu piller -10°C ila 45°C aralığındaki çevre koşullarının dışında tahrip olmaktadır. LiCoO₂'nin yüksek fiyatı ise araştırmacıları son yıllarda alternatif malzemeler aramaya yöneltmiştir. LiMn₂O₄ ve LiMnO₂ dâhil olmak üzere mangan bazlı katotlar, fiyat ve güvenlik özellikleri genel olarak kobalt veya nikel oksitlerden daha üstün görüldüğü için çok fazla tercih edilmektedir (Güven, 2000; Lee & Rhee, 2003; Erdin, 2004).

Pillerin toplanması, depolanması ve türlerine göre ayrıştırılması işleri ülkemizde uzun yıllardır TAP (Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği) tarafından gerçekleştirilmektedir. Fakat son yıllarda akıllı cep telefonlarının hızla yaygınlaşmasına ek olarak birçok elektronik cihazlarda bulunan Li-iyon pillerin ortam koşullarında patlama ve yanıcı olma risklerinden dolayı çevreye gelişi güzel bırakılmakta veya azda olsa bir takım özel toplayıcılar tarafından toplanarak yurtdışına satılmaktadır (Kartal vd., 2004; Kanar & Elmaslar, 1997). Bu sebeple bu alanda bilimsel bir yaklaşım sergilenmesine ihtiyaç hasıl olmaktadır.

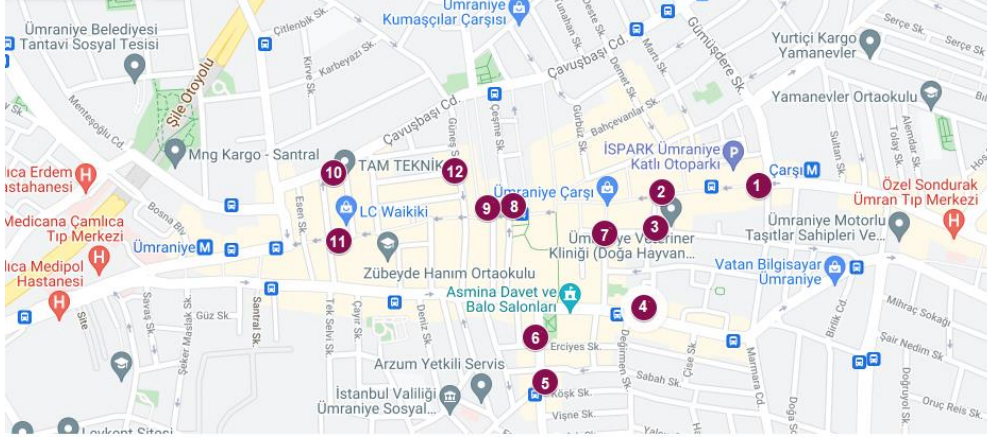
Bu çalışmada, İstanbul ili Ümraniye ilçesi Namık Kemal mahallesinde bulunan atık pil toplama noktalarında toplanan atık pillerin sınıflandırılması ve ekonomik potansiyellerinin belirlenmesi konusunda bilimsel veri oluşturulması için bir takım çalışmalar yapılmıştır.

2020 Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre İstanbul ili Ümraniye ilçesinin nüfusu 713.803'dir. Nüfusun %50,16'sı (358.075) erkek ve %49,84'ni kadın (355.728) oluşmaktadır. Bu nüfus her geçen gün artmaktadır. İstanbul'un toplam nüfusunun yaklaşık %20'si bu ilçede yaşamaktadır. Yoğun bir nüfusa sahip olan İstanbul ili Ümraniye ilçesinde elektronik ürünlere olan talep dolaylı olarak bitmiş/tükenmiş/kullanılmış pil sayısı ile doğru orantılı artmaktadır. Bu bağlamda belirlenen 12 tane alan atık pil toplama noktası olarak seçilmiştir. Bu mahalle ve kamu kuruluşunda bulunan atık pil toplama kutularından alınan piller toplanarak türlerine göre

sınıflandırılmıştır ve gelecekte ülkemizde kurulu olan ve/veya yeni kurulabilecek atık pil işleme tesisi için bir akım önemli veri çıktıları sunulmuştur.

MATERYAL VE METOD

Bilimsel verilerin oluşturulduğu bu çalışmada, İstanbul ili Ümraniye ilçesi Namık Kemal mahallesinde bulunan 12 adet atık pil toplama noktası belirlenmiş ve bu noktalar harita üzerinde işaretlenerek Şekil 1’de verilmiştir, atık pil toplama kutularında toplanan piller takip edilmiştir. Araştırma yapılan bölgelerde bulunan atık pil toplama kutularındaki piller 3 aylık bir dönem sonunda pillerin adetlerinin ve türlerinin belirlenmesi için alınmıştır.



Şekil 1. İstanbul İli Ümraniye İlçesi Namık Kemal Mahallesinde Atık Pil Toplama Kutularının Konumları

Toplama noktalarından alınan Li-iyon pillere ait görsel Şekil 2’de verilmiştir. Toplama işleminden elde edilen pillere ait veriler Tablo 1, 2 ve 3’de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 2. Toplanan Li-İyon Pillere Ait Görseller

Tablo 1’den görüleceği üzere en çok toplanan marka sıralamasında Apple olmuştur. Daha sonra Samsung markalı pil tespit edilmiştir.

Tablo 1. Toplanan Pillerin Markalarına Göre Sınıflandırılması (Miktar)

Marka	Adet	Marka	Adet	Marka	Adet
ACL	1	Original	5	Iglaze	1
Apple	60	Paleon	1	i8190	1
BL-4U	2	Powerstar	1	Mopal	1

BNT	1	Oppa	2	Sunix	3
Bower	1	Samsung	16	Syrox	1
Deluxe	1	Soffany	2	Top Akku	1
Efcell	1	Sony	2	Trident	1
HTC	2	Nokia	2		

Toplanan piller markalarına göre sınıflandırıldıktan sonra piller voltaj değerlerine göre sıralama yapılmıştır. Tablo 2'den görüleceği üzere en yüksek voltaj değeri 3,8 V olarak tespit edilmiştir. İkinci en yüksek voltaj değeri 3,7 V değerinde elde edilmiştir.

Tablo 2. Pillerin Voltaj Değerlerine Göre Sınıflandırılması

Pillerin Voltaj değerleri	Adet
3,6 V	2
3,7 V	37
3,8 V	45
3,82 V	17
3,85 V	6
4,35 V	1
4,4 V	2

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Pillerin marka ve voltaj değerlerine göre sınıflandırılması yapıldıktan sonra halk arasında en çok tercih edilen Li-iyon pil markalarının içerikleri belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak iletken bir sıvı içerisinde deşarj edilen piller el yordamıyla parçalanmıştır. Pillerin içerisinden çıkarılan malzemeler kategorize edilerek ağırlıkları kaydedilmiş ve Tablo 3 oluşturulmuştur. Toplanan piller arasında en bilindik markalar için ortalama bakır içeriği %20 civarındadır ve tüm marka atık pillerde bakır içeriği benzerdir. Sadece Samsung marka pilde bakır içeriği %29 olarak tespit edilmiştir. Li-iyon piller içerisinde alüminyum içeriği değişkenlik göstermektedir. Örneğin; Sony marka Li-iyon pil içerisinde %8 Al mevcut iken Samsung marka pilde %16 Al mevcuttur. Halk arasında en çok tercih edilen markalardan olan Apple ve Samsung Li-iyon pillerin bakır içeriği gibi alüminyum içerikleri de benzerdir. Bu markalara ait pillerin benzer teknolojiye sahip olduğunu göstermektedir. Plastik içerikleri incelendiğinde ortalama olarak %8-10 civarında olduğu anlaşılmaktadır. Li-iyon pillerin en önemli hammaddesi olan pil pastası içeriği ise markalarda farklılık göstermektedir. Genelde pillerin sahip oldukları voltaj değerleri pil pastasının miktarı ile doğru orantılı olmaktadır.

Tablo 3. Pil Markalarının Ortalama İçerikleri*, (Ağırlıkça ve Yüzdece)

Marka	Bakır		Alüminyum		Plastik ve diğerleri		Pil Pastası	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
Sony	11	22	4	8	3	6	31	63
Apple	6	24	4	16	2	8	13	52
HTC	7	18	4	10	2	5	27	68
Original	6	21	4	14	2	7	17	59
Samsung	9	29	5	16	3	10	14	45
Nokia	3	20	1	7	2	13	9	60
Syrox	7	18	4	10	5	13	24	60

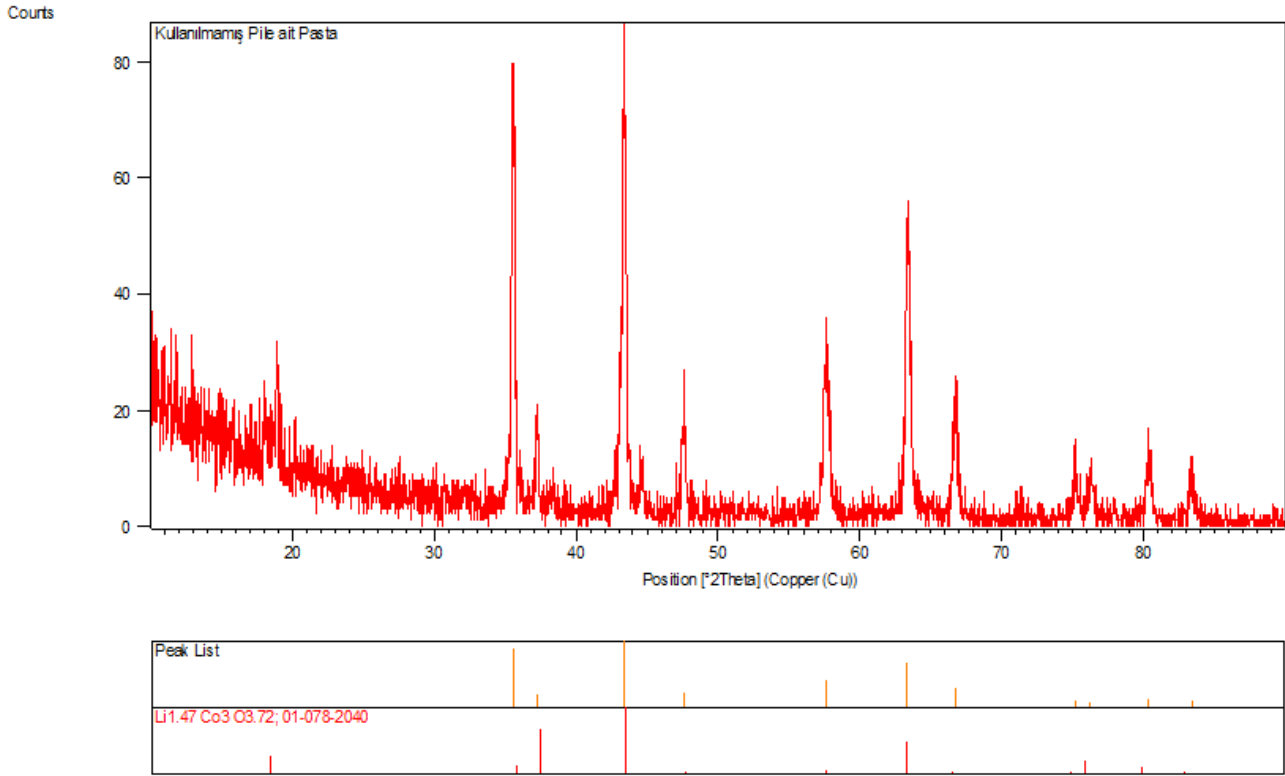
*Not: Miktarlar kuru bazda belirlenmiştir.

Pil pastası içeriği en fazla HTC marka Li-iyon pilde %68 tespit edilmiştir. En düşük pil pastası içeriği ise Samsung markasında %45 belirlenmiştir. Bu miktarın düşük çıkmasındaki etkenlerden birisi Samsung markasına ait basit teknolojiye sahip ürünlerin çok fazla voltaj değerlerine ihtiyaç duymamasıdır. Oysaki HTC ve Sony gibi markalara ait akıllı cep telefonlarının sahip oldukları yüksek teknolojik özellikler yüksek voltaj değerine sahip Li-iyon piller ile sağlanabilmektedir. Özellikle cep telefonlarında kullanılan ekran kalitesi pil tüketimini önemli ölçüde

etkilemektedir. Bahsi geçen bu nedenlerden dolayı Li-iyon pillerin içeriğindeki pil pastası yüzdeleri ciddi değişkenlik gösterebilmektedir.

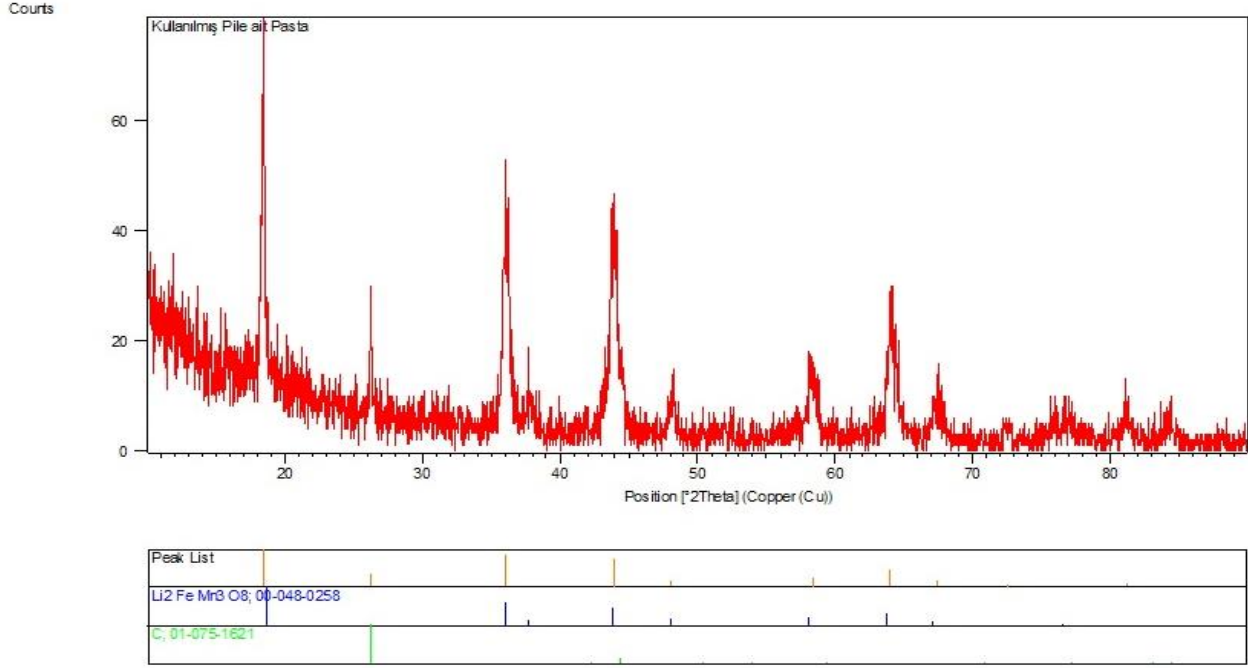
Kullanılmış pil pastasının yapısını tespit etmek amacıyla X-ışınları kırınımı (XRD), X-ışınları floresansı (XRF) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile enerji dağılım difraksiyonu (EDX) kullanılmıştır. Kullanılmış pil pastasındaki yapı değişikliğini anlayabilmek amacıyla kullanılmamış pil pastasına da aynı analizler uygulanmıştır.

XRD analiz sonuçlarından görüleceği üzere, kullanılmamış pil içerisinde bulunan pil pastasının genel yapısını LiCoO_2 bileşiğine benzer 01-078-2040 katalog numaralı spinel yapı $\text{Li}_{1.47}\text{Co}_3\text{O}_{3.72}$ bileşiğinin oluştuğu anlaşılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Kullanılmamış Pile Ait Pil Pastasının XRD Analizi

Kullanılmış pil pastasına ait XRD analiz sonucuna göre pil pastasının içerisinde yine $\text{LiM}_1\text{M}_2\text{xO}_y$ esaslı bileşik bulunmakta ($\text{Li}_2\text{FeMn}_3\text{O}_8$) ve bir miktarda anot malzemesinden kaynaklı olarak karbon bulunmaktadır (Şekil 4).



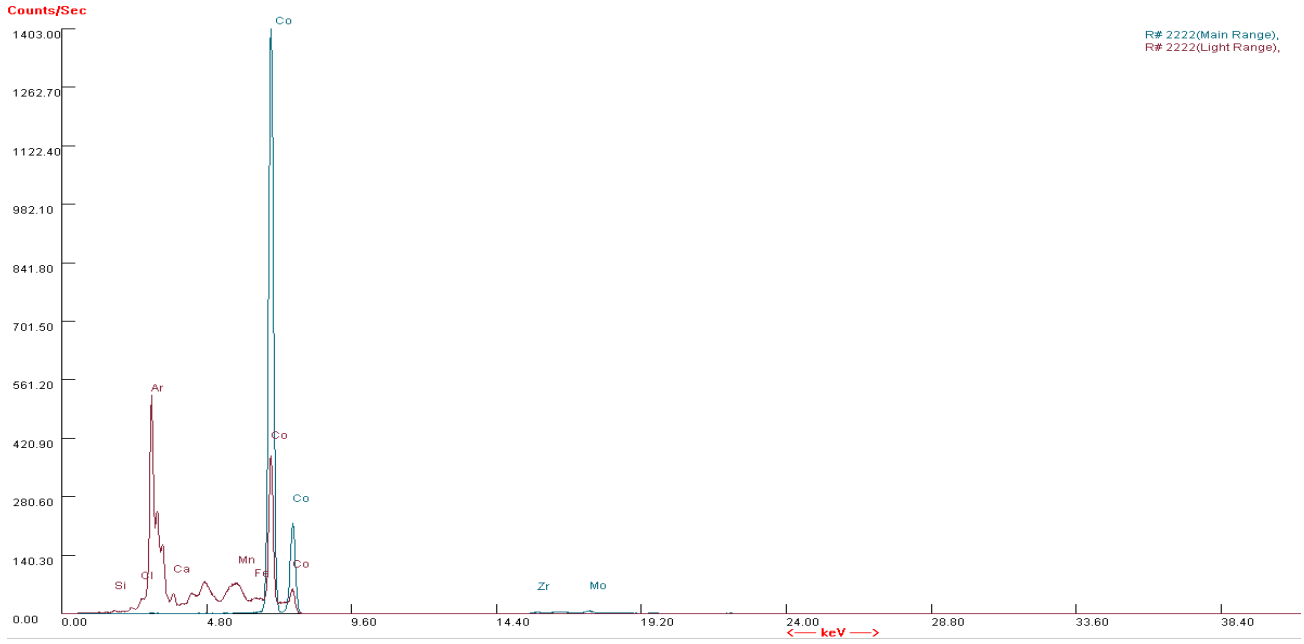
Şekil 4. Kullanılmış Pile Ait Pil Pastasının XRD Analizi

Aynı pil pastalarına X-ışınları floresansı analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir.

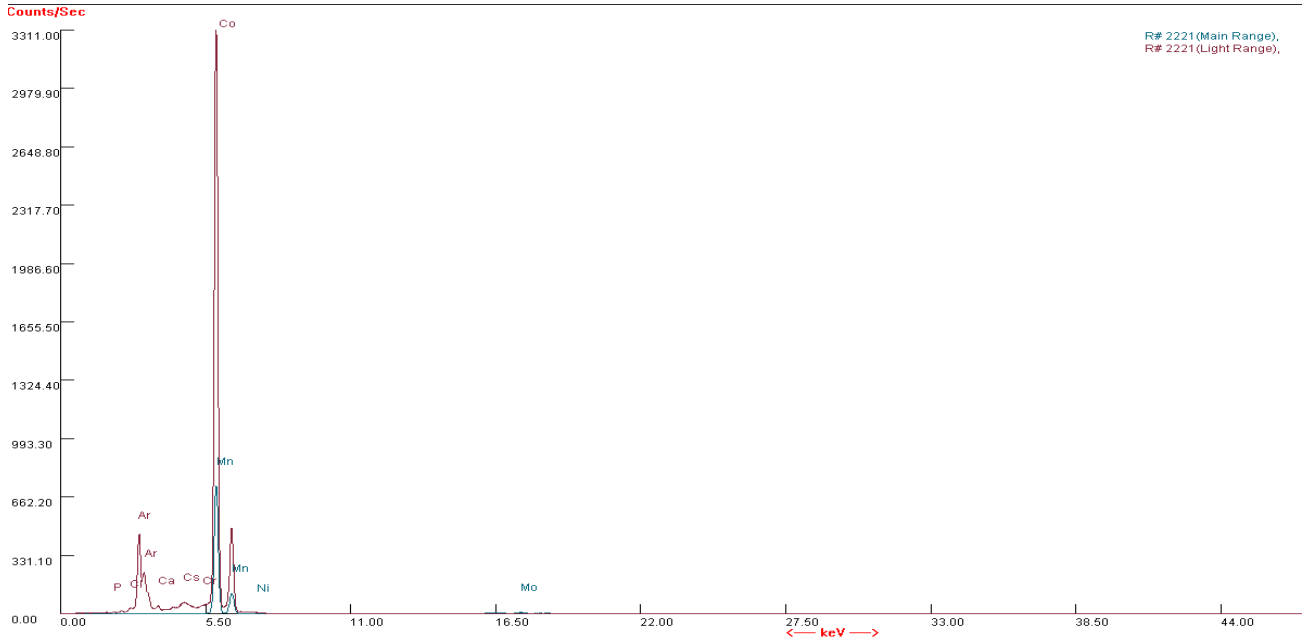
Tablo 4. Pil Pastalarına Ait XRF Analiz Sonuçları

Bileşik	Kullanılmamış	Kullanılmış
	Pil Pastası Konsantrasyon, %	Pil Pastası Konsantrasyon, %
CoO	64,2	24,1
MnO	1,1	35,7
Fe ₂ O ₃	5,1	7,1
Al ₂ O ₃	1,9	2,1
SiO ₂	0,6	0,7
SO ₃	0,5	1,1
Na ₂ O	2,3	2,6
Cl	1,1	2,1
NiO	0,4	0,6

XRF analizinden elde edilen sonuçlar XRD verileri ile benzerlikleri örtüşmemektedir. Çünkü pil pastası içerisinde bulunan lityum iyonları XRF cihazı ile tespit edilememiştir. XRF cihazı atom numarası 11’den büyük olan elementleri tespit edebilmektedir. Lityum iyonlarının tespit edilememesi sonuçlarının güvenilirliğini etkilemektedir. Yapı içerisinde MnO, Fe₂O₃, ve Al₂O₃ gibi bileşiklerin varlığının göstermesi yapı içerisindeki olası bileşiklerin pikleri ile çakışma olduğu yorumu yapılabilecektir (Şekil 5-6).

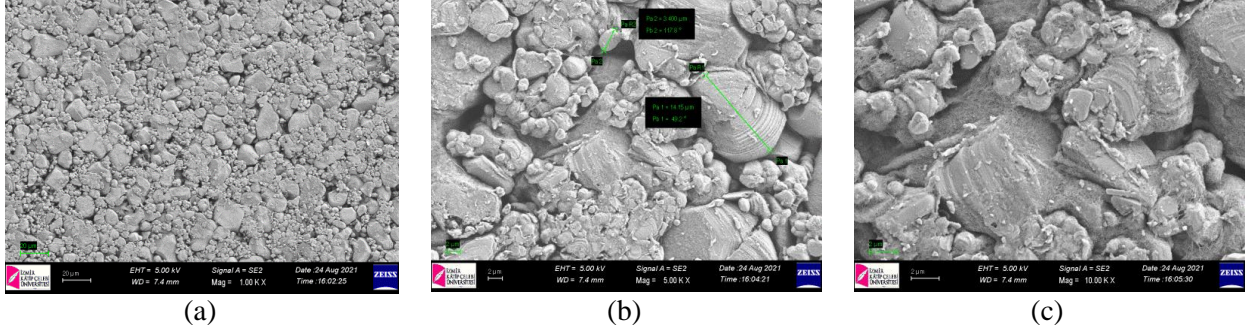


Şekil 5. Kullanılmamış Pil Pastasına Ait XRF Sonuçları



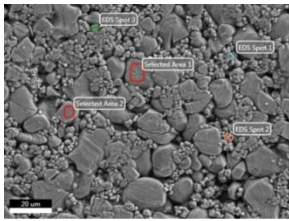
Şekil 6. Kullanılmış Pil Pastasına Ait XRF Sonuçları

Kullanılmamış pil içerisinden çıkarılan pil pastasına ait SEM görüntülerinde pil pastası içerisindeki Lityum kobalt oksit içerikli katot malzemesinin bütünlük arz ettiği ve pilin şarj/deşarj işlemine henüz maruz kalmamasından ötürü pil pastasının deformasyona uğramadığı anlaşılmaktadır (Şekil 7).

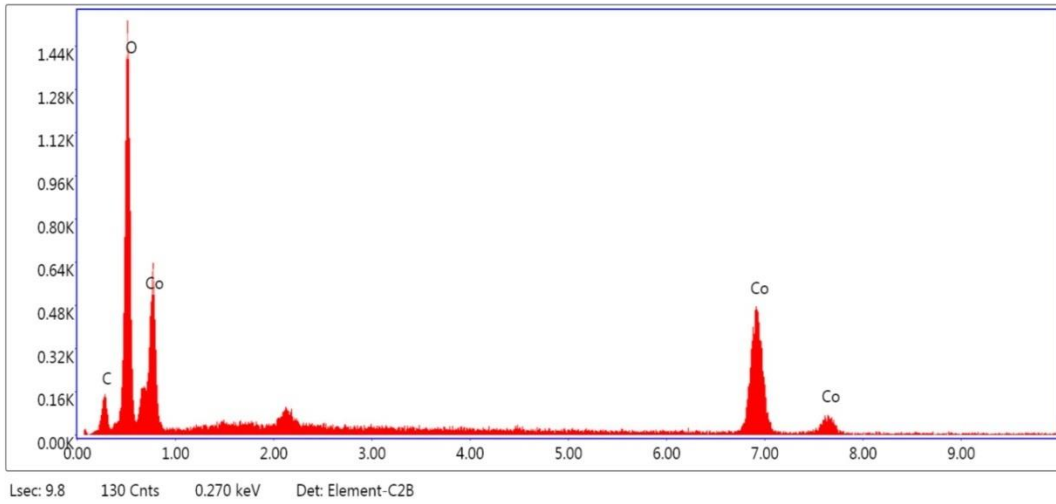


Şekil 7. Kullanılmamış Pile Ait Pil Pastasının SEM Analizi (A) 1KX, (B) 5KX, (C)10 KX

EDX analizinden görüleceği üzere kullanılmamış pil pastası içerisindeki yapının genel olarak kobalt esaslı olduğu anlaşılmaktadır. XRF analizinde olduğu gibi EDX analizinde lityum elementi tespit edilememiştir. EDX cihazı atom numarası 11'den büyük elementleri tespit edebilmektedir. EDX analizinde elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilen XRD analiz sonuçları benzerlik arz etmektedir.

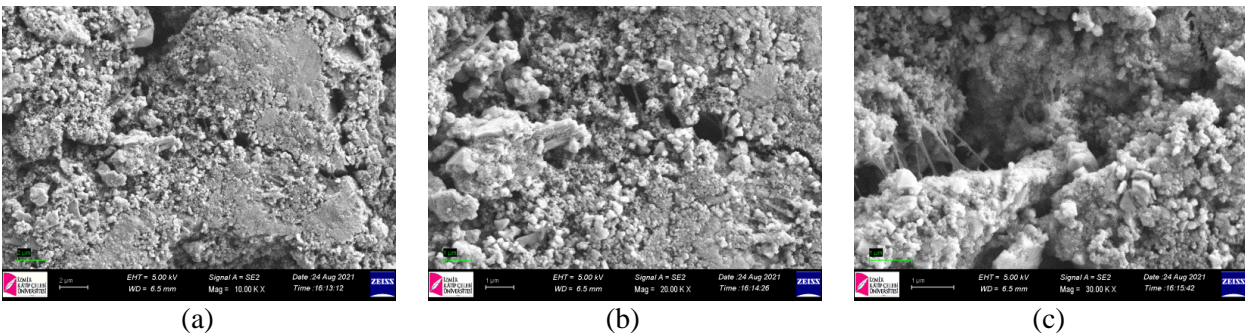


Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
C K	3,26	9,34	46,41	20,26
O K	21,86	46,97	973,24	6,97
CoK	74,88	43,69	695,17	4,18



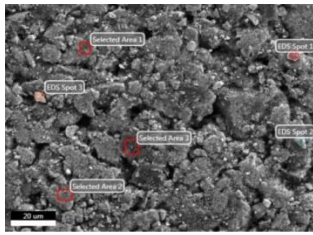
Şekil 8. Kullanılmamış Pile Ait Pil Pastasının EDX Analizi

Kullanılmış pil pastasına ait SEM analiz sonuçları Şekil 9'de verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere katot pil pastasının defalarca şarj/deşarj işlemine maruz kalması sonucunda pastanın özelliğini kaybettiği anlaşılmaktadır.

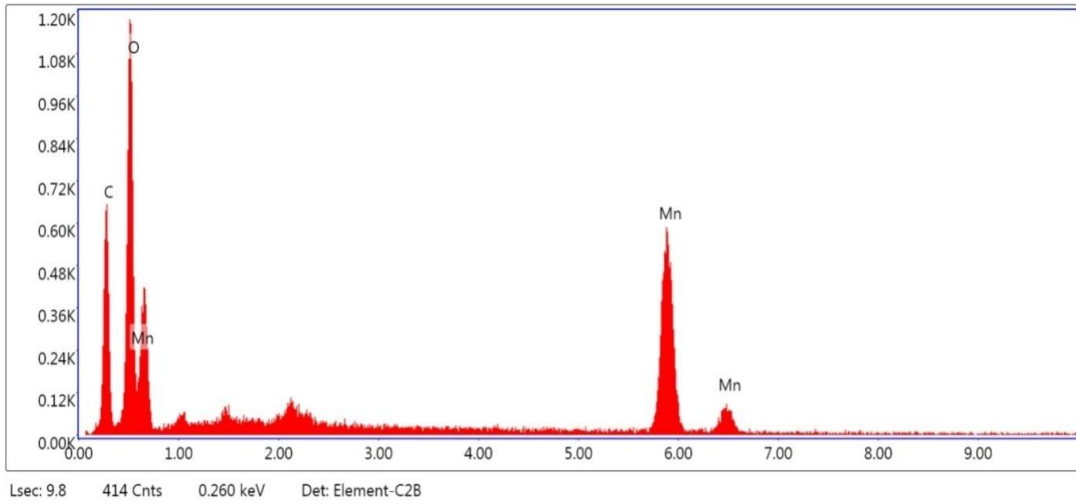


Şekil 9. Kullanılmamış Pile Ait Pil Pastasının SEM Analizi(A) 1KX, (B) 5KX, (C)10 KX

Şekil 7’de verilen pil pastasına ait SEM görüntülerinde bütüncül yapılar gözlenmekte iken Şekil 9’da verilen pil pastasına ait görüntülerde malzemenin bütüncül özelliğini kaybettiği ve bu kaybolan özelliği sonucunda malzemenin küçük boyutlu yapılara parçalandığı anlaşılmaktadır.



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
C K	19,09	40,27	370,86	9,75
O K	19,96	31,62	699,93	8,36
MnK	60,95	28,11	807,16	3,89



Şekil 10. Kullanılmış Pile Ait Pil Pastasının EDX Analizi

Şekil 10’da verilen EDX analiz sonucuna göre kullanılmış pil pastası içerisindeki yapının mangan esaslı lityum bileşiği olduğu anlaşılmaktadır. EDX analizinde lityum elementi tespit edilememiştir. Yapının içerisinde karbon elementi tespit edilmiştir. Bunun pil pastasına pil içerisindeki anottan bir miktar karışma olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler kullanılmış pil pastasına ait olan XRD analiz sonuçları benzerlik arz etmektedir.

Pil pastalarına uygulanan kimyasal analiz sonuçlarına göre pillerin içerisinde kullanılan katot malzemesinin lityum esaslı metal oksit bileşiklerinden oluştuğu kanıtlanmıştır. Bu metal oksit bileşiklerinin pil içerisinde kullanımı üreticinin tercihinine göre şekil almaktadır. Bu sebeple aynı markalara sahip pillerde bile pilin üretim yerinin farkına göre kullanılan pil pastası kompozisyonu değişiklik göstermektedir. Bu sebeple pil pastasının tekrardan kullanılabilirliğinin sağlanması için bir takım kimyasal prosesler uygulayarak bileşikler çözeltilmeye alınması gerekmektedir. Ayrıca çözümlendirme sürecinin tamamlanmasından sonra çöktürme ve saflaştırma basamakları çok önem arz etmektedir.

Toplanan 110 pil için ekonomik değer fizibilitesi yapılmıştır. Buna göre 110 pilin toplam ağırlığı 3196 g’dır. Kullanılmış Li-iyon bir pillerin ortalama ağırlığı yak. 30 g gelmektedir. Kullanılmış bir adet Li-iyon pilinde ortalama 6 g bakır, 2,5 g alüminyum, 3 g plastik, 16,5 g pil pastası ve 2 g da diğer atıklardan oluşmaktadır. Londra Metal Borsası (LME) göre 2021 yılsonu fiyatları 1 kg Bakır satış fiyatı \$9,90 , Alüminyum satış fiyatı \$2,98 , Plastik satış fiyatı \$0,42, Pil pastası satış fiyatı \$3,50 olarak alınmıştır (LME, 2020). Buradan çıkarılan sonuç ile hesaplanan 100 adet kullanılmış Li-iyon pilden (ort. 3000 g) geri dönüştürülmüş malzemeler için elde edilen ticari değer; 600 g Bakır elde edilmiş olup toplam \$5,94, 250 g Alüminyum elde edilmiş olup toplam \$0,75, 300 g Plastik elde edilmiş olup toplam \$0,13 , 1650 g Pil pastası elde edilmiş olup toplam \$5,78 ve 200 g diğer atıklar elde edilmektedir. Toplam 100 adet Li-iyon atık pil geri dönüşüm hesabında ekonomik kazanım ort. \$12,60 hesaplanmıştır.

SONUÇ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle elektronik cihazlar büyük bir hızla artmış ve çok geniş bir kitleye yayılmıştır. Bu elektronik cihazların en önemli parçalarından birisi olan taşınabilir piller (özellikle Li-iyon piller) çevre için tehlikeli boyutlarda risk teşkil etmektedir. Ayrıca bahsi geçen bu piller önemli hammadde kaynağı ve ekonomik / ticari değere sahiptir.

Bu çalışmada, İstanbul ili Ümraniye ilçesinin Namık Kemal mahallesinde bulunan Li-iyon pilleri toplamak için yerleştirilmiş olan 12 adet atık pil toplama kutularının yerleri (telefon bakım-onarım mağazaları ve kamu kurum kuruluşları) belirlenmiştir. Araştırma yapılan bölgelerde bulunan atık pil toplama kutularındaki piller 3 aylık periyoda göre toplanmıştır. İlk olarak toplanan Li-iyon pillerin ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçümden sonra her bir grup içerisindeki pilleri deşarj (üzerindeki yükü boşaltmak) edilmek amacıyla elektrolitik (iletken) sıvı içerisinde bekletilerek potansiyel gerilimi sıfırlanmıştır. Deşarj işlemi sonrası piller kendi grupları içerisinde el yordamı ile parçalanarak, çıkan malzemeler tanımlanarak her bir malzeme tartılarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda Li-iyon pilinin ortalama kompozisyonu %20 Cu (Bakır), %8 Al (Alüminyum), %10 plastik, %55 pil pastası (LiCoO₂) ve %7 diğerlerden oluşmaktadır. XRF ve XRD analizleri ile eş zamanlı yürütülen SEM analizlerinden elde edilen verilerden anlaşıldığı üzere katot malzemesi olarak kullanılan Li-metal Oksit bileşiklerine birçok defa şarj ve deşarj işleminin uygulanması sırasında bu bileşiğin katotdan anoda ve tam tersi olarak sürekli göç etmesi sırasında bileşikteki morfolojik yapı bozulmaktadır. Kullanılmış (bitmiş) Li-iyon pillere ait pil pastasının doğrudan ve/veya bir takım basit işlemler uygulanarak tekrardan kullanılabilmesi mümkün görünmektedir. Pil pastasının tekrardan kullanılabilirliğini sağlanması için çok basamaklı kimyasal süreçlere ihtiyaç vardır.

Pillerin ekonomik değerlendirilmesi için yapılan çalışmada; toplam 100 adet Li-iyon atık pil geri dönüşüm hesabında ekonomik kazanım ort. \$12,60 hesaplanmıştır. Ortalama bir kullanılmamış Li-iyon pilin adet fiyatı Türkiye şartlarında \$23 denk gelmektedir. 100 adet pil üzerinden yapmış olduğumuz bu çalışmada ise \$2300 dolar yapmaktadır. Bu hesapların sonucundan pilleri hammaddelerinin doğadan elde edilmesi yüksek maliyetli olacağından hazır işlenmiş malzemelerin direk kullanımı ekonomik açıdan daha da önemli bir kriter olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Bernardes, A.M., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S. (2004). Recycling of batteries: a review of current processes and technologies, *Journal of Power Sources*, 130, 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.026>
- Beyzanur, K. (2020). Geçmişten Günümüze Piller, *Takvim-i Vekayi*, 8 (1), 104-115.
- Dell, R. M., Rand, D.A.J. (2001). *Understanding Batteries*, ISBN: 9780854046058, Cambridge, UK.
- Erdin, E. (2004). Katı Atık Olarak Piller, Aküler ve Bataryalar ve Etkileri, Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Biyolojisi ve Ekolojisi Ders Notları, İzmir. (web.deu.edu.tr/erdin/pubs/doc62.htm)
- Güven, S., (2000). Teorik ve Pratik Elektronik–8, Piller ve Akümülatörler, *Antrak Gazetesi*, 26, Teorik ve Pratik Elektronik Köşesi (Erişim Tarihi: 1 Nisan 2020)
- Kanat, G., Gönüllü, M. T., Elmaslar, T. (1997). Piller ve Çevre Kirliliği Açısından Değerlendirilmesi, *Yapı Malzeme ve Teknik*, 15, 78-86.
- Kartal, G., Güven, A., Kahvecioğlu, Ö. ve Timur, S. (2004). Metallerin Çevresel Etkileri-II, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Metalurji Dergisi*, 137, 46-51.
- Lee, C.K., Rhee, K. (2003). Reductive Leaching of Cathodic Active Material From Lithium Ion Battery Wastes, *Science Direct*, 68, 5-10. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00167-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00167-6)
- Naylab, A.A., Elkhatab, R.A., Badawy S. M., El-Khateeb M.A. (2017). Acid leaching of mixed spent Li-ion batteries, *Arabian J of Chemistry*, 10(2), S3632-3639. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.04.001>
- Özcan, Ö.F., (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması, *U J Sci, Part A*, 8(2), 276-298
- Sait, K., (2010). Atık/Kullanılmış Çinko-Karbon ve Alkali Pillerden Çinko ve Manganın Geri Kazanılması. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Resmi Gazete (2004). "Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği", 31.08.2004 tarih ve 25569 sayılı Resmi Gazete.

LME (2020). London Metal Exchange, ' <https://www.lme.com> '.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.06.2022
Kabul Tarihi : 01.07.2022

Received Date : 21.06.2022
Accepted Date : 01.07.2022

MOPSO TABANLI LQG SERVO KONTROL YAKLAŞIMI İLE ARAÇ ÜZERİNDE KONUMLU TERS SARKACIN KONTROLÜ

CONTROL OF THE INVERTED PENDULUM ON A CART WITH THE MOPSO- BASED LQG SERVO CONTROL APPROACH

Ali Fazıl UYGUR^{1*} (ORCID: 0000-0002-1049-4927)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali Fazıl UYGUR, fuygur@ksu.edu.tr

ÖZET

Araç üzerinde konumlu Ters Sarkaç, çeşitli kontrol yöntemlerinin uygulanması ve performanslarının karşılaştırılması adına, akademik anlamda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kararsız ve lineer olmayan Ters Sarkaç, sistem bozucuları ve ölçüm gürültüleri karşısında, duyarlı ve kırılgan yapıdadır. Bozuculara ve sensör gürültüsüne maruz kalmak, kontrol sistemlerinin performansını olumsuz etkilemekte ve kontrol kalitesini düşürmektedir. Buna çözüm olarak, başvurulan yöntemlerden biri de Kalman Filtresi ile LQR kontrolün kombinasyonu olan ve Lineer Quadratic Gaussian (LQG) olarak bilinen kontrol tasarım yöntemidir.

Bu çalışmada, sistem bozucularına ve sensör gürültüsüne maruz kalan Ters Sarkaç için, sarkacı taşıyan araç, verilen bir referansı takip ederken, sarkacın da bu esnada kararsız dik denge konumunu koruması istenmektedir. Sistem bozucuları ve sensör gürültüleri Gaussian Beyaz Gürültü olarak seçilmişlerdir. Referans takibi sağlamak ve denge noktası civarında kararlılığı sürdürmek adına, LQG servo kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Kontrolcünün, beklentileri en iyi şekilde karşılaması bakımından, performansının optimize edilmesi gerekir. Bu maksatla, LQG servo kontrolcü bünyesindeki LQI bloğu için performans ölçütü ağırlık matrislerinin, Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (MOPSO) yardımıyla optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ters sarkaç, LQG servo kontrolcü, kalman filtresi, MOPSO

ABSTRACT

The Inverted Pendulum, located on the vehicle, is widely used in the academic sense for the application of various control methods and comparison of their performance. The unstable and non-linear Inverted Pendulum is sensitive and fragile to system disturbances and measurement noises. Exposure to disturbances and sensor noise adversely affects the performance of control systems and reduces control quality. As a solution to this, one of the methods used is the control design method, which is a combination of Kalman Filter and LQR control and known as Linear Quadratic Gaussian (LQG).

In this study, for the Inverted Pendulum, which is exposed to system disturbances and sensor noise, the vehicle carrying the pendulum is required to maintain an unstable vertical equilibrium position while following a given reference. System disturbances and sensor noises are chosen as Gaussian White Noise. LQG servo control approach is adopted to provide reference tracking and maintain stability around the balance point. In order for the controller to best meet expectations, its performance needs to be optimized. For this purpose, the performance criterion weight matrices for the LQI block within the LQG servo controller have been optimized with the help of the Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm (MOPSO).

Keywords: Inverted pendulum, LQG servo controller, kalman filter, MOPSO

ToCite: UYGUR, A.F., (2022). MOPSO TABANLI LQG SERVO KONTROL YAKLAŞIMI İLE ARAÇ ÜZERİNDE KONUMLU TERS SARKACIN KONTROLÜ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 418-433.

GİRİŞ

Kontrol sistemlerinin tasarımı ve kıyaslanmaları söz konusu olduğunda, kararsız ve lineer olmayan yapıdaki ters sarkaç (TS) sistemleri, yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kontrol edilen değişken sayıları, kontrol giriş sayısından büyük olması sebebiyle, TS'ler eksik tahrikli sistemlerdir ve lineer olmaktan bir hayli uzak tabiatları ve kararsız olmaları sebebiyle, çeşitli kontrol yöntemlerinin uygulanması ve performanslarının mukayesesi bakımından oldukça elverişlidirler.

TS ile ilgili olarak karşılaşılan ve çözüm aranan iki önemli kontrol problemi; sarkacın kararsız dik denge konumunda tutulmaya çalışılması ve sarkacı üzerinde taşıyan aracın verilen bir referansı takip edebilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. (Mishra & Chandra, 2014; Vinodh Kumar & Jerome, 2013)

TS'nin modellenmesi ve kontrolü sayesinde pek çok gerçek zamanlı probleme dair ortaya koyulan çözümler, TS sistemini, kontrol konusunda önemli bir araştırma alanı haline getirmektedir. (Li, Ding, & Cheng, 2012; Singh, Nema, & Padhy, 2014)

Füze fırlatma sistemleri, iki teker üzerinde dengede durarak kişisel ulaşım amaçlı kullanılan araçlar v.b. pek çok sistemin lineer olmayan dinamikleri TS ile benzerlik göstermektedir. Bu anlamda TS'ler örneğin, insansı robotlara dair denge ve kinematik özelliklerin araştırılması noktasında önemli bir model teşkil edebilmektedirler. (Suzuki, Nomura, Casadio, & Morasso, 2012)

TS sistemleri için Literatürde şimdiye kadar pek çok farklı kontrol yöntemi göze çarpmaktadır. Bunlar arasında Proportional-Integral-Derivative (PID) ve Proportional-Derivative (PD) kontrol, Model öngörülü kontrol, Fuzzy kontrol, Linear Quadratic Regulator (LQR), H_{∞} kontrol, Kayan Kipli Kontrol v.b. gibi pek çok kontrol yönteminden bahsetmek mümkündür. (Ashok Kumar & Kanthalakshmi, 2018; Bălan, Mătieş, & Stan, 2005; Chawla, Chopra, & Singla, 2019; Irfan, Mehmood, Razzaq, & Iqbal, 2018; Roose, Yahya, & Al-Rizzo, 2017; Yu & Jian, 2014)

Bu kontrol yöntemlerinden bazıları lineer, bazıları ise lineer olmayan yöntemlerdir. PID ve LQR gibi lineer yöntemlerin performansı, tasarımcının deneyimine bağlı olarak, birtakım kontrol parametrelerinin uygun seçimi ile yakından ilgilidir. Kontrol tasarımının, lineerleştirilmiş sistem modeli üzerinden gerçekleşmesi durumunda ise kararsızlık ve zayıf kontrol performansı gibi sonuçlar doğabilmektedir. Lineer olmayan kontrol tasarım yaklaşımları ise referans takibi ve kararlılık problemlerinin çözümü noktasında elverişli olsalar da gerçeklemleri zor ve karmaşık kontrol yöntemleridir.

Bu noktada, kontrol yöntemlerine dair dezavantajların giderilmesi amacıyla, çeşitli yöntemlerin hibrit anlamda birlikte kullanımlarından tutunda, kontrolcü parametrelerinin uygun biçimde seçimini ya da optimizasyonunu gerçekleştirecek yöntem ve algoritmalara varıncaya kadar pek çok çözüm üzerinde durulmuştur. (Mahmoodabadi, Taherkhorsandi, Talebipour, & Castillo-Villar, 2015; Saifizul, Zainon, Abu Osman, Azlan, & Ibrahim, 2006; Soltanpour, Khooban, & Khalghani, 2016; Zamani, Karimi-Ghartemani, Sadati, & Parniani, 2009)

Araç üzerinde konumlu TS, sistem bozucuları ve ölçüm gürültüleri karşısında duyarlı ve kırılğan yapıdadır. Bozucuların, kontrol sisteminin performansı üzerindeki etkisi bir hayli büyük olup, kontrol kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu problem karşısında, çözüm olarak müracaat edilen yöntemlerden biri de Lineer Quadratic Gaussian (LQG) olarak bilinen kontrol tasarım yöntemidir. LQG kontrol, Kalman Filtresi ile LQR kontrolün bir kombinasyonudur. Öyle ki LQR ile sistemin kararlılığı sağlanırken, bozucu etkilerinin bastırılması, Kalman filtresi olarak bilinen spesifik bir gözleyici yardımıyla sağlanmaktadır. TS sisteminin kontrolü amacıyla, LQG kontrol yaklaşımını benimseyen pek çok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Beyaz Gaussian tipte sistem bozucularına ve ölçüm gürültüsüne maruz kalan, araç üzerinde konumlu TS sistemi için, referans girişin takibi hedeflenmektedir. Bu amaçla, referans takibi sağlamak üzere, LQG servo kontrol yaklaşımı benimsenmiştir.

Referans takibi için, LQG kontrol yapısı içinde, regülatör vazifesi icra etmekte olan, standart LQR kontrolcü yerine, izleme kabiliyetine sahip ve (Lineer Quadratic İntegral) LQI olarak bilinen, LQR türevi diyebileceğimiz bir kontrolcü kullanılmıştır. İzleme kabiliyeti kazandırmak için, referans ile sistem çıkışı arasındaki hatanın integral etkisi, LQR kontrolcüyeye dahil edilerek sentezlenen LQI kontrolcü, bu anlamda modifiye edilmiş LQR olarak görülebilir. Tıpkı LQR gibi LQI kontrolcü de karesel bir performans ölçütünü minimize etmeye dayalı olarak tasarlanmaktadır.

Dolayısıyla, LQI için optimal kontrol kazancının hesabı, yine LQR için olduğu gibi, performans ölçütüne dair ağırlık matrisi parametreleri kullanılarak gerçekleştirilir.

Öte yandan, özellikle lineer olmayan sistemler için kontrolcü tasarımına dair önemli problemlerden biri de ideal kontrolcü parametrelerinin belirlenmesidir. Mümkün olan en iyi çözümü bulmayı garanti etmeseler de çoğu kez sezgiye dayalı ya da deneme yanılma esaslı yöntemler yardımıyla, bu parametrelerin belirlenmesine çalışılır. Ancak bu yöntemler, oldukça zaman alıcı ve zor süreçlerdir. Son zamanlarda lineer veya lineer olmayan sistemler için kontrolör parametrelerinin belirlenmesi problemine, optimizasyon algoritmaları üzerinden çözüm aranmaya başlanmıştır. Tek çözümlü optimizasyon algoritmalarının yanı sıra, popülasyon tabanlı meta sezgisel algoritmalar kullanılarak da genellikle her türlü problem için optimum çözüme dair, iyi bir yaklaşıma ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada araç üzerinde konumlu TS sistemi için, referans girişin takibini gerçekleştirmek amacıyla kullanılacak olan, LQG servo kontrolcünün, bünyesindeki LQI bloğuna dair ağırlık matrislerinin, çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Söz konusu ağırlık matrislerini optimize etmek amacıyla, Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (MOPSO) kullanılmıştır.

MATERYAL VE METOD

LQR Kontrolcü Tasarımı

Durum uzayı modeli Denklem 1'de verilen, Lineer zamanla değişmeyen bir sistem üzerine, LQR kontrol uygulandığı taktirde, LQR kontrolcü, kendisinden beklenen performans çıktılarını ortaya koymak için üretmesi gereken kontrol işaretini, minimum enerji sarfı ile oluşturabilme kabiliyetine sahiptir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx$$

LQR kontrolcü tasarımı, optimal bir kontrol yöntemidir. LQR kontrol tasarımında, verilen bir performans ölçütünü minimize etmek için; $u = -Kx$ biçiminde optimal bir kontrol kuralına ulaşılmak istenir. Burada performans ölçütü,

$$J = \int_0^{\infty} \{x^T Qx + u^T Ru\} dt \quad (2)$$

Denklem 2'de verilen ve sistem durumlarının transient enerjisi ile kontrol enerjisinin kombinasyonu olarak düşünülen, karesel bir maliyet fonksiyonuna karşı gelmektedir. Burada yer alan pozitif tanımlı Q ve R matrisleri, performans ölçütüne dair ağırlık matrisleri olup, ilgili sistem durumlarının ve kontrolcü çıkışlarının, önemlerine binaen, ağırlıklandırılmaları maksadıyla kullanılırlar. Bu sebeptendir ki, bu ağırlık matrisleri kontrolcü için ayar parametreleri olarak iş görürler ve uygun biçimde seçilmeleri lazım gelir. Optimal kontrol kuralında yer alan K kazancının ifadesi;

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (3)$$

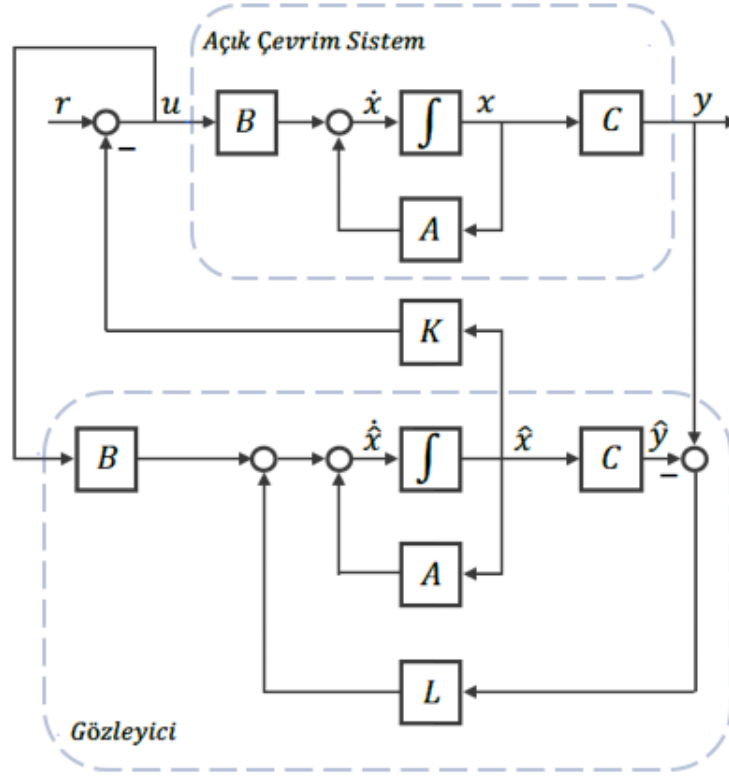
Denklem 3'teki cebirsel Riccati denkleminin çözümünü veren, pozitif tanımlı P matrisi yardımıyla,

$$K = R^{-1}B^T P \quad (4)$$

Denklem 4'te verilen şekliyle karşımıza çıkar. Bununla beraber LQR kontrolcü için, $u = -Kx$ şeklindeki optimal kontrol kuralı, yapısı icabı, tam durum geri beslemesini gerektirmektedir. Bu ise, sistem durumlarının çıkışta tamamen ölçülebilir olmasıyla mümkün olur. Ancak, pratikte çoğu zaman, durumların bir kısmı ya da tamamı, çeşitli sebeplerden ötürü ölçülebilir olmaktan uzaktır. İşte bu noktada, ulaşılabilir ya da ölçülebilir olmayan durumların, tahmin edilebilirliği ya da gözlenebilirliği söz konusu olmaktadır. Sistem durumları, gözlenebilir, bir başka ifadeyle de tahmin edilebilir olduğu taktirde, durum geri beslemeli LQR kontrolcünün tasarımı, gözlenen durumlar üzerinden gerçekleştirilebilir.

Durum Gözleyiciler

Gözleyici tasarımı için, lineer bir sistemin, durum uzayı dinamik modeli hem sistemin gerçek durumu için hem de tahmin edilmek istenen durumu için tekraren oluşturulur. Bu iki matematik modelden ilki, sistemin gerçek modelini verirken, ikincisi ise gözleyici modeli olarak görülebilir. Denklemlerde yer alan \hat{x} tahmin edilen ya da gözlenen durumu ifade ederken, \hat{y} ise tahmin edilen ya da gözlenen çıkışı belirtmektedir.



Şekil 1. Durum Gözleyici Tabanlı, Durum Geri Beslemeli Kontrolcünün Blok Diyagramı.

Şekil 1'den de görüleceği üzere, gerçek model ile gözleyicinin ürettiği çıkışlar arasındaki fark, yani tahmin hatası, L geri besleme kazancı üzerinden gözleyiciye aktarılmaktadır. Bu sayede hatanın sıfırlanmasına çalışılmakta ve gözlenen durumun gerçek duruma yakınsaması hedeflenmektedir. Şekle bakıldığında, sistemin durum uzayı modeli ile gözleyicinin durum uzayı modelinin,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5)$$

$$y = Cx$$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (6)$$

$$\hat{y} = C\hat{x}$$

(4) ve (5) no'lu denklemlerdeki gibi olacağı görülmektedir. Denklem 6'da göze çarpan, $L(y - \hat{y})$ terimi, durum tahmin hatasını, L gözleyici kazancı üzerinden geri beslemek suretiyle, hata için gerekli düzeltmeyi gerçekleştirmektedir.

Denklem 6'daki gözleyici durum denklemlerini birleştirerek yeniden ifade edecek olursak, gözleyicinin durum uzayı modeli için,

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad (7)$$

Denklem 7'deki sonuca ulaşılır. Dikkat edilirse, gözleyicinin girişlerinin, u ve y , çıkışının ise \hat{x} olduğu görülür. Dolayısıyla gözleyici, sistem durumlarını, ölçülebilir çıkışlar ve girişe dair bilgiyi kullanarak tahmin etmektedir. Gözleyiciler sayesinde sistemlerin tahmin edilen yani gözlenen durumları vasıtasıyla optimal durum geri beslemeli kontrolcünün tasarımı mümkün olsa da pratikte durum her zaman bu kadar kolay olmayabilir. Gözleyicinin tasarımı için kullanılan ölçülebilir durumlar yani çıkışlar üzerinde, ölçüm gürültüsü bulunabilir. Bunun yanı sıra modellenemeyen sistem dinamikleri ve parametrik belirsizliklerin sebep olduğu, sistem bozucularından da bahsedebiliriz. Bu tarz bozucuları, proses gürültüsü olarak adlandırmak da mümkündür. Böylesi gürültülerin mevcudiyeti halinde, kontrolcü tasarımının ihtiyaç duyduğu, durum tahmin problemi, Kalman Filtresi olarak bilinen gözleyici yardımıyla çözülür.

Kalman Filtresi

Proses ve ölçüm gürültüsü barındıran ve bu sebeple, stokastik hale gelerek, deterministik olmaktan çıkan sistemin, durum uzayı modeli,

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw_d \quad (8)$$

$$y = Cx + Hw_d + w_n$$

denklemleriyle ifade edilebilir. Burada w_d , proses gürültüsü oluşturan bozucu girdilere, w_n ise çıkışlardaki ölçüm gürültüsüne tekabül etmektedir. Proses ve ölçüm gürültüleri hakkında, birbirleriyle korelasyon içinde olmadıkları ve sıfır ortalamaya sahip, Gaussian Beyaz gürültü tarzında oldukları varsayımı yapılabilir. Bu tarz gürültüye maruz lineer stokastik sistemlerin optimal kontrolü söz konusu olduğu vakit, standart bir durum gözleyicisi tasarlamak mümkün olmamaktadır.

Kalman filtresi, bazı ön kabuller altında, gerçek durum ile tahmin edilen durum arasındaki, hatanın kovaryansını, öngörü ve düzeltme olmak üzere, iki basamaklı bir algoritma üzerinden, minimize etmek suretiyle işleyen, optimal bir gözleyicidir. (Welch & Bishop, 2006)

Kalman Filtresi için, gözleyici hatasının kovaryans ifadesi, denklemde verildiği gibidir.

$$P = E[(x - \hat{x})^T (x - \hat{x})] \quad (9)$$

w_d , proses gürültüsü ve w_n , ölçüm gürültülerine sahip sistem için, Kalman Filtresinin ürettiği, tahmin edilen duruma ilişkin, durum uzayı ifadesi Denklem 10'daki gibi olacaktır.

$$\dot{\hat{x}} = (A - L_K C)\hat{x} + Bu + L_K y \quad (10)$$

w_d ve w_n gürültü kovaryans matrisleri, sırasıyla Q_N ve R_N olmak kaydıyla, Optimal Kalman gözleyici kazancı L_K ,

$$AP + PA^T - PC^T R_N^{-1} CP + GQ_N G^T = 0 \quad (11)$$

Denklem 11'de verilen ve cebirsel Riccati denkleminin çözümü olan, P matrisi kullanılarak,

$$L_K = PC^T R_N^{-1} \quad (12)$$

Denklem 12'deki gibi elde edilmektedir.

LQG Servo Kontrolcü Tasarımı

Proses ve ölçüm gürültüsü olarak, Gaussian Beyaz Gürültü içeren, Lineer stokastik sistemlerin, Kalman filtresi kullanılmak suretiyle gerçekleştirilen, gözleyici tabanlı ve durum geri beslemeli optimal kontrolü, (Linear Quadratic Gaussian) LQG kontrol olarak adlandırılmaktadır. Kısaca ifade etmek gerekirse, LQG kontrol, Kalman Filtresi ile LQR kontrolün bir kombinasyonudur denilebilir. Üstelik, LQG kontrol yaklaşımında, Kalman filtresi ve LQR kontrolcü birbirlerinden bağımsız olarak tasarlanabilmektedirler. (Morimoto, 1990)

Denklem 8’de verilen, lineer stokastik sistem için, Denklem 10’da sunulan, Kalman Filtresi durum uzayı modeli ve LQR kontrolcüye dair, $u = -Kx$ biçimindeki optimal kontrol kuralı beraber ele alınıp, söz konusu ifadeler birleştirilecek olursa, çıkış geri beslemeli optimal LQG kontrolcü yapısına ulaşılmış olur. Bu şekilde hesaplanan kontrolcünün dinamiği Denklem 13’de verildiği gibi olacaktır.

$$\dot{\hat{x}} = (A - L_K C - BK)\hat{x} + L_K y \quad (13)$$

$$u = -K\hat{x}$$

Ancak burada LQR kontrol, isminden de anlaşılacağı üzere, regülatör yapıda olup, geri besleme yoluyla bozucu girişlere maruz kalan, kapalı çevrim sistem çıkışının, zaman sonsuza giderken, bir başlangıç durumundan hareketle, sifıra yakınsamasını hedeflemektedir. Bir diğer önemli geri besleme problemi ise kapalı çevrim sistem çıkışının, önceden belirlenmiş olan bir referansı izlemesidir ki, bu servo problemi olarak bilinmektedir. Referans takibi arzulanır ise yapılması gereken, standart LQR kontrolcü tasarımına, integral etkisinin dahil edilmesi olacaktır. Bu şekilde oluşturulan kontrol yaklaşımı, (Lineer Quadratic İntegral) kontrolcü LQI, olarak adlandırılmaktadır. LQI kontrolcü tasarımında da tıpkı LQR da olduğu gibi, tam durum geri beslemesi mevcut olup, bunun yanı sıra kontrolcüye referans takip kabiliyeti kazandıracak olan ve integratör üzerinden gerçekleştirilen, çıkış geri beslemesi söz konusudur.

Bu sayede kapalı çevrim sistem çıkışının, referans sinyal ile arasındaki fark, yani hata değeri integratörden geçirilmek suretiyle, hatanın integrali elde edilir. Tıpkı sistemin durumları gibi, integre edilmiş hata da K kazanç bloğu üzerinden optimal kontrol işaretinin üretilmesi amacıyla kullanılır. Oluşan yeni optimal kontrol kuralı;

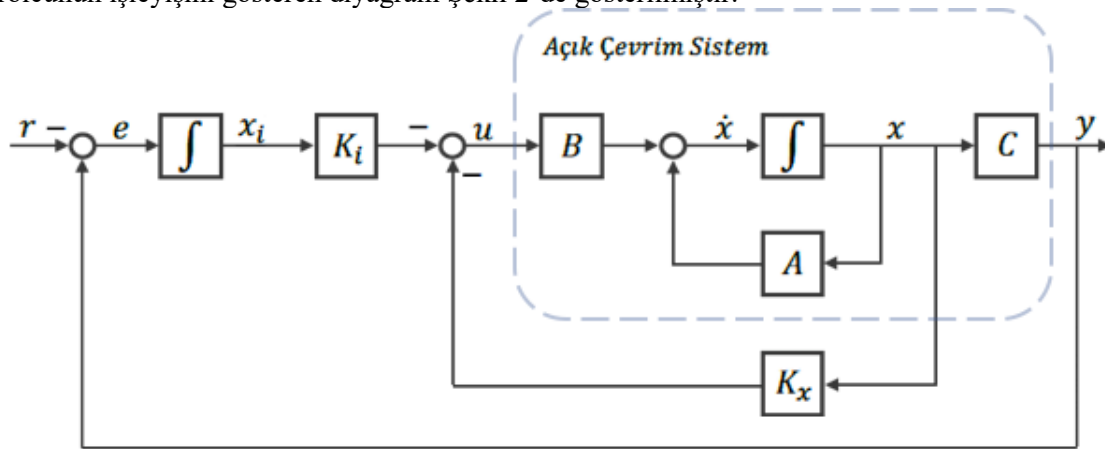
$$u = -Kz = [-K_x - K_i] \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

şeklinde olup, burada x_i integratörün çıkışını, yani hatanın integralini göstermektedir. Dolayısıyla K kazancı için, sistem durumlarının çarpanı olan kısım, K_x ile gösterilirken, integral hatanın çarpanı olan kısım, K_i ile temsil edilmektedir. Burada genişletilmiş durum vektörü $z = \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix}$, kullanılarak oluşturulan geri besleme kuralı, $u = -Kz$;

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + u^T R u) dt \quad (15)$$

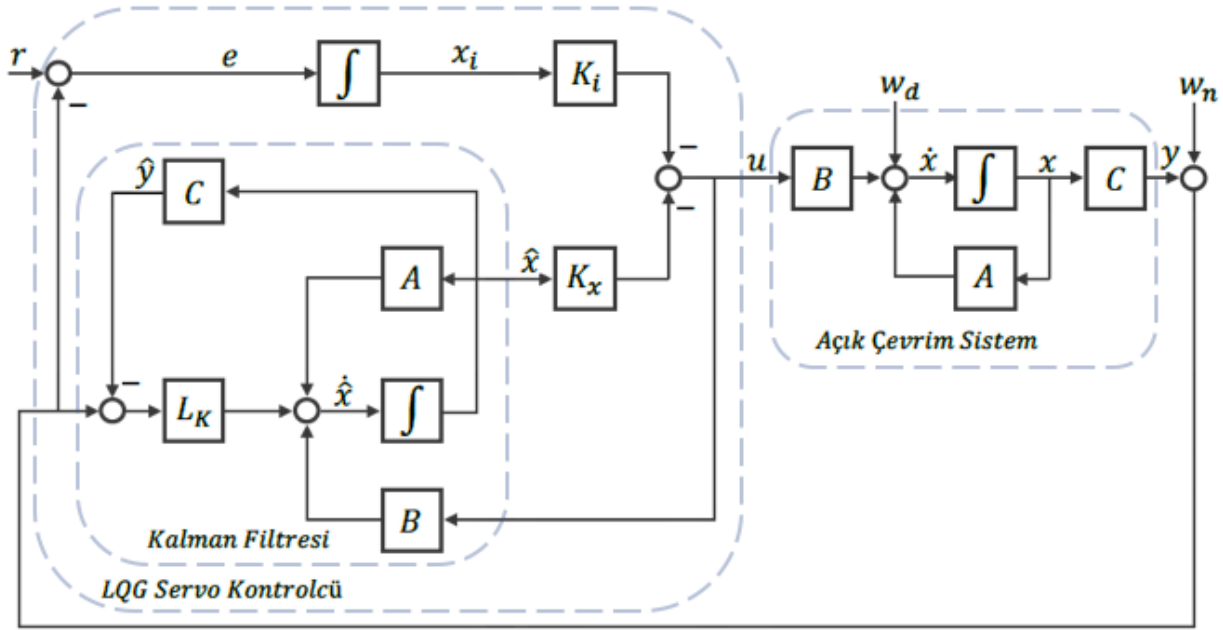
Denklem 15’deki maliyet fonksiyonuna tekabül eden performans ölçütünü minimize etmektedir.

LQI kontrolcünün işleyişini gösteren diyagram Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. LQI Kontrolcünün Blok Diyagramı.

Şekil 3’de verilen diyagramda görülen ve Kalman filtresi tabanlı gözleyici ile LQI kontrolcünün birlikteliği sonucu oluşan kontrol yaklaşımı, LQG Servo kontrolcü olarak bilinir. LQG Servo kontrolcü için durum uzayı modeli Denklem 16’da verilmiştir.



Şekil 3. LQG Servo Kontrolcü Blok Diyagramı.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_x - L_K C & -BK_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ x_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L_K \\ I & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix}$$

(16)

$$u = [-K_x - K_i] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ x_i \end{bmatrix}$$

Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (MOPSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasının çok amaçlı versiyonu, birden çok amaç arasında varılan uzlaşmayı temsil eden, bir dizi baskın olmayan çözümü aramak için kullanılır. PSO algoritmasının dikkate aldığı, parçacık popülasyonunda bulunan her bir parçacık, kendine ait bir konum ve hıza sahip olmak üzere, çok boyutlu bir arama uzayında dolaşmaktadır. Algoritma çalışırken, sürü içindeki parçacıklar, kendilerinin şimdiye kadar buldukları en iyi çözüm (Pbest) ile tüm sürü üyeleri tarafından şimdiye kadar bulunmuş olan en iyi çözüm (Gbest) bilgilerini kullanırlar. Ancak Gbest'i, çok amaçlı optimizasyon anlamında tanımlama imkânı yoktur.

Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu algoritması (MOPSO), havuz adı verilen ve baskın olmayan çözümleri içeren harici bir veri deposunu kullanır. Parçacıklar için lider seçimi bu havuz içinden gerçekleşir. ($k = 1, 2, \dots, N_{pop}$) olmak üzere, k . parçacığın konumu, problemin mümkün çözümlerinden birine karşı gelir. ($t = 1, 2, \dots, Max_{it}$) olmak üzere, MOPSO algoritması $t + 1$ 'inci iterasyona ulaştığında, Denklem 17'de gösterildiği gibi, mevcut konumuna hızı eklenerek, k . parçacığın konumu güncellenir.

$$x_k(t + 1) = x_k(t) + v_k(t + 1)$$

(17)

Parçacığın hızı ise Denklem 18'deki gibi güncellenmektedir.

$$v_k(t + 1) = w * v_k(t) + b_1 * r_1 * (x_k^{bl} - x_k(t)) + b_2 * r_2 * (HVZ(h) - x_k(t))$$

(18)

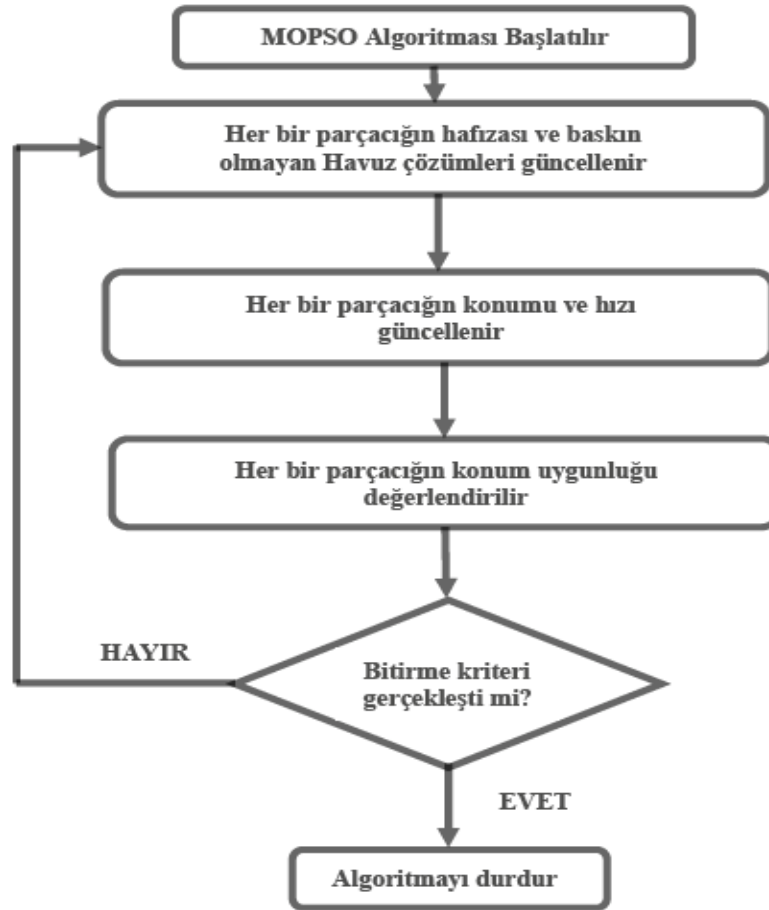
Burada, w eylemsizlik ağırlığını, b_1 ve b_2 ise sırasıyla, bilişsel ve sosyal öğrenme faktörlerini göstermekte olup, r_1 ve r_2 değerleri $[0,1]$ aralığından seçilen rastgele sayılara tekabül etmektedir. x_k^{bl} k . parçacığın en iyi konumudur ve $HVZ(h)$, havuzdan alınan, baskın olmayan bir çözümü ifade eder. Harici havuzun temel amacı, arama süreci boyunca bulunan, baskın olmayan vektörlerin geçmiş kaydını tutmaktır. Pareto cephelerinin dağılımı h 'nin seçimine

bağlıdır. Bir parçacık için, konum ve hızına dair güncelleme işlemi bittiğinde, parçacığın en iyi konumu da güncellenmiş olmalıdır. (Abdollahzadeh, Atashgar, & Abbasi, 2016)

“>” gösterimi baskınlığı ifade etmek kaydıyla, güncelleme Denklem 19’daki gibi gerçekleşir;

$$x_k^{bl}(t+1) = \begin{cases} x_k^{bl}(t) & x_k^{bl}(t) > x_k(t+1) \\ x_k(t+1) & x_k(t+1) > x_k^{bl}(t) \\ x_k^{bl}(t) \text{ veya } x_k(t+1) \text{ rastgele seçilir} & \text{Aksi taktirde} \end{cases} \quad (19)$$

Sözlerle ifade etmek gerekirse, mevcut en iyi konum, güncellenmiş konuma baskın ise güncel en iyi konum, mevcut en iyi konuma eşit olur. Güncellenmiş konum, mevcut en iyi konuma baskın ise güncel en iyi konum, güncel konuma eşit olacaktır. Aksi taktirde, güncel en iyi konum, mevcut en iyi konum ile güncel konum arasından rastgele seçilir. Şekil 4 MOPSO algoritmasının yapısını göstermektedir.

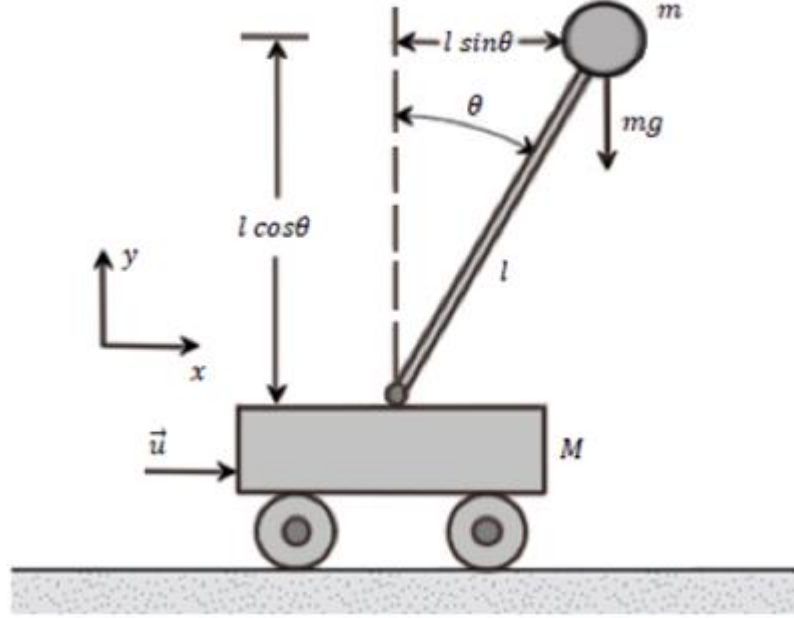


Şekil 4. MOPSO Algoritması İçin Akış Diyagramı.

Şekil 4’te gösterildiği gibi, Rastgele seçilen çözüm adayı parçacıklardan oluşan, bir başlangıç popülasyonu ile algoritma başlatılır. İkinci aşamada, bir parçacık tarafından şimdiye kadar bulunan en iyi çözüm ve baskın olmayan çözümlerin havuzu güncellenir. Her parçacığın hızı ve konumu, üçüncü aşamada (16) ve (17) no’lu Denklemlere göre güncellenir. Dördüncü aşamada, her bir parçacığın konum uygunluğu değerlendirilir. Son aşamada ise iterasyon sayısı, algoritmanın durdurma kriteri olarak kullanılır. Sürecin devam etmesine izin verilmesi durumunda ikinci aşamaya geçilir.

Araç Üzerinde Konumlu Ters Sarkaç Modeli

İki serbestlik derecesine sahip, araç üzerinde konumlu TS sistemi yatayda x eksenini boyunca hareket edebilmektedir. Sarkacın bir ucu araç üzerindeki hareketli eklem noktasına bağlı iken diğer ucu $x - y$ düzleminde serbestçe hareket edebilmektedir. TS sistemi kararsız olup, uygulanan kontrole bağlı olarak, aracın yatayda hareket ettirilmesi sonucu oluşan, sürekli dengeleme kuvveti F yardımıyla, sisteminin kararsız denge konumunda tutulması amaçlanır.



Şekil 5. Araç Üzerinde Konumlu Ters Sarkacın Parametrik Gösterimi.

Şekil 5'te parametrik gösterimi verilen, TS sisteminin, Lagrange denklemleri yardımıyla türetilen ve lineer olmayan dinamik denklemleri, Taylor Serisi açılımıyla, sarkacın dik durduğu kararsız denge noktası civarında, lineerleştirilmiştir. Sonrasında, bulunan lineer denklemler kullanılarak, sistemin Durum Uzayı matematik modeli Denklem 20'deki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -b/M & mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & b/Ml & -g(m+M)/Ml & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \\ \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ -1/Ml \end{bmatrix} \cdot u \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \\ \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u$$

Denklem 20'de yer alan parametrelerin, karşı geldiği fiziksel nicelikler ve değerleri Tablo 1'de belirtildiği gibidir.

Tablo 1. TS Sisteminin Parametreleri ve Bunlara Karşılık Gelen Değerler.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Aracın kütlesi	M	5	kg
Sarkacın kütlesi	m	1	kg
Çubuğun boyu	l	2	m
Araç ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı	b	1	Ns/m
Yerçekimi ivmesi	g	-10	m/s^2
Araca uygulanan kuvvet	u	-	N
Aracın konumu	x	-	m
Aracın hızı	v	-	m/s
Sarkacın açısı	θ	-	rad
Sarkacın açısal hızı	ω	-	rad/s

Araç Üzerinde Konumlu Ters Sarkaca Uygulanan, LQG Servo Kontrolcü Ağırlık Matrislerinin, MOPSO ile Optimize Edilmesi

Durum uzayı Matematik modeli Denklem 20’de sunulan, araç üzerinde konumlu TS sistemi, Beyaz Gaussian Gürültü formunda sistem bozucularına ve ölçüm gürültüsüne maruz bırakılarak, sistemin basamak referansı takibi arzulanmaktadır. Referans takibi sağlamak ve denge noktası civarında kararlılığı sürdürmek adına, LQG servo kontrolcü tasarlanmıştır.

Bozucu ve sensör gürültüsü olarak, önce -60 dB ardından -75 dB gücünde Gaussian Beyaz Gürültü uygulanan TS sisteminin, LQG servo kontrolcü altında, simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Kontrolcü içerisinde, referans takibi amacıyla kullanılan, LQI bloğu için optimal kontrol kazancı, Denklem 15’teki performans ölçütüne dair, Q ve R ağırlık matrisi parametreleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu ağırlık matrisleri kontrolcünün ayar parametreleridir ve arzulan kontrol gereksinimlerini elde edebilmek için optimize edilmeleri gerekir. Kontrol gereksinimleri, amaç fonksiyonları ile belirlenmiştir.

Q ve R ağırlık parametrelerinin optimizasyonu, söz konusu amaç fonksiyonlarını minimize edecek şekilde, çok amaçlı bir algoritma olan MOPSO kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen iki ayrı amaç fonksiyonu;

$$f_1(Q, R) = \int_0^{\infty} e^T e dt$$

$$f_2(Q, R) = \frac{1}{c + \max\{\text{abs}(\text{real}[\text{eig}(A - BK)])\}}$$
(21)

Denklem 21’deki gibi seçilmiştir.

LQI, ağırlık matrisleri Q ve R aşağıdaki gibi köşegen formdadırlar.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{nn} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{mm} \end{bmatrix}$$

Matrislerin köşegen elemanlarını birleştirerek elde etmiş olduğumuz $n + m$ bileşenli ve $deg = [q_{11}, q_{22}, \dots, q_{nn}, r_{11}, r_{22}, \dots, r_{mm}]$ şeklinde tanımlı vektör, amaç fonksiyonlarının değişkeni olarak alınır. Amaç

fonksiyonlarının Denklem 22'deki gösterimleri üzerinden, çok amaçlı optimizasyon probleminin yapısı Denklem 23'teki gibi olur.

$$f_1(deg) = \int_0^{\infty} e^T e dt, f_2(deg) = \frac{1}{c + \max(\text{abs}(\text{real}(A-BK)))}, f(deg) = (f_1(deg), f_2(deg)) \quad (22)$$

$$\min f(deg)$$

$$\text{kısıt: } deg_i > 0 \quad 0 < i \leq n + m$$

(23)

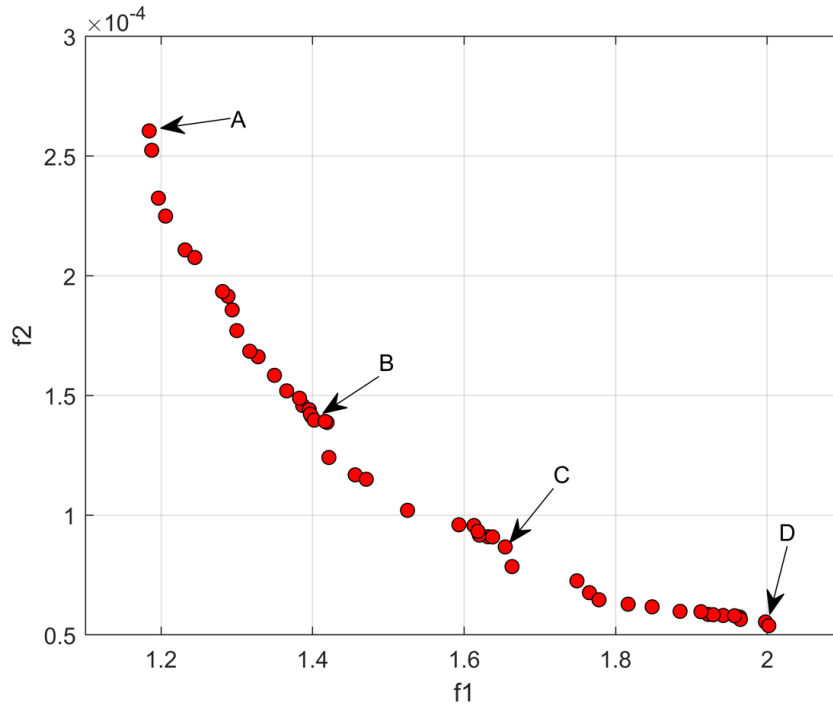
" deg_i ", " deg " vektörünün i . bileşenidir.

Q ve R matrislerinin optimizasyonunda kullanılan, MOPSO algoritmasına dair seçilmiş ayarlar Tablo 2'de verilmiştir.

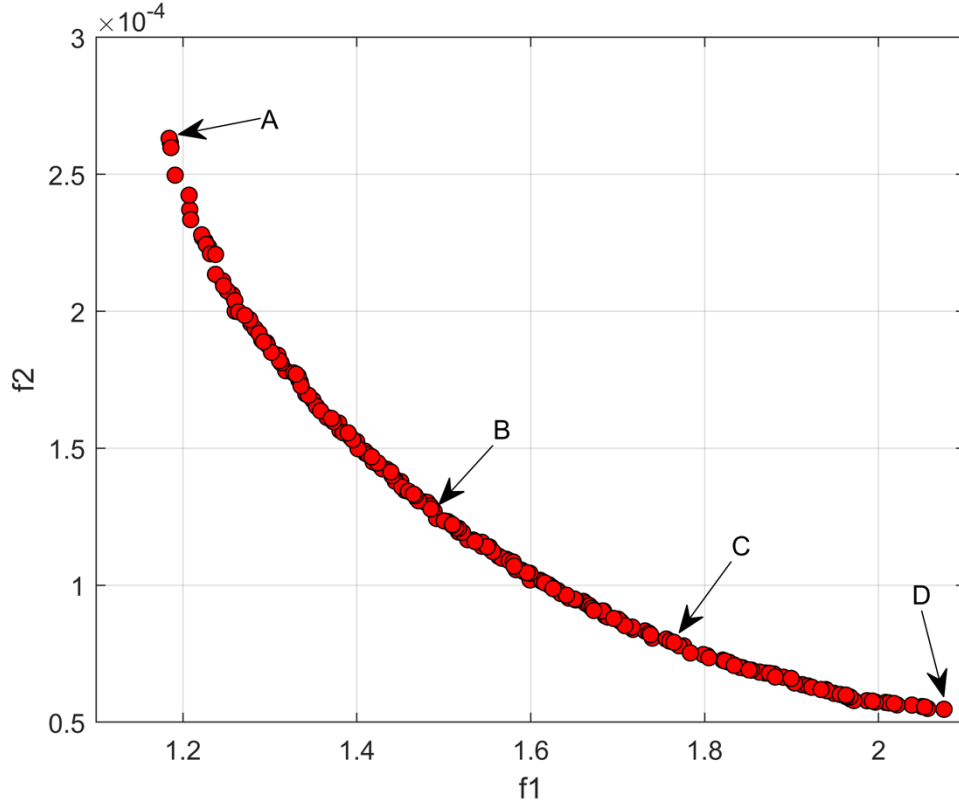
Tablo 2. MOPSO Algoritmasının Seçilen Parametre Değerleri.

MOPSO parametreleri	Değeri
Popülasyondaki parçacık sayısı	200
Havuzdaki parçacık sayısı	200
Eylemsizlik Ağırlığı	0.4
Maksimum nesil sayısı	20
Bilişsel Öğrenme Faktörü	2
Sosyal Öğrenme Faktörü	2

Bozucu ve sensör gürültüsü olarak, sisteme önce -60 dB sonra ise -75 dB gücünde Gaussian Beyaz Gürültüler uygulanmıştır. Her iki duruma dair, MOPSO yardımıyla optimize edilmiş olan Q ve R ağırlık matrisleri için, f_1 , f_2 amaç fonksiyonlarının Pareto-Front grafikleri Şekil 6 ve Şekil 7'de verildiği gibi olmaktadır.

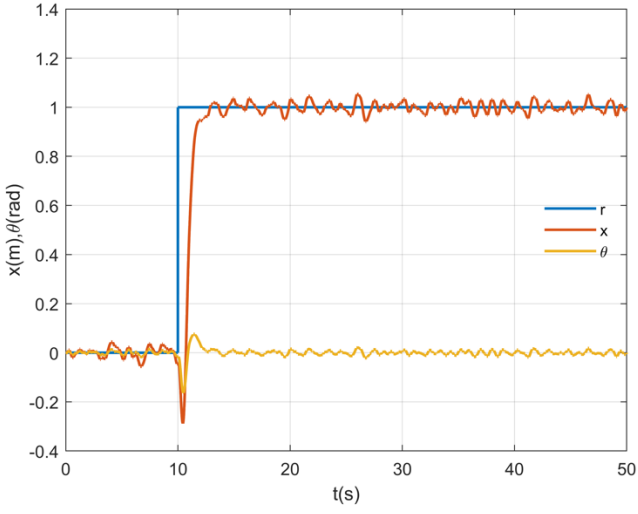


Şekil 6. TS İçin Bozucu ve Sensor Gürültüsü Güç Değeri -60 dB İken Amaç Fonksiyonlarının Pareto Front Grafiği.

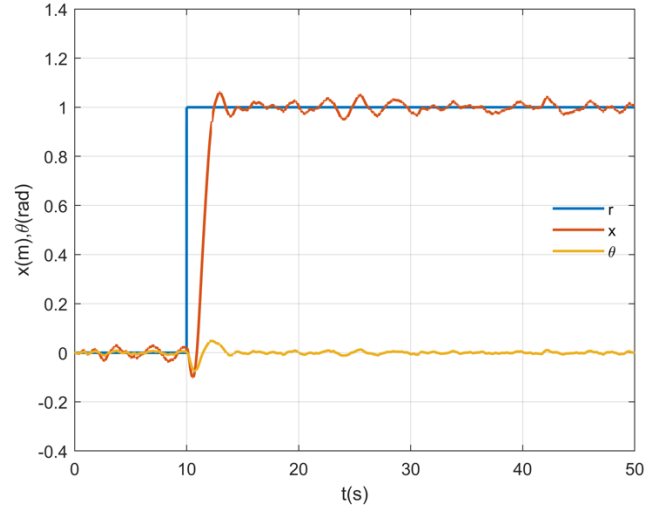


Şekil 7. TS İçin Bozucu ve Sensor Gürültüsü Güç Değeri -75 dB İken Amaç Fonksiyonlarının Pareto Front Grafiği.

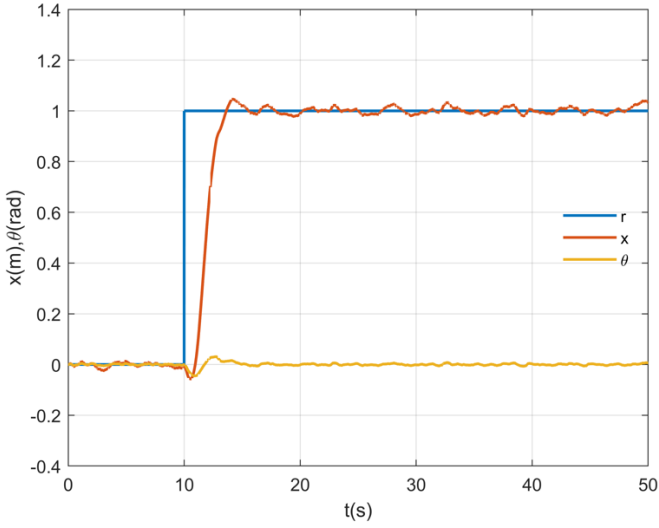
Sırasıyla, -60 ve -75 dB gücündeki, iki farklı gürültü için elde edilmiş olan, her bir Pareto Front grafiği üzerinde, **A, B, C, D** gibi 4 farklı nokta belirlenmiştir. Seçilen bu noktalar, 4 farklı **Q** ve **R** ağırlık matrisi çiftini göstermektedir. Her ağırlık matrisi çiftine, farklı bir **LQG** servo kontrolcü tekabül eder ve bunların sergilediği performanslar Şekil 8 ve Şekil 9’da ayrı ayrı sunulmuştur. Seçilen her bir **LQG** servo kontrolcü, sarkacı taşıyan aracın, $t=10$ s anında uygulanan birim basamak referansı izlemesini sağlamaktadır. Kontrolcü bunu gerçekleştirirken aynı zamanda, sarkacın kararsız olan dik denge konumunu da korumaya çalışmaktadır.



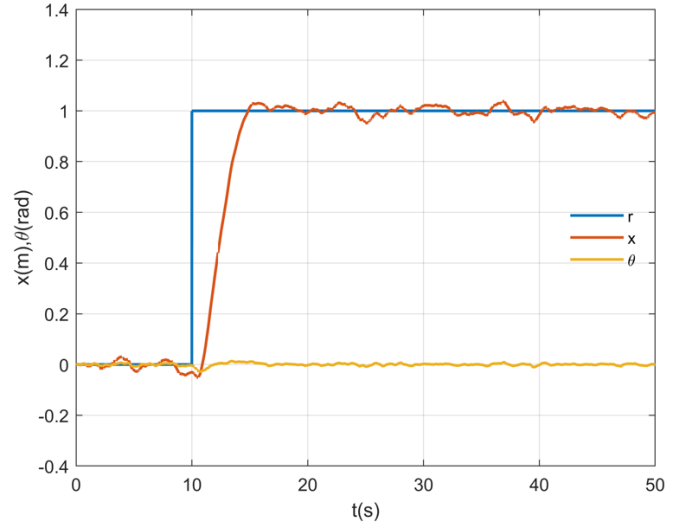
A



B



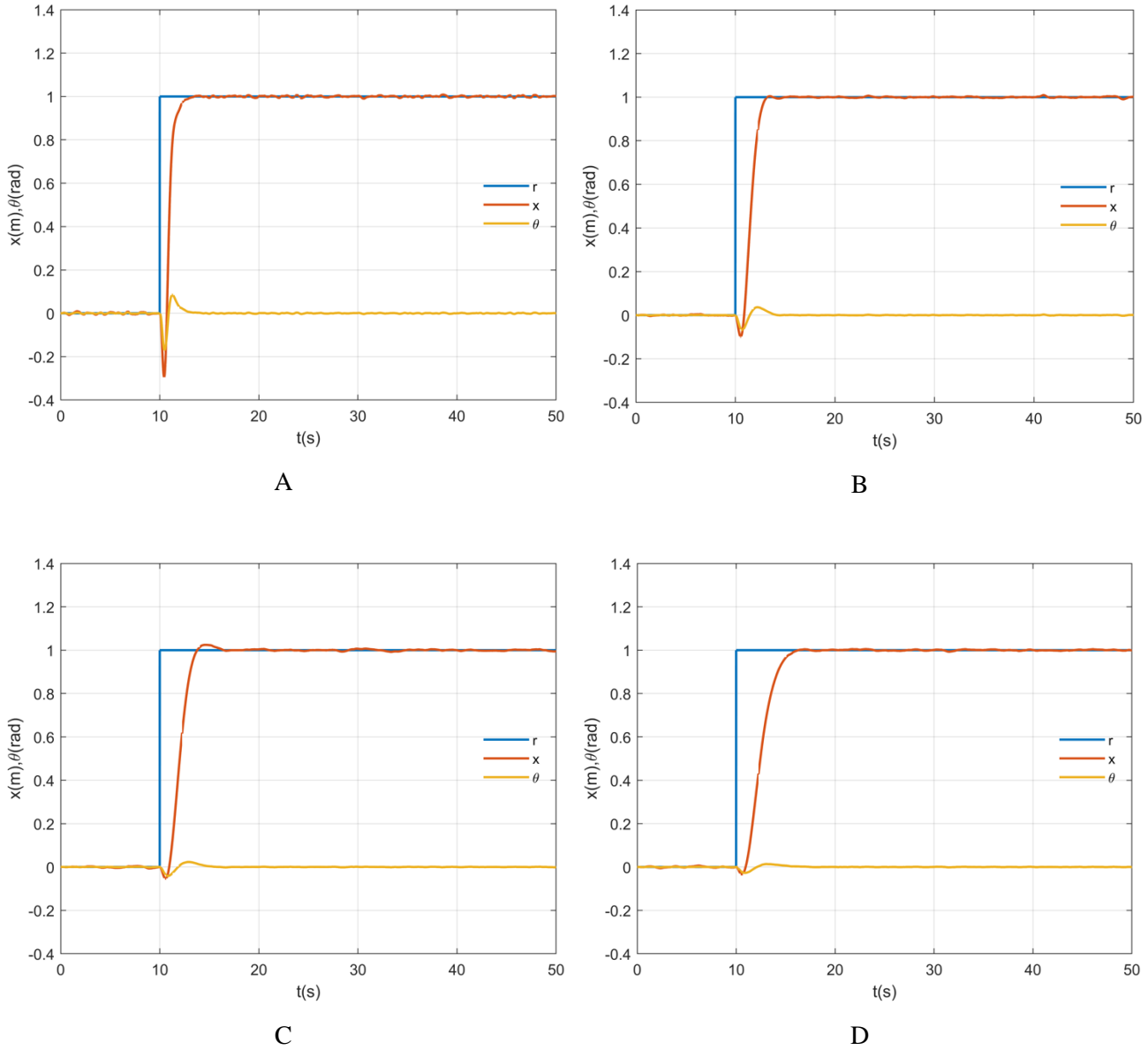
C



D

Şekil 8. TS İçin Bozucu ve Sensor Gürültüsü Güç Değeri -60 dB İken, Şekil 6'da Gösterilen A, B, C, D Pareto

Optimal Noktalarına Dair LQG Servo Kontrolcü Performansları.



Şekil 9. TS İçin Bozucu ve Sensor Gürültüsü Güç Değeri -75 dB İken, Şekil 7’de Gösterilen A, B, C, D Pareto

Optimal Noktalarına Dair LQG Servo Kontrolcü Performansları.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

TS sistemi üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları, bozucu ve sensör gürültüsü anlamında sisteme, önce -60 dB ve sonra -75 dB gücünde, iki farklı Gaussian Beyaz gürültünün girdiği kabul edilerek ayrı ayrı iki kez gerçekleştirilmişlerdir. Bu iki simülasyon sonunda oluşan, Şekil 6 ve Şekil 7’deki Pareto-Front grafikleri üzerinde, A noktasından D noktasına doğru gidildikçe f_1 amaç fonksiyonunun değerinin artmakta olduğu görülür. Bu durum konum hatası için, enerjinin büyümekte olduğu anlamını taşır. Seçilen A, B, C ve D noktalarına karşı gelen, ağırlık matrisi çiftlerinin, her biri için tasarlanmış olan, 4 farklı **LQG** servo kontrolcünün, TS üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları bunu doğrular şekildedir. Grafiklere bakıldığında, A’dan D’ye doğru, referans takibi anlamında, kararlı duruma ulaşma zamanının gitgide uzadığını, sistemin referansı yakalamasının daha uzun sürdüğünü görmekteyiz. f_2 amaç fonksiyonunun değeri ise A noktasından D noktasına doğru gidildikçe azalmakta, yani sol yarı "s" düzleminde yer alan kapalı çevrim sistem kutupları, imajiner eksenden uzaklaşmaktadır. Bu durumda, grafiklerden de görüldüğü gibi, özellikle sarkacın dik denge konumu etrafındaki salınımları için sönüm etkisinin arttığı izlenmektedir. Vurgulanması gereken nokta, **LQG** servo kontrolcü tasarımının, Pareto-Front grafiği

üzerindeki, hangi nokta baz alınarak yapılacağıdır. Bu konuda seçim yapılırken, hangi kontrol gereksinimlerinin, ne ölçüde önem arz ettiği belirlenir. Buradan hareketle beklentilerin dengeli bir kombinasyonu tercih edilmeye çalışılır.

KAYNAKLAR

- Abdollahzadeh, H., Atashgar, K., & Abbasi, M. (2016). Multi-objective opportunistic maintenance optimization of a wind farm considering limited number of maintenance groups. *Renewable Energy*, 88(April), 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.022>
- Ashok Kumar, M., & Kanthalakshmi, S. (2018, August 1). H ∞ tracking control for an inverted pendulum. *JVC/Journal of Vibration and Control*. SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/1077546317750977>
- Bălan, R., Mătieș, V., & Stan, S. (2005). A solution of the inverse pendulum on a cart problem using predictive control. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Vol. I, pp. 63–68)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2005.1528889>
- Chawla, I., Chopra, V., & Singla, A. (2019). Robust LQR Based ANFIS Control of x-z Inverted Pendulum. *Proceedings - 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence, AICAI 2019*, 818–823. <https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701333>
- Irfan, S., Mehmood, A., Razzaq, M. T., & Iqbal, J. (2018). Advanced sliding mode control techniques for Inverted Pendulum: Modelling and simulation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(4), 753–759. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.010>
- Li, W., Ding, H., & Cheng, K. (2012). An investigation on the design and performance assessment of double-PID and LQR controllers for the inverted pendulum. In *Proceedings of the 2012 UKACC International Conference on Control, CONTROL 2012 (pp. 190–196)*. <https://doi.org/10.1109/CONTROL.2012.6334628>
- Mahmoodabadi, mj, Taherkhorsandi, m., Talebipour, m., & Castillo-Villar, kk. (2015). Adaptive robust PID control subject to supervisory decoupled sliding mode control based upon genetic algorithm optimization. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 37(4), 505–514. <https://doi.org/10.1177/0142331214543295>
- Mishra, S. K., & Chandra, D. (2014). Stabilization and Tracking Control of Inverted Pendulum Using Fractional Order PID Controllers. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/752918>
- Morimoto, H. (1990). Adaptive LQG Regulator via the Separation Principle. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(1), 85–88. <https://doi.org/10.1109/9.45150>
- Roose, A. I., Yahya, S., & Al-Rizzo, H. (2017). Fuzzy-logic control of an inverted pendulum on a cart. *Computers and Electrical Engineering*, 61, 31–47. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.05.016>
- Saifizul, A. A., Zainon, Z., Abu Osman, N. ., Azlan, C. A., & Ibrahim, U. F. . U. (2006). Intelligent Control for Self-erecting Inverted Pendulum Via Adaptive Neuro-fuzzy Inference System. *American Journal of Applied Sciences*, 3(4), 1795–1802. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2006.1795.1802>
- Singh, K., Nema, S., & Padhy, P. K. (2014). Modified PSO based PID sliding mode control for inverted pendulum. In *2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies, ICCICCT 2014 (pp. 722–727)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICCICCT.2014.6993054>
- Soltanpour, M. R., Khooban, M. H., & Khalghani, M. R. (2016). An optimal and intelligent control strategy for a class of nonlinear systems: Adaptive fuzzy sliding mode. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 22(1), 159–175. <https://doi.org/10.1177/1077546314526920>
- Suzuki, Y., Nomura, T., Casadio, M., & Morasso, P. (2012). Intermittent control with ankle, hip, and mixed strategies during quiet standing: A theoretical proposal based on a double inverted pendulum model. *Journal of Theoretical Biology*, 310, 55–79. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.06.019>
- Vinodh Kumar, E., & Jerome, J. (2013). Robust LQR controller design for stabilizing and trajectory tracking of inverted pendulum. In *Procedia Engineering (Vol. 64, pp. 169–178)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.088>
- Welch, G., & Bishop, G. (2006). An Introduction to the Kalman Filter. In *Practice*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1.1.117.6808>

Yu, L. H., & Jian, F. (2014). An inverted pendulum fuzzy controller design and simulation. In Proceedings - 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control, IS3C 2014 (pp. 557–559). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/IS3C.2014.151>

Zamani, M., Karimi-Ghartemani, M., Sadati, N., & Parniani, M. (2009). Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. *Control Engineering Practice*, 17(12), 1380–1387. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.07.005>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.06.2022
Kabul Tarihi : 21.07.2022

Received Date : 29.06.2022
Accepted Date : 21.07.2022

KENDİ KENDİNİ KONFIGÜRE EDEBİLEN ROBOTİK BİR SİSTEM İÇİN MİKRO ÖLÇEKTE ELEKTROMANYETİK DIŞ EYLEYİCİ TABANLI HAREKET MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPING EXTERNAL MAGNETICALLY ACTUATION MODEL IN MICRO SCALE FOR A SELF-RECONFIGURABLE ROBOTIC SYSTEM

Halil İbrahim DOKUYUCU ¹ (ORCID: 0000-0001-6991-1708)
Nurhan GÜRSEL ÖZMEN^{1*} (ORCID: 0000-0002-7016-5201)

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nurhan GÜRSEL ÖZMEN, gnurhan@ktu.edu.tr

ÖZET

Kendi kendini konfigüre eden modüler robotlar (KKMR), yeni görevleri yerine getirmek, yeni çevresel koşullara uyum sağlamak ve olabilecek hasarlardan etkilenmemek amacıyla modüllerin uzamsal organizasyonunu değiştirebilen otonom kinematik makineler olarak tanımlanabilir. KKMR sistemlerinin en önemli amaçlarından biri milyon seviyesinde modülün bir arada çalışabildiği sistemlerin geliştirilmesidir. KKMR sistemlerinin minyatürleştirilmesi aşamasında yerleştirme ve taşıma zorlukları ortaya çıkar. Son yıllarda mikro üretim alanında elde edilen kazanımların yardımıyla, dışsal eyleyicilerin hareket sağladığı mikro robotlar, KKMR sistemlerinin minyatürleştirilmesine iyi bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmada mikro robotlar için dışsal manyetik eyleyiciler tarafından hareket sağlanan yeni bir kendi kendini konfigüre etme mekanizması geliştirilmiştir. Çalışmada manyetik alan etkisinde mikro tüpler içerisindeki mıknatısların hareketi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Mekanizmanın dinamik modeli, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve benzetim çalışmaları ile uygulanabilirliği ortaya konulmuş, teorik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışmanın biyomedikal uygulamalarda, medikal robotlarda, endüstride, savunma sanayinde ve uzay araştırmalarındaki mikro robotik sistemler için katkıları olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mikrorobotik, kendi kendini konfigüre edebilen robot (KKMR), manyetik eyleyici, modüler hareket, sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

Self-reconfigurable modular robots (SRMRs) are considered as autonomous kinematic machines that can change their own shape by rearranging the connectivity of their parts to perform new tasks, adapt to new circumstances or recover from damage. One of the main goals in SRMRs field is to reach to a million modules integrated self-reconfigurable systems. However, miniaturization efforts in self-reconfigurable modular robots bring some challenges such as storage and packaging. Developing externally actuated micro-robots can be a good alternative for miniaturization of SRMRs with the help of rapid enhancements in micro-manufacturing technologies encountered in the last decades. In this study a novel self-reconfiguration mechanism for micro-robots that are externally actuated by magnetic actuators is developed. In the study the motion of the magnets inside the microtubes under the effect of external magnetic field is investigated by using finite elements method. Dynamic model of the mechanism is obtained by using finite elements method and its applicability is exhibited by simulations. The results are compared with the theoretical values. It is envisioned that the study will contribute to micro-robotic systems in industry, defense industry and space missions as well as biomedical applications and medical robots.

Keywords: Microrobotics, self-reconfigurable modular robots (SRMR), magnetic actuators, modular motion, finite elements method

ToCite: DOKUYUCU, H.İ. & GÜRSEL ÖZMEN, N., (2022). KENDİ KENDİNİ KONFIGÜRE EDEBİLEN ROBOTİK BİR SİSTEM İÇİN MİKRO ÖLÇEKTE ELEKTROMANYETİK DIŞ EYLEYİCİ TABANLI HAREKET MODELİ GELİŞTİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 434-449.

GİRİŞ

Kendi kendini yeniden yapılandıran modüler robotlar (KKMR) incelendiğinde, yeni koşullara uyum sağlamak, yeni görevler gerçekleştirmek veya hasardan kurtulmak için parçalarının bağlantılarını yeniden düzenleyerek kasıtlı olarak kendi şekillerini değiştirebilen yapılardır. Tek bir yapıda birleşen birçok modül, bilgi ve enerji akışını sağlayan kenetlenme mekanizmalarıyla hareket etmektedir (Yim vd., 2007). Sistemde yer alan bütün modüllerin özdeş olması ve kendine yetebilmesi durumunda sistem homojen olarak tanımlanırken (Yim vd., 2007), farklı modüllerin meydana getirdiği sistemler heterojen olarak tanımlanmıştır (Lyder, Garcia ve Stoy, 2008). Buna ek olarak “kendi kendini konfigüre eden” ifadesi, KKMR sistemlerinin herhangi bir dış müdahaleye gerek duymaksızın modüllerin birbirlerine göre pozisyonlarını değiştirebilmesi anlamına gelir (Feczko vd., 2015). KKMR'lere ihtiyaç duyulmasının nedeni, erişimin ve bilinmezliğin fazla olduğu uzay araştırmaları, canlı formunda hareket edebilen yapılara duyulan ihtiyaç ve anında problem çözebilecek robotik yapılara duyulan ihtiyaç şeklinde ifade edilebilir. KKMR'lerin, sabit yapılandırma sistemlerine kıyasla, önceden bilinmeyen görevleri yerine getirme yetenekleri vardır.

Robotik teknolojilerde kaydedilen hızlı gelişmelerin ışığında birçok araştırmacı, düzensiz şekilli çevrelerde çalışabilen robotik çözümler üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde kabul edilen ilk KKMR olan CEBOT (Fukuda vd., 1989), küresel bir sıvı tankının içerisinde modülleri bağlı bir şekilde çalışmak üzere geliştirilmiş olup, her biri ortak bir bağlantı mekanizmasına sahip özel CEBOT modülleri, tankın küçük boyutlardaki girişine rağmen robotik bir kolun ucunda otomatik olarak değiştirilebiliyordu. Literatürde yer alan bu ilk doğrulanmış KKMR örneği, alanında diğer birçok araştırmaya öncülük etmiş ve günümüze değin gözle görülür gelişmelerin ivmelenmesini sağlamıştır. KKMR sistemlerinin en önemli avantajı, geleneksel sabit yapıllı robotlara çevreye uyum sağlama ve atanan göreve göre özelleşme konusunda esneklik kazandırmasıdır.

Modüllerin tasarlanması ve imal edilmesi gibi mekanik unsurların yanında, bilgisayar programlamada elde edilen kazanımlar, çok sayıdaki modülün kontrolü açısından önemlidir (Sprowitz vd., 2010). KKMR sistemlerinde birden fazla modülün uyum içerisinde hareket ettiği gerçeğinden yola çıkılarak, karar verme süreçlerinin belirleyici olmayan polinomsal problemler içerdiği görülmektedir (Sprowitz vd., 2010). Eniyileme algoritmaları, bu tür karmaşık problemlerin çözümünde önemli roller üstlenmektedir. Meta-sezgisel algoritmalar alanında kayda geçirilecek ilerlemelerin KKMR kontrol stratejilerine kolayca uyarlanabileceği düşünülmektedir.

KKMR sistemlerinin gelecek vaat ettiği üç ana husus çok amaçlılık, güvenilirlik ve düşük maliyet olarak belirlenmiştir (Murata, Kurokawa ve Kokaji, 1994).

Çok amaçlılık özelliği, KKMR alanında birçok kez doğrulanmış olup (Yim vd., 2007), bu alanın çıkış noktasına da ilham veren tekil bir robotik sistemin geniş bir görev kapsamına sahip olması durumuyla ilintilidir. Öte yandan güvenilirlik ve düşük maliyet özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar sürdürülmektedir (Jahanshahi vd., 2017).

KKMR sistemleri, sahip olduğu modüler yapı sayesinde hata dayanımı ve kendi kendini tamir edebilme karakterleri geliştirmiştir. Arıza veren modülün sistemden uzaklaştırılmasıyla kalıcı hasarlardan kaçınılmakta, merkeziyetsiz kontrol yaklaşımlarıyla işlevsellik sürdürülebilir bir yapıya bürünmektedir. Modül sayısının artışı beraberinde daha karmaşık kontrol stratejilerinin geliştirilmesini getirmektedir. Ayrıca kullanılan malzeme ve alt sistemlerin maliyetlerinin de artması anlamına gelmektedir. Düşük maliyet problemlerine çözüm olarak eksik eyleycili (Knizhnik ve Yim, 2020) ve basit kenetlenme mekanizmasına sahip (Wolfe vd., 2012) sistemler önerilmiştir. Bu açıklamalar ışığında yüksek performans ile düşük maliyet arasında dengeli bir yaklaşımda bulunmak gerektiği açıktır. Bu nedenle bu çalışmada KKMR sistemlerinin kenetlenme mekanizmalarına yönelik bir elektromanyetik sistem ele alınmıştır.

Gelecek vaat ettiği yönler ve sunduğu faydalar esas alındığında KKMR alanında, havza suları gözetleme (Paulos vd., 2015), uzay görevleri (Goeller vd., 2012), boru içi keşif (Ciszewski vd., 2014), sıvı tanklarının temizliği (Fukuda ve Nakagawa, 1988) ve nükleer tesis yedeğe çıkarma ve keşif (Hirai, Hirose ve Lee, 2013; Fulton ve Schaub, 2021) gibi birçok uygulama geliştirildiği gözlenmektedir.

KKMR sistemleri yapısal olarak sınıflandırıldığında karşımıza kafes, zincir, mobil, melez, kiriş ve serbest form yapıları çıkmaktadır. Özellikle kafes yapıya sahip KKMR sistemlerinde “Million Module March” olarak adlandırılan, sahip olunan modül sayısının milyon seviyesine çıkarılması ve modül boyutlarının en aza indirilmesi çabaları

literatürde önemli yer tutmaktadır (Kirby vd., 2007). Fakat hesaplama zamanı kısıtlamaları, yüksek sayıda modül içeren KKMR sistemlerinin deneysel çalışmalarını olumsuz yönde etkilemektedir (Holobut, Bordas ve Lengiewicz, 2020). Şu ana kadar kaydedilen en yüksek sayılı simülasyonlardan biri 32 milyon adet modüle sahip KKMR sistemi için gerçekleştirilmiş olup (Thalamy vd., 2022), deneysel çalışmalarda modül sayısı düşük tutulmaya çalışılmıştır.

Boyut kısıtlamaları, KKMR alanında eyleyicilerin konumlandırılması gibi önemli sınımları tetiklemektedir. Bu noktada çeşitli çözüm önerileri gözlenmektedir. Dış eyleyiciler ile hareket sağlama yaklaşımı bu önerilerden biri olup, minyatürleşme çabalarına yenilikçi hareketlendirme ve kenetlenme mekanizmaları açılarından gözle görülür bir ivme kazandırmıştır (White ve Yim, 2010; Fiaz ve Shamma, 2019). Biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere sunulan zincir yapılı KKMR sistemi, Helmholtz bobin düzeneğini dış eyleyici olarak kullanılmaktadır (Al Khatib vd., 2020). Silkeleme masasının (White ve Yim, 2010) ve mikro ölçekli elektromanyetik ızgara yüzeyinin (Diller vd., 2011) dış eyleyici olarak kullanılması diğer bazı örneklerdendir. Dış eyleyiciler ile hareketlendirilen sistemler, basit kontrolcü kullanmaları ile basit hareket ve kenetlenme mekanizmalarına sahip olmaları yönlerinden belirgin faydalar sunmaktadır.

KKMR sistemleri mikro robotik sistemler ile sıkı ilişkiler içerisindedir. Mikro robotlar incelendiğinde genellikle dört ana eyleyici sistemine sahip oldukları görülmekte olup, bu sistemlerin itki kaynağı çeşitleri manyetik alan, akustik alan, ışık enerjisi ve kimyasal reaksiyon şeklinde sıralanabilir (Ceylan vd., 2017). Kurşun kapsül şeklinde bir mikro yüzücü, içerisindeki boşluğa yerleştirilen hava damlacığının dış akustik eyleyici tarafından etkilenmesi ve dış manyetik alan ile yönlendirilmesi sonucu birleştirilmiş bir hareket profiline ulaşmıştır (Ren vd., 2019). Minyatür robotlar için manyetik eyleyici sistemlerin incelendiği derleme çalışmasında manyetik alanın kontrol edilebilirliği vurgulanmış ve manyetik alan ile mıknatıs arasındaki etkileşimde uzamsal konfigürasyonun önemine değinilmiştir (Yang ve Zhang, 2020). Başka bir çalışmada ise manyetik dış eyleyici ile hareket metotlarından üç tanesi karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir (Abbott vd., 2009). Manyetik eyleyiciler kornea oksijen ölçüm aletlerinin geliştirilmesinde de kullanılabilir (Ergeneman vd., 2008). Mikro robotların kendi kendini birleştirmesi metotlarının incelendiği derleme çalışmasında (Mastrangeli vd., 2009) mikro ölçekte önemli olan manyetik etkileşimler ele alınmıştır. Buna ek olarak mikro kanallarda valf, karıştırıcı veya pompa olarak işlev görebilecek mikro robotların sezgisel birleşme yöntemlerinin değişik yönleriyle incelendiği bir çalışma da mevcuttur (Sawetzki vd., 2008). Mikro ve nano robotların manyetik eyleyiciler ile hareketinin sağlandığı sistemlerin incelendiği çalışmada (Zhou vd., 2021), uzaktan kumanda edilebilirlik, yeniden konfigüre edilebilme, geri dönüştürülebilme ve çok amaçlılık diğer yöntemlere göre sunulan faydalar olarak sıralanmıştır. Manyetik dış eyleyici kullanan diğer bazı sistemler (Lin vd., 2021; Diller vd., 2011; Nguyen vd., 2020; Pieters vd., 2016; Pawashe, Floyd ve Sitti, 2009) literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiş olup, sonuçlar umut vericidir.

Literatürde yer alan mikro robotik çalışmalarında genellikle tekil yapılara önem verildiği, KKMR sistemlerinin mikro robotik uygulama çalışmalarının henüz istenen düzeye gelmediği ve doğrulaması yapılmış bir sistemin mevcut olmadığı gözlenmektedir. Bu husus, literatürde tespit edilen eksikliklerdir. KKMR sistemlerinin önerdiği vaatlerin mikro robotik alanda birçok fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Mikro robotların KKMR düzleminde sistemli bir şekilde haberleşmesi, kenetlenmesi ve konfigürasyon değiştirebilmesi, ulaşılması zor mikro yapılarda gerçekleştirilecek görevler için alternatif bir çözüm yöntemi oluşturacaktır.

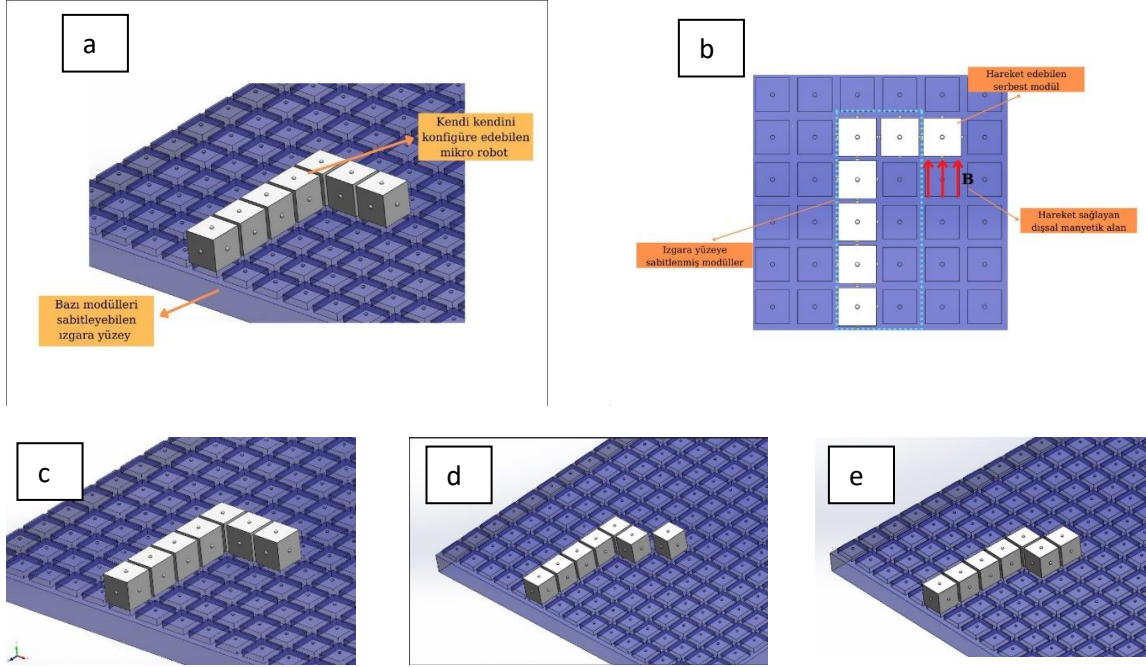
Bu çalışmada yenilikçi bir kendi kendini konfigüre edebilen mikro robot tasarlanarak, mikro robotlar için dışsal manyetik eyleyiciler tarafından hareket sağlanan yeni bir kendi kendini konfigüre etme mekanizması ortaya koyulmuştur. Geliştirilen KKMR sisteminde yer alan modüllerin içerisine mikro tüpler yerleştirilecek olup, her tüpün içerisinde Neodyum (NdFeB) mıknatıs çekirdeği bulunacaktır. Dışarıdan manyetik alan etki ettiğinde farklı eksenlerde şekil değiştiren mikro tüpler yardımıyla modüller hareketlendirilecektir. Çalışmada manyetik alan etkisinde mikro tüpler içerisinde yer alan mıknatısların hareketi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenecektir. Bu yönüyle, önerilen hareket mekanizması literatürde ilk kez uygulanacaktır. Buna göre, en uygun ve verimli bir şekilde çok amaçlılık, güvenilirlik ve düşük maliyet gözetilerek nasıl uyarlanabileceği üzerinde özgün katkılar sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde Materyal ve Metot başlığı altında problemin tasarımı, seçilen malzemeler ve uygulanacak yöntem tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde mikro tüpler içerisinde yer alan mıknatısların hareketine ait bulgular ve irdelemesi sunulmuştur. Son bölümde çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Problemin Tanımı

Çalışmada geliştirilecek olan KKMR sisteminin ve uygulanacak olan dışsal manyetik alanın temsili görünümü ile konfigürasyon değişim adımları Şekil 1’de gösterilmektedir.

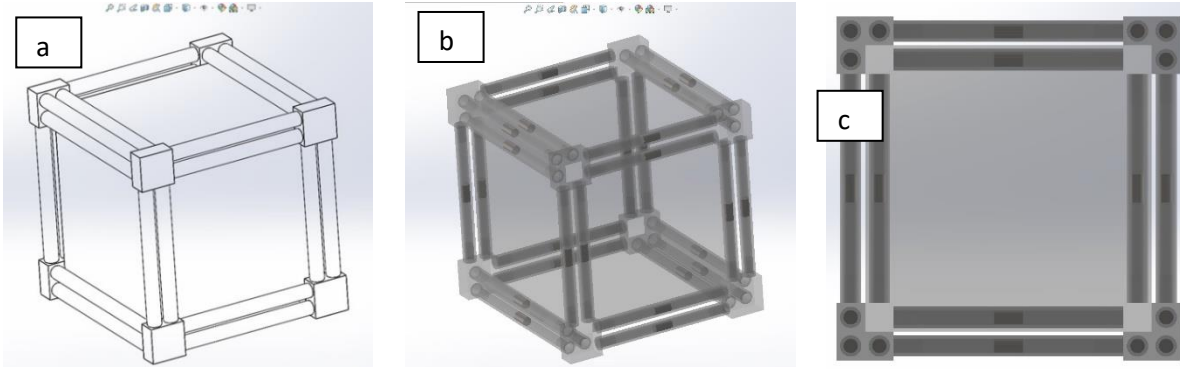


Şekil 1. a. Geliştirilen KKMR Sisteminin Genel Görünümü. Konfigürasyon Sırasında Bazı Modülleri Elektrostatik Kuvvetler Yardımıyla Sabitleyebilen Izgara Yüzey Kolaylık Sağlayacaktır. b. Izgara Yüzeye Sabitlenen Modüller Dış Manyetik Alan Etkisinde Hareket Etmezken, Serbest Modül Hareket Ederek Konfigürasyonu Değiştirmektedir. c. Hareket Öncesi Mikro Robotun Görünümü. d. İlk Devrilme Hareketinden Sonra Serbest Modülün Pozisyonu. e. İkinci Devrilme Hareketinden Sonra Oluşan Yeni Konfigürasyon.

Çalışmada kullanılan mikro tüplerin malzemesi yüksek molar hacmi, düşük kohezif enerji yoğunluğu ve yüksek esneklik yetenekleri göz önünde bulundurularak Polidimetilsiloksan (PDMS) olarak seçilmiştir. Mikro tüplerin içerisine yerleştirilen mıknatıs çekirdekleri yüksek kalıcı mıknatıslanma, yüksek korozif dayanımı ve kolay üretilebilirlik yetenekleri göz önünde bulundurularak Neodyum-demir-bor (NdFeB) olarak seçilmiştir. Modüllerin kabuk malzemesi ise benzetim çalışmalarından çıkacak sonuçlara göre belirlenecektir. Seçilen malzemelerin temel özellikleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Seçilen malzemeye göre mikro robotun maliyeti değişeceği gibi, mikro ölçekte çalışıldığından dolayı mikro robotun maliyetine etki eden en önemli faktörlerden birisi mikro parçaların üretim yöntemidir. Bu çalışmadan çıkan sonuçlar ışığında malzeme seçimi ve mikro üretim yöntemi belirlenecektir. Maliyete etki eden diğer bazı faktörler ise dış manyetik eyleyicinin çeşidi ve hareket kabiliyeti, mikro robotun kullanım yeri ve gerçekleştireceği görev ile mikro robotların kendi arasında ve dış kaynaklarla sağlayacağı iletişimin türü olarak sayılabilir.

Tablo 1. Malzemelerin Temel Özellikleri

	PDMS (Mikro Tüp)	NdFeB (Mıknatıs Çekirdek)
Young Modülü (GPa)	$0,75 \times 10^{-3}$	160
Poisson Oranı	0,49	0,24
Yoğunluk (kg/m^3)	970	7500
Göreceli Geçirgenlik	1	1,05
Kalıcı Mıknatıs Yoğunluğu (T)		1,43



Şekil 2. a. Modülün Kapalı Görünümü. **b.** Mıknatıs Çekirdekleri ve Mikro Tüplerin Yerleşiminin 3 Boyutta Görünümü **c.** Modülün x-z Düzleminde İki Boyutlu Görünümü (Not: Tüm görünümlemler kullanılan çizim programının görünüm stili ve düzlemi seçenekleri değiştirilerek aynı montajdan elde edilmiştir.)

KKMR sisteminde yer alan modüller birbiriyle eş yapıdadır. Bu yönüyle sistem homojen KKMR olarak tanımlanmaktadır. Modüller birbiriyle manyetik kuvvetler aracılığıyla kenetlenmektedir. Böylece karmaşık kenetlenme mekanizmalarının getireceği zorluklar elimine edilmiştir. Bir modülün konsept görünümü Şekil 2’de gösterilmektedir.

Metot

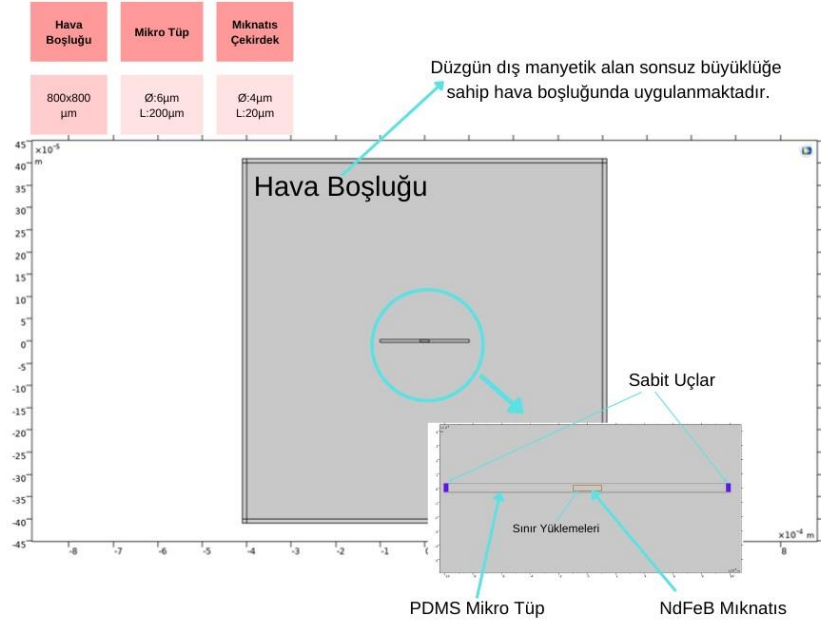
Çalışmada manyetik alan etkisinde mikro tüpler içerisinde yer alan mıknatısların hareketi incelenmiştir. Bu hareket doğrultusunda oluşan tork etkisi modüllerin devrilmesini sağlayacak olup, KKMR sisteminin konfigürasyonu bu şekilde değişecektir. Modelleme ve benzetim çalışmalarında COMSOL Multiphysics® yazılımı kullanılmıştır (Multiphysics, 2021). İşlem kolaylığı açısından mikro tüp ve içerisinde yer alan mıknatıs çekirdeği iki boyutta incelenmiş olup, yapının etrafında sonsuz büyüklükte hava boşluğu tanımlanmıştır. Böylece uygulanan dış manyetik alan sağlıklı bir şekilde modellenmiştir. Oluşturulan simülasyon ortamı Şekil 3’te gösterilmektedir.

Simülasyon ortamı oluşturulduktan sonra malzemelerin seçimi yapılmış, mikro tüpün uçları sabitlenmiş ve dış manyetik alan ortama uygulanmıştır. Sonlu eleman yönteminde kullanılmak üzere parça boyutları ile uyumlu olacak örgü boyutları tanımlanmıştır. Hava boşluğu için örgü boyutu 20 μm iken, mikro tüp ve mıknatıs çekirdek için örgü boyutu 0,4 μm olarak seçilmiştir. Dış manyetik alan 5 mT, 10 mT, 15 mT ve 20 mT olarak değişen değerlerde uygulanmıştır. Bu değişen dış manyetik alan değerlerine göre sistem hareketinin davranışı gözlenmiştir.

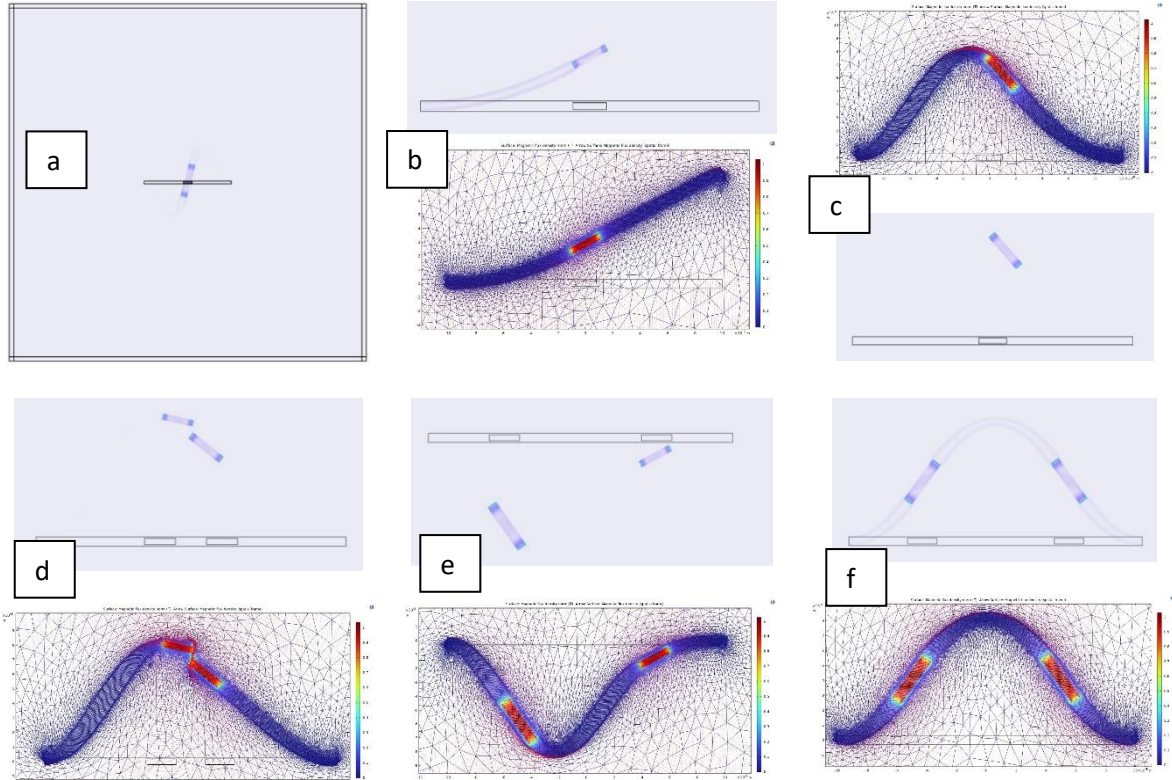
BULGULAR VE TARTIŞMA

Uygun Mikro Tüp Mıknatıs Çekirdeği Konfigürasyonunun Tespiti

Mikro tüp ile içerisine yerleştirilecek mıknatıs çekirdeğinin konfigürasyonunun tasarlanan mikro KKMR sistemine en iyi şekilde katkı vermesini sağlamak üzere bir dizi simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak Şekil 3’te görüldüğü üzere mikro tüpün merkezinde bir adet mıknatıs çekirdeği olacak şekilde simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Dış manyetik alanın yönünün de değiştirilerek gerçekleştirilen bu simülasyonlar sonucunda istenen hareket elde edilememiş olup, farklı konfigürasyonlar denenmiştir. Mikro tüp içerisine iki adet mıknatıs çekirdeği birbirinden belli bir uzaklıkta, kutupları birbirine ters olacak şekilde yerleştirildiğinde istenen hareket sağlanmıştır ve simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre mikro tüp mıknatıs çekirdeği konfigürasyonları Şekil 4’te gösterilmektedir

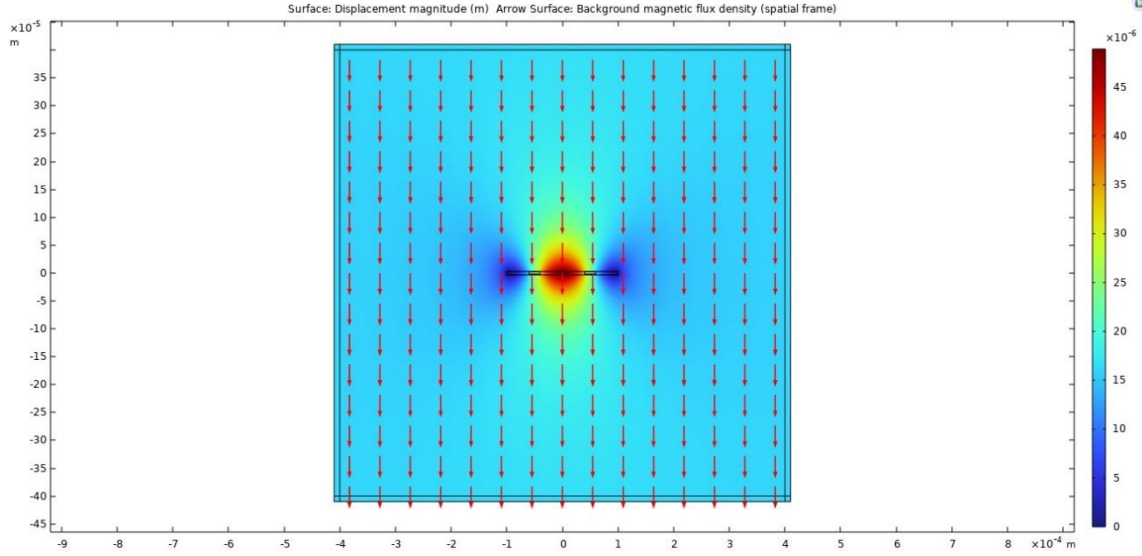


Şekil 3. İki Boyutlu Simülasyon Ortamı



Şekil 4. Uygun konfigürasyon seçimi. **a.** Tek miknatis merkezde, manyetik alan: +y **b.** Tek miknatis merkezde mikro tüpün sağ ucu serbest bir durumda, manyetik alan: +y **(c)** Miknatis merkezde, manyetik alan: -x **d.** İki miknatis merkeze yakın, manyetik alan: -x **e.** İki miknatis merkezden uzak, manyetik alan: -x **f.** İki miknatis merkezden uzak, miknatis kutuplar birbirine zıt, manyetik alan: -y.

Şekil 4'te görülen sonuçlar incelendiğinde mikro KKMR sistemi için istenen mikro tüp hareketinin, iki adet mıknatıs çekirdeğin birbirine 100 μm uzaklıkta, mikro tüp merkezine göre simetrik bir şekilde konumlandığı pozisyonda, dış manyetik alanın yönünün -y olduğunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu konfigürasyonda mıknatıs çekirdeklerinin kutupları birbirine zıt konumlandırılmıştır (N-S --- S-N). Çalışmanın geri kalan kısmında seçilen bu konfigürasyon kullanılmış olup, bu konfigürasyonda oluşan yer değiştirmeler ile dış manyetik alan Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Seçilen Konfigürasyonda Oluşan Yer Değiştirmelerin Dış Manyetik Alan Altında Gösterimi

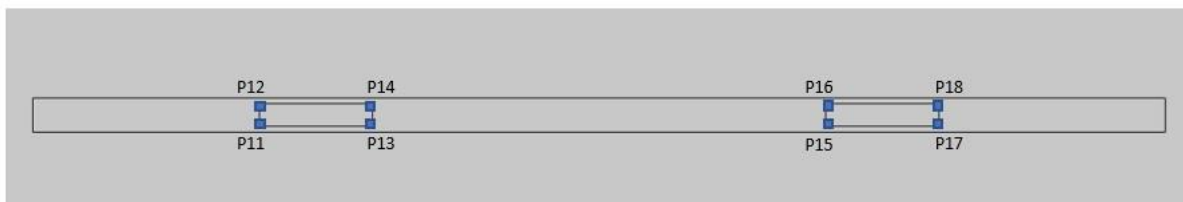
Deformasyon Açısının Hesaplanması

Uygun konfigürasyonun seçiminin ardından mikro tüpte oluşan deformasyon açıları hesaplanmıştır. Deformasyon açılarının hesabında mıknatıs çekirdeklerinin yer değiştirme değerleri kullanılmıştır. Değişken dış manyetik alan altında oluşan yer değiştirmeler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Değişken Manyetik Alan Etkisinde Oluşan Yer Değiştirmeler

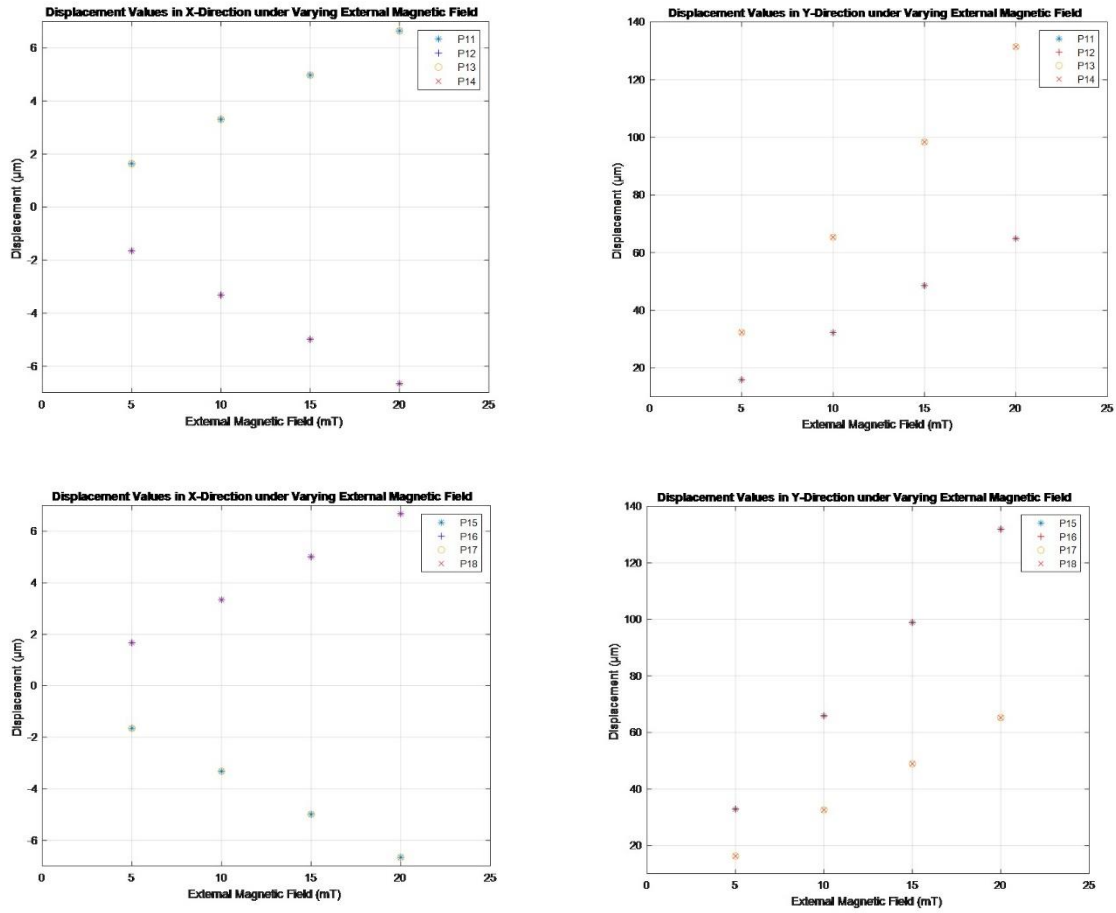
	Manyetik Alan (mT)	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
X-doğrultusunda yer değiştirme (μm)	5	1,64	-1,65	1,64	-1,65	-1,65	1,67	-1,65	1,67
	10	3,31	-3,32	3,31	-3,32	-3,32	3,34	-3,32	3,34
	15	4,98	-4,99	4,98	-4,99	-4,99	5,01	-4,99	5,01
	20	6,65	-6,66	6,65	-6,66	-6,66	6,68	-6,66	6,68
Y-doğrultusunda yer değiştirme (μm)	5	15,90	15,90	32,33	32,33	32,86	32,86	16,26	16,26
	10	32,23	32,23	65,36	65,36	65,89	65,89	32,59	32,59
	15	48,56	48,56	98,39	98,39	98,92	98,92	48,92	48,92
	20	64,89	64,89	131,42	131,42	131,95	131,95	65,25	65,25

Tabloda yer alan değerlerin hesaplandığı mıknatıs köşe noktaları Şekil 6'da gösterilmektedir.



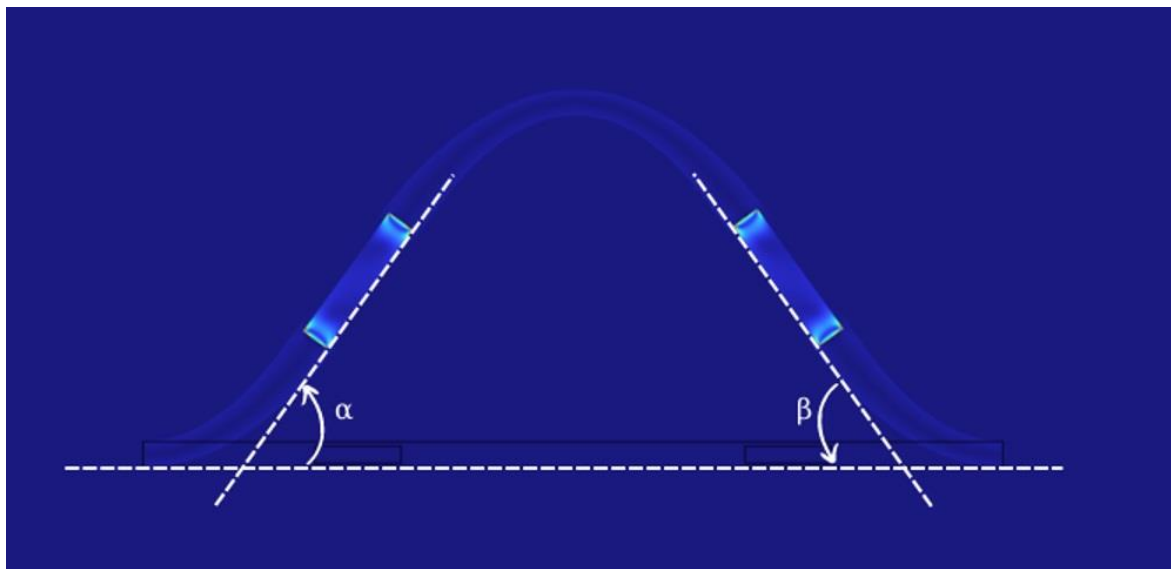
Şekil 6. Mıknatısların Köşe Noktaları

Tablo 2’de yer alan değerler Şekil 7’de grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 7. Yer değiştirme değerlerinin manyetik alana göre değişimi

Elde edilen yer değiştirme değerleri kullanılarak ve temel trigonometrik ilişkiler göz önünde bulundurularak mikro tüpte oluşan deformasyon açıları hesaplanmıştır. Şekil 8’de mikro tüpte oluşan deformasyon açıları gösterilmektedir.

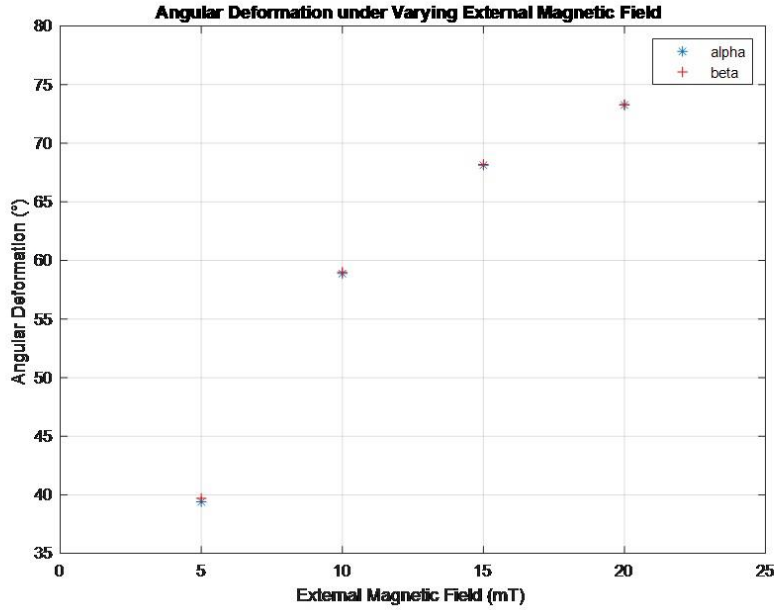


Şekil 8. Mikro tüpte oluşan deformasyon açıları

Tablo 3’te değişken manyetik alan altında oluşan deformasyon açıları gösterilmektedir. Şekil 9’da ise bu açılar grafik üzerinde gösterilmektedir.

Tablo 3. Değişken Manyetik Alan Altında Oluşan Deformasyon Açıları

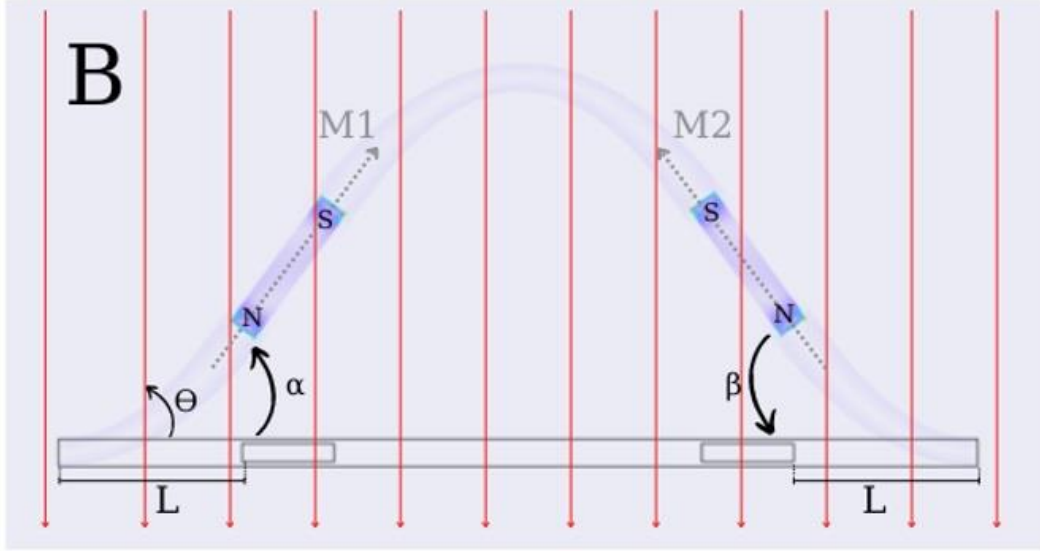
Dış Manyetik Alan (mT)	α (°)	β (°)
5	39,40	39,69
10	58,88	59,01
15	68,13	68,20
20	73,27	73,31

**Şekil 9.** Değişken Manyetik Alan Altında Oluşan Deformasyon Açıları

Oluşan deformasyon açıları incelendiğinde, mikro tüpün iki tarafında oluşan açılardan birbirine oldukça yakın değerler olduğu gözlenmektedir. Mıknatıslanmanın doğası gereği seçilen konfigürasyonda tam simetrik bir hareket elde edilemese de aradaki hatanın çok küçük olması hareketin simetrik kabul edilebileceğini göstermektedir. Buna ek olarak uygulanan manyetik alan arttıkça deformasyon açısının da arttığı, ancak düşük aralıklarda, örneğin 5 mT ile 10 mT arasında, artışın büyük aralıklara, örneğin 15 mT ile 20 mT arasında, kıyasla daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bu durumun sebebi mikro tüpün elastik yapısından dolayı deformasyon açısı arttıkça harekete karşı tüpün gösterdiği dirençtir. Teorik değerler ile doğrulama yapılırken bu hususun üzerinde durulmuştur.

Deformasyon Açılarının Teorik Değerler Kullanılarak Doğrulanması

Simülasyonlar sonucu elde edilen deformasyon açılarının doğrulanmasını sağlamak üzere Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi kullanılmıştır (Jeon vd., 2018). Bu yaklaşıma göre mıknatısların mikro tüpe uyguladığı yer değiştirme ile mikro tüp malzemesinin rijitliği birbirlerine karşı koymakta ve manyetik tork ile mekanik tork birbirlerini dengelemektedir. Manyetik ve mekanik torkların hesaplanmasında baz alınacak şema Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Doğrulama İşlemi İçin Baz Alınan Şema

Şekil 10'da B dış manyetik alanı, L kenarlardan mıknatlara olan uzaklığı, M1 ve M2 mıknatısların manyetizasyon değerlerini, α ve β deformasyon açılarını, θ dış manyetik alan ile mikro tüp arasındaki açıyı ifade etmektedir.

Manyetik tork, mıknatısların manyetizasyonu (M) ile dış manyetik alanın (B) vektörel çarpımına eşittir ve aşağıda gösterilmektedir.

$$\vec{T}_{mag} = \vec{M} \times \vec{B} \quad (1)$$

$$T_{mag1} = MB \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

$$T_{mag2} = MB \sin(\theta - \beta) \quad (3)$$

Mekanik tork ile deformasyon açısı arasında aşağıdaki gibi bir ilişki mevcuttur.

$$\alpha = \frac{T_{mech}L}{EI} \quad (4)$$

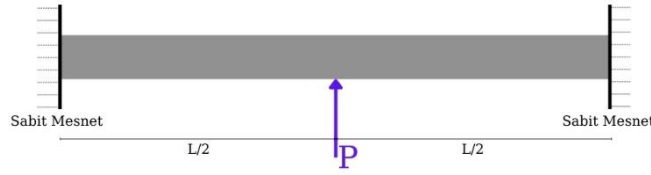
Eşitlik-4'te E Young modülünü, I atalet moment alanını, L kiriş uzunluğunu, T_{mech} mekanik torku, α ise deformasyon açısını ifade etmektedir.

Mekanik ve manyetik torkların birbirine eşitlenmesiyle deformasyon açısının teorik ifadesi bulunmuştur. Bu eşitlik aşağıda gösterilmektedir. Çalışmada ele alınan mikro tüpün yapısı ve mıknatıs çekirdekler ile konfigürasyonu Eşitlik-6'daki sonucu vermiştir. Deformasyon açısı için sabitlenmiş nokta iterasyonu yöntemi kullanılmıştır (Jeon vd., 2018).

$$T_{mag} = T_{mech} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{MBL \sin(\theta - \alpha)}{12EI} \quad (6)$$

Kiriş Üzerine Uygulanan Tekil Nokta Yükü



Şekil 11. Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi Şeması

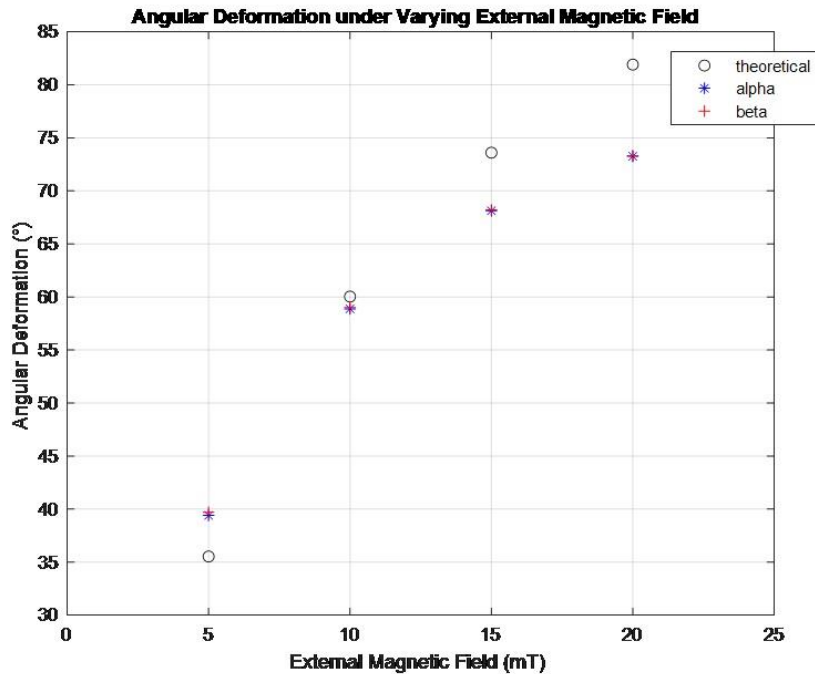
Şekil 11’de doğrulamada kullanılan Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi için oluşturulan şema gösterilmektedir. Sabitlenmiş nokta iterasyonu MATLAB© programında çözülmüştür. Ulaşılan teorik değerler ile simülasyon sonucu ulaşılan değerler Tablo 4’te gösterilmektedir. Teorik hesaplamalar yapılırken kullanılan teori gereği iki tarafta oluşan deformasyon açılarının birbirine eşit olduğu varsayılmıştır.

Tablo 4. Simülasyon ve Teorik Deformasyon Açısı Değerlerinin Karşılaştırılması

Dış Manyetik Alan (mT)	α (°)	β (°)	Teorik Açılı (°)	Hata Yüzdesi (%)
5	39,40	39,69	35,53	10,15
10	58,88	59,01	60,04	1,86
15	68,13	68,20	73,61	7,99
20	73,27	73,31	81,91	11,76

Tablo 4 incelendiğinde simülasyon sonucu ile teorik değerlerin birbirine kabul edilebilir yakınlıkta olduğu görülmektedir. Özellikle 10 mT ile 15 mT dış manyetik alan etkisinde hata oranı oldukça küçülmektedir. Mikro tüpün elastik yapısından dolayı deformasyon açısı arttıkça harekete karşı dirençten dolayı deformasyon açısının artış hızı dış manyetik alan arttıkça azalmaktadır.

Deformasyon açısı değerlerinin karşılaştırması grafiğe aktarılmış olup, Şekil 12’de gösterilmektedir.



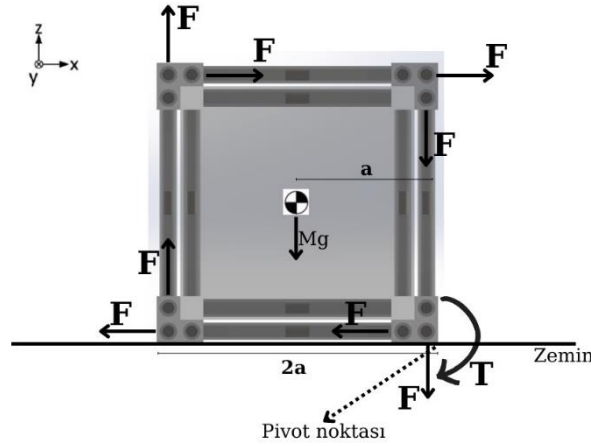
Şekil 12. Deformasyon açısı değerlerinin karşılaştırılması

Bir Modülün Devrilme Mekanizmasının İncelenmesi

Mikro tüp içerisine önceki bölümlerde aktarıldığı şekilde seçilen bir konfigürasyonla yerleştirilmiş mıknatıs çekirdeklerin dışarıdan uygulanan manyetik alan etkisiyle mikro tüpte oluşturduğu hareket neticesinde mikro KKMR

sistemde yer alan modüllerin hareketlendirilmesi, konfigürasyon değiştirmesi, kenetlenmesi ve ayrılması gibi operasyonların gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu operasyonların temelinde modüllerin devrilmesi hareketi bulunmaktadır. Bir modülün devrilmesi sonucunda pozisyonu değişecek ve sistemin konfigürasyonu yenilenecektir.

Dışarıdan uygulanan manyetik alan kontrol altındadır ve istediğimiz yönde ve şiddette uygulanabilmektedir. Bir modül tekil olarak ele alındığında tasarlanan yapı Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 13. Devrilme Mekanizmasının Şematik Gösterimi

Modülün kenarlarına Şekil 13'teki gibi yerleştirilen mikro tüpler yardımıyla kuvvetlerin oluşması ve bu kuvvetler yardımıyla modülün devrilmesi öngörülmektedir. Bu noktada devirmeyi sağlayan momentler ile dengeyi sağlayan momentler hesaplanarak birbiriyle karşılaştırılmakta, aynı zamanda modülün kaymasını önleyecek sürtünme kuvveti de göz önünde bulundurulmaktadır. Mikro ölçekte çalışıldığı için sürtünme kuvveti yapışma kuvvetiyle etkileşim içerisindedir ve bu kuvvetlerin detaylı bir şekilde modellenmesinin gelecek çalışmalarda yapılması planlanmaktadır. Şu an için devrilme hareketini sağlayacak genel bir sürtünme kuvveti modellenmiştir ve statik sürtünme katsayısı ile hesaplandığı varsayılmıştır ve matematiksel olarak ilerleyen eşitliklerde sunulmuştur.

$$f = \frac{\sum M_{dengeleyici}}{\sum M_{devirici}} \quad (7)$$

$$\sum M_{dengeleyici} = Mga \quad (8)$$

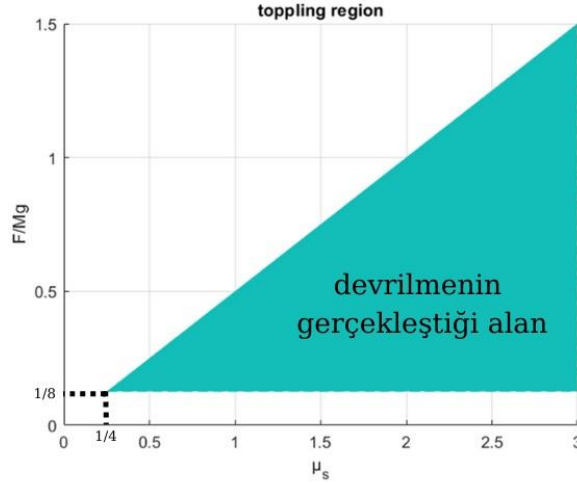
$$\sum M_{devirici} = 8Fa \quad (9)$$

$$\frac{F}{Mg} \geq \frac{1}{8} \quad (10)$$

$$2F \leq \mu_s Mg \quad (11)$$

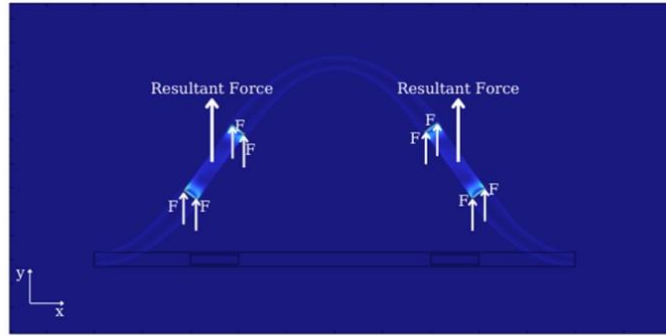
$$\frac{\mu_s}{2} \geq \frac{F}{Mg} \geq \frac{1}{8} \quad (12)$$

Devrilme mekanizmasının incelenmesi sonucunda devrilme olayının gerçekleştiği durumsal alan grafiksel olarak Şekil 14'te gösterilmektedir. Buna göre mikro tüpte oluşan kuvvetin modülün toplam kütlesine oranının ve oluşan statik sürtünme katsayısının önemi ön plana çıkmaktadır.



Şekil 14. Devrilme Mekanizmasının Durumsal Gösterimi

Mikro tüpte oluşan kuvvetler x doğrultusunda birbirini elimine ederken y doğrultusunda eklemeli olarak etki etmektedir. Çalışmada y doğrultusunda oluşan kuvvetler ele alınmıştır. Oluşan kuvvetlerin şematik gösterimi Şekil 15’te sunulmaktadır.



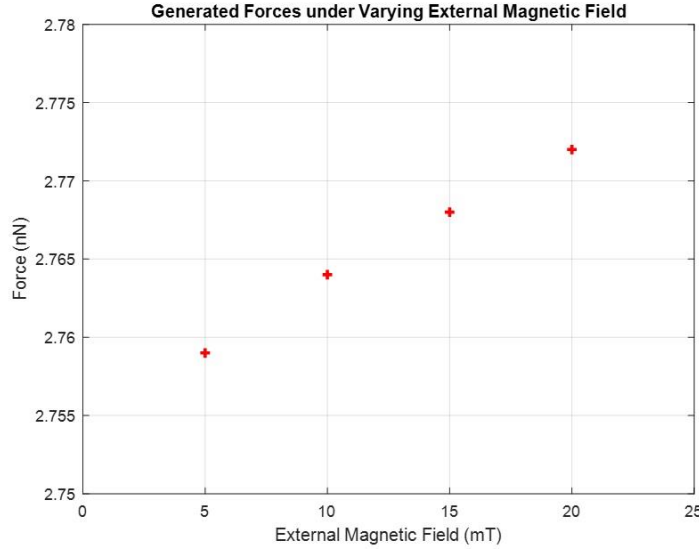
Şekil 15. Mikro Tüpte Oluşan y Doğrultulu Kuvvetler

Oluşan kuvvetlerin büyüklükleri ve izin verilen azami modül ağırlık değerleri Tablo 5’te gösterilmektedir.

Tablo 5. Oluşan Kuvvetler ve Azami Modül Ağırlık Değerleri

Dış Manyetik Alan (mT)	F (nN)	F_R (nN)	Mg (nN)-azami
5	0,3449	2,759	22,07
10	0,3454	2,764	22,11
15	0,3460	2,768	22,14
20	0,3466	2,772	22,18

Oluşan bileşke kuvvetlerin manyetik alana bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 16’da verilmektedir.



Şekil 16. Oluşan Bileşke Kuvvetler

Çalışmada elde edilen bulgular ışığında tasarım faaliyetleri sürdürülecek olup, modül ağırlığı gibi önemli bir parametre bulgular yardımıyla belirlenecektir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada dışsal manyetik eyleyiciler tarafından hareket sağlanan yeni bir kendi kendini konfigüre edebilen mikro robot için hareket mekanizması geliştirilmiştir. Mikro tüp ile içerisine yerleştirilecek mıknatıs çekirdeğinin optimum konfigürasyonunun iki adet mıknatıs çekirdeğinin birbirine 100 µm uzaklıkta, mikro tüp merkezine göre simetrik bir şekilde konumlandığı pozisyonda, dış manyetik alanın yönünün -y olduğunda gerçekleştiği görülmüştür. Mekanizmanın dinamik modeli, sonlu elemanlar yöntemiyle COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında ulaşılan sonuçlar teorik değerler ile karşılaştırılarak sistemin doğrulanması sağlanmıştır. Sistemi oluşturan modüller tekil olarak incelenerek devrilme mekaniği matematiksel olarak modellenmiş olup, geleceğe yönelik önemli tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada sunulan bulgular ışığında mikro KKMR sisteminin tasarımının gerçekleştirilerek uygun hareket kontrolcülerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Abbott, J.J., Peyer, K.E., Lagomarsino, M.C., Zhang, L., Dong, L., Kaliakatsos, I.K., & Nelson, B.J. (2009). How should microrobots swim? *International Journal of Robotics Research*, 28, 157-167. <https://doi.org/10.1177/0278364909341658>

Al Khatib, E., Bhattacharjee, A., Razzaghi, P., Rogowski, L.W., Kim, M.J., & Hurmuzlu, Y. (2020). Magnetically Actuated Simple Millirobots for Complex Navigation and Modular Assembly. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2958-2965. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2974389>

Ceylan, H., Giltinan, J., Kozielski, K., & Sitti, M. (2017). Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab Chip*, 17(10), 1705-1724. <https://doi.org/10.1039/C7LC00064B>

Ciszewski, M., Buratowski, T., Giergiel, M., Małka, P., & Kurc, K. (2014). Virtual prototyping, design and analysis of an in-pipe inspection mobile robot. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52(2), 417-429.

COMSOL Multiphysics® v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Diller, E., Pawashe, C., Floyd, S. & Sitti, M. (2011). Assembly and disassembly of magnetic mobile micro-robots towards deterministic 2-D reconfigurable micro-systems. *International Journal of Robotics Research*, 30(14), 1667-1680. <https://doi.org/10.1177/0278364911416140>

- Ergeneman, O., Dogangil, G., Kummer, M.P., Abbott, J.J., Nazeeruddin, M.K., & Nelson, B.J. (2008). A magnetically controlled wireless optical oxygen sensor for intraocular measurements. *IEEE Sensors Journal*, 8(1), 29-37. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.912552>
- Feczko, J., Manka, M., Krol, P., Giergiel, M., Uhl, T., & Pietrzyk, A. (2015, July). Review of the modular self reconfigurable robotic systems. In 2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo) (pp. 182-187). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RoMoCo.2015.7219733>
- Fiaz, U.A., & Shamma, J.S. (2019). usBot: A modular robotic testbed for programmable self-assembly. *IFAC - PapersOnLine*, 52(15), 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.661>
- Fukuda, T., Nakagawa, S., Kawauchi, Y., & Buss, M. (1989, May). Structure decision method for self organising robots based on cell structures – CEBOT. In 1989 Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (pp. 695-700). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1989.100066>
- Fukuda, T., & Nakagawa, S. (1988). Approach to the dynamically reconfigurable robotic system. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1(1), 55-72. <https://doi.org/10.1007/BF00437320>
- Fulton, J.A., & Schaub, H. (2021). Forward dynamics analysis of origami-folded deployable spacecraft structures. *Acta Astronautica*, 186, 549-561. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.03.022>
- Goeller, M., Oberlaender, J., Uhl, K., Roennau, A., & Dillmann, R. (2012, December). Modular robots for on-orbit satellite servicing. In 2012 International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (pp. 2018-2023). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491265>
- Hirai, M., Hirose, S., & Lee, W. (2013). Gunryu III: Reconfigurable magnetic wall-climbing robot for decommissioning of nuclear reactor. *Advanced Robotics*, 27(14), 1099-1111. <https://doi.org/10.1080/01691864.2013.812174>
- Holobut, P., Bordas, S.P., & Lengiewicz, J. (2020, October). Autonomous model-based assessment of mechanical failures of reconfigurable modular robots with a Conjugate Gradient solver. In 2020 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 11696-11702). IEEE/RSJ. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341232>
- Jahanshahi, M.R., Shen, W.M., Mondal, T.G., Abdelbarr, M., Masri, S.F., & Qidwai, U.A. (2017). Reconfigurable swarm robots for structural health monitoring: a brief review. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 1(3), 287-305. <https://doi.org/10.1007/s41315-017-0024-8>
- Jeon, S., Hoshiar, A.K., Kim, S., Lee, S., Kim, E., Lee, S., Kim, K., Lee, J., Kim, J., & Choi, H. (2018). Improving guidewire-mediated steerability of a magnetically actuated flexible microrobot. *Micro and Nano Systems Letters*, 6:15. <https://doi.org/10.1186/s40486-018-0077-y>
- Kirby, B.T., Aksak, B., Campbell, J.D., Hoburg, J.F., Mowry, T.C., Pillai, P., & Goldstein, S.C. (2007, October). A modular robotic system using magnetic force effectors. In 2007 International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 2787-2793). IEEE/RSJ. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399444>
- Knizhnik, G., & Yim, M. (2020, June). Design and Experiments with a Low-Cost Single-Motor Modular Aquatic Robot. In 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR) (pp. 233-240). <https://doi.org/10.1109/UR49135.2020.9144872>
- Lin, D., Jiao, N., Wang, Z., & Liu, L. (2021). A Magnetic Continuum Robot with Multi-Mode Control Using Opposite-Magnetized Magnets. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 2485-2492. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3061376>
- Lyder, A., Garcia, R.F.M., & Stoy, K. (2008, September). Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. In 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 883-889). IEEE/RSJ. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650888>

- Mastrangeli, M., Abbasi, S., Varel, C., Van Hoof, C., Celis, J.P., & Bohringer, K.F. (2009). Self-assembly from milli- to nanoscales: Methods and applications. *Journal of micromechanics and microengineering: structures, devices and systems*, 19(8), 83001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/8/083001>
- Murata, S., Kurokawa, H., & Kokaji, S. (1994, May). Self-assembling machine. In 1994 Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (pp. 441-448). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351257>
- Nguyen B.H., Son P.T., Kim, J.S., & Lee, J.W. (2020). Field-focused reconfigurable magnetic metamaterial for wireless power transfer and propulsion of an untethered microrobot. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 494, 165778. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165778>
- Paulos, J., Eckenstein, N., Tosun, T., Seo, J., Davey, J., Greco, J., Kumar, V., & Yim, M. (2015). Automated Self-Assembly of Large Maritime Structures by a Team of Robotic Boats. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(3), 958-968. <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2416678>
- Pawashe, C., Floyd, S., & Sitti, M. (2009). Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot. *International Journal of Robotics Research*, 28(8), 1077-1094. <https://doi.org/10.1177/0278364909341413>
- Pieters, R., Lombriser, S., Alvarez-Aguirre, A., & Nelson, B.J. (2016). Model Predictive Control of a Magnetically Guided Rolling Microrobot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1), 455-460. <https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2521407>
- Ren, L., Nama, N., McNeill, J.M., Soto, F., Yan, Z., Liu, W., Wang, W., Wang, J., & Mallouk, T.E. (2019). 3D steerable, acoustically powered microswimmers for single-particle manipulation. *Science Advances*, 5(10), eaax3084. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax3084>
- Sawetzki, T., Rahmouni, S., Bechinger, C., & Marr, D.W. (2008). In situ assembly of linked geometrically coupled microdevices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(51), 20141-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808808105>
- Sprowitz, A., Pouya, S., Bonardi, S., Van Den Kieboom, J., Mockel, R., Billard, A., Dillenbourg, P., & Ijspeert A. (2010). Roombots: Reconfigurable robots for adaptive furniture. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 5(3), 20-32. <https://doi.org/10.1109/MCI.2010.937320>
- Thalamy, P., Piranda, B., Naz, A., & Bourgeois, J. (2022). VisibleSim: A behavioral simulation framework for lattice modular robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 147, 103913. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103913>
- White, P.J., & Yim, M. (2010). Reliable external actuation for full reachability in robotic modular self-reconfiguration. *International Journal of Robotics Research*, 29(5), 598-612. <https://doi.org/10.1177/0278364909351942>
- Wolfe, K.C., Moses, M.S., Kutzer, M.D., & Chirikjian, G.S. (2012, May). M3Express: A low-cost independently-mobile reconfigurable modular robot. In 2012 International Conference on Robotics and Automation (pp. 2704-2710). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224971>
- Yang, Z., & Zhang, L. (2020). Magnetic Actuation Systems for Miniature Robots: A Review. *Advanced Intelligent Systems*, 2, 2000082. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000082>
- Yim, M., Shen, W.M., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E., & Chirikjian, G.S. (2007). Modular selfreconfigurable robot systems [Grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1), 43-52. <https://doi.org/10.1109/MRA.2007.339623>
- Zhou, H., Mayorga-Martinez, C.C., Pane, S., Zhang, L., & Pumera, M. (2021). Magnetically Driven Micro and Nanorobots. *Chemical Reviews*, 121(8), 4999-5041. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01234>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.06.2022
Kabul Tarihi : 11.08.2022

Received Date : 30.06.2022
Accepted Date : 11.08.2022

GÖMÜLÜ VE SARICI ÖZNETELİK SEÇİM YÖNTEMLERİNİN KULLANILMASI İLE AKCİĞER RAHATSIZLIKLARININ TESPİTİ

DETECTION OF LUNG DISORDERS USING EMBEDDED AND WRAPPER FEATURE SELECTION METHODS

M. Alptekin ENGİN^{1*} (ORCID: 0000-0003-3399-9343)
Selim ARAS² (ORCID: 0000-0003-1231-5782)

¹ Bayburt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye
² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: M. Alptekin ENGİN, maengin@bayburt.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda biyomedikal sinyal işleme alanındaki gelişmelere rağmen, akciğer rahatsızlıklarının tespiti üzerine hızlı ve yüksek doğrulukta çalışan teşhis sistemlerine duyulan ihtiyaç artmaktadır. Yapılan çalışmada fiziki muayene ile 94 farklı kişiden, solunum döngülerinin otomatik olarak tespit edilmesiyle elde edilen 150 adet normal ve 444 adet normal olmayan akciğer sesleri veri tabanı olarak kullanılmıştır. Sınıflandırmada öznetelik olarak frekans ve zaman bölgesinde 12 farklı yöntem uygulanmıştır. Elde edilen öznetelikler gömülü ve sarıcı öznetelik seçim yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemler; özyinelemeli öznetelik eliminasyonu, uyarlanabilir yapı öğrenimi ile öznetelik seçimi, bağımlılık kılavuzlu denetimsiz öznetelik seçimi, sıralı yerellik ile denetimsiz öznetelik seçimi, içbükey küçültme yoluyla öznetelik seçimi, en küçük mutlak büzülme ve seçim operatörü öznetelik seçim yöntemleri olarak isimlendirilmektedir. İncelenen bu öznetelikler doğrusal destek vektör makineleri, k en yakın komşuluk, karar ağaçları ve naive Bayes yöntemleri ile sınıflandırılmıştır. Sonuç olarak öznetelik sayısının sınırlandırılmadığı durum için, özyinelemeli öznetelik eliminasyonu yönteminin k en yakın komşuluk sınıflandırma ile beraber kullanıldığı durum için %97,3 doğruluk değerindeki başarıma ulaşılmaktadır. Öznetelik sayısının üç ile sınırlandırıldığı durumda ise uyarlanabilir yapı öğrenimi ile öznetelik seçimi yönteminin karar ağaçları yöntemi ile beraber kullanılması ile %91,4 değerinde başarıma ulaşılmıştır. Sınıflandırmada solunum döngülerinin otomatik tespit edilmesi ve en uygun özneteliklerin seçilmesi aracılığı ile yüksek doğruluk değerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Solunum sesleri, öznetelik çıkarımı, öznetelik seçimi, sınıflandırma

ABSTRACT

Despite the advances in biomedical signal processing in recent years, the need for fast and highly accurate diagnostic systems for the detection of lung disorders continues. In the study, 150 normal and 444 abnormal lung sounds obtained by automatic detection of respiratory cycles from 94 different people by physical examination were used as a database. Then, 12 different feature extraction methods were applied. Features were evaluated using embedded and wrapper selection methods. These methods are recursive feature elimination, adaptive structure learning, dependence-guided unsupervised feature selection, unsupervised feature selection with ordinal locality, feature selection via concave minimization, least absolute shrinkage, and selection operator feature selection methods. Features are classified by linear support vector machines, k nearest neighbor, decision trees, and naive Bayes methods. As a result, when the number of features is not limited, 97.3% accuracy is obtained when the recursive feature elimination is used together with the k nearest neighbor. In the case where the number of features is limited to three, the classification accuracy of 91.4% was achieved using the adaptive structure learning feature selection and the decision trees. High classification accuracy has been achieved through automatic detection of respiratory cycles and selection of the most appropriate features.

Keywords: Respiratory sounds, feature extraction, feature selection, classification

GİRİŞ

Nefes alış veriş sırasında solunan havanın basıncının hızla değişmesi ve akciğer dokularına çarpması sonucunda oluşan akciğer seslerini kullanarak hastalık tespiti uzun yıllara dayanan bir yöntemdir. Fransız Doktor Laennec'in stetoskopu 1816 yılında keşfi, akciğer seslerinden hastalık teşhisi üzerine bir dönüm noktası teşkil etmektedir (Lehrer, 2008). Daha sonra bu aygıt doktorun simgesi olarak nitelendirilmiştir (Bohadana et al., 2014). Fakat akciğer seslerini sinyal işleme yöntemleriyle analiz etmeye olanak sağlayan elektronik stetoskoplar, günümüze kadar fazla bir değişikliğe uğramayan klasik stetoskopun yerini almaya başlamıştır. Tıp fakültesinden yeni mezun olan doktorlar, akciğer seslerinden hastalık teşhisinde yeterli tecrübeye sahip olmamalarından dolayı zorlanmaktadır (Aras et al., 2018). Bu bakımdan elektronik stetoskoplar sayesinde bu seslerin kaydedilip tekrar dinlenmesi ve değerlendirilmesi mümkündür.

Literatürdeki akciğer sesleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, ses sinyallerinin kayıt edilme şartlarına göre çok kanallı ve tek kanallı akciğer seslerinin kullanıldığı görülmektedir. Farklı web kaynaklarından elde edilen 70 adet wheeze ve 42 adet normal akciğer sesi kullanılan mevcut bir çalışmada kısa zamanlı fourier dönüşümü vasıtası ile sınıflandırmada %90,17 değerindeki doğruluğa ulaşılmıştır (Li & Hong, 2015). Başka bir çalışmada ise ral ve ronküs seslerinin sınıflandırılmasında 60 adet kayıt kullanılmıştır (İçer & Gengeç, 2014). Anlık frekans ortalaması, frekans oranı, değişim zamanı ve öz değerleri kullanılan bu çalışmada destek vektör makineleri (DVM) sınıflandırıcısı kullanarak %80 değerinin üzerinde bir doğruluk elde edilmiştir. Himeshima et al. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise 63 sağlıklı 63 hasta akciğer sesinin sınıflandırılması üzerine birini dışarda bırak çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak %88.7 duyarlılık ve %91,5 özgüllük değerlerine ulaşılmıştır (Himeshima et al., 2012). Mondal et al. tarafından tek kanallı normal ve normal olmayan akciğer seslerinin sınıflandırılması üzerine yapılan çalışmada ise aşırı öğrenme makineleri ve çapraz doğrulama teknikleri beraber kullanılmış ve %86.3 duyarlılık ile %86.9 özgüllük başarımları elde edilmiştir (Mondal et al., 2014). Xie et al. öznelik olarak çok ölçekli temel bileşenler analizini deneysel sınıflandırma yöntemi ile beraber kullanarak normal ve normal olmayan akciğer seslerinin sınıflandırılması için % 98.3 değerinde doğruluk değeri elde etmiştir (Xie et al., 2012). 14 kanallı kayıt yöntemi ile elde edilmiş 21 adet normal olmayan ve 27 adet normal solunum sesleri içeren bir veri tabanı kullanan başka bir çalışmada ise solunum sesi verileri nefes alma ve verme eylemleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Nefes alışta %77.8, nefes verişte %68.9 sınıflandırma doğruluğu değerlerine ulaşılan bu çalışmada autoregressive model ve frekans spektrumu yöntemleri, k en yakın komşuluk sınıflandırıcısı ile kullanılmıştır (Sankur et al., 1994). Palaniappan et al. öznelik olarak autoregressive (AR) model parametreleri ve mel frekans katsayıları (MFCC) kullanarak destek vektör makineleri (DVM) sınıflandırıcısı ile sırası ile %88.7 ve % 89.7 değerindeki doğruluğa ulaşmıştır (Palaniappan et al., 2016). Ayrıca akciğer seslerinin sınıflandırılmasında dalgacık dönüşümü (Koeipensri et al., 2016), doğrusal öngörülü kodlama (Azmy, 2015) gibi yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır.

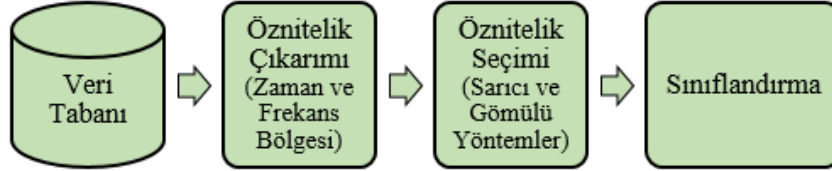
Akciğer sesleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çok kanallı akciğer sesleri daha çok veri barındırmasına rağmen elde edilmesinde hastanın kilolu ve kıllı olması durumunda çok sayıdaki mikrofonun göğüs duvarına yerleştirilmesi oldukça meşakkatli bir işlemdir. Bu bakımdan akciğer seslerinin kayıt edilmesinde tek kanallı kayıt yöntemi daha avantajlıdır. Fakat daha az veri barındıran tek kanallı akciğer seslerinden akciğer hastalıklarının otomatik olarak başarılı bir şekilde tespit edilmesi için elde edilen verinin en uygun şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bakımdan literatürde akciğer seslerinin sınıflandırılmasında gömülü ve sarıcı öznelik seçimi üzerine detaylı bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde veri tabanı olarak az sayıda veri üzerine sınıflandırma işlemi yapıldığı görülmektedir. Veri tabanındaki veri sayısını artırabilmek için ise elde edilmiş yöntemleri farklı olan veri tabanlarının birleştirildiği gözlenmektedir. Ayrıca geçmiş çalışmalarda solunum döngüleri genellikle elle belirlenmekte ya da belirli bir zaman tespit edilerek kayıtlar bu zamana göre bölünmektedir. Bu bakımdan aynı kişiye ait solunum döngülerin bile farklı zamanlarda gerçekleşebildiği göz önüne alındığında bu durum olumsuz bir yapıya tekabül etmektedir.

Yapılan çalışmada, yeterli miktarda veri bulunan ve aynı kayıt yöntemiyle elde edilmiş akciğer ses sinyallerinden oluşan bir veri tabanı toplanmış ve kullanılmıştır. Birden fazla solunum döngüsü içeren bu kayıtlar solunum döngülerinin otomatik olarak tespit edilmesinin ardından uzman hekimler tarafından etiketlenmiştir. Elde edilen tüm akciğer solunum döngüsü seslerine 12 adet farklı öznelik çıkarım yöntemi uygulanmıştır. 35 birim uzunluğundaki öznelik vektörüne sarıcı ve gömülü öznelik seçim yöntemlerinden 6 tanesi uygulanmış ve elde

edilen öznelikler 4 farklı sınıflandırma yöntemi kullanılarak hasta ve sağlıklı akciğer seslerinin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

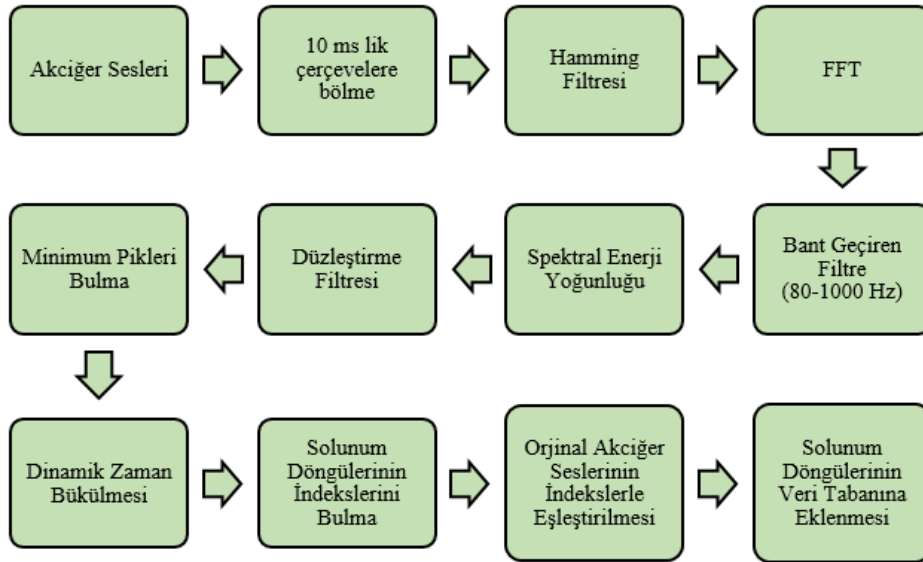
Kullanılan sisteme ait blok diyagram Şekil 1’de gösterilmektedir. Blok diyagram içeriğindeki tüm aşamalar bu bölüm içerisinde ilgili alt başlıklar altında detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 1. Yöntemin Blok Diyagramı

Veri Tabanı

Sınıflandırma sonucunu etkileyen en önemli bileşenlerden biri veri tabanıdır. Akciğer sesleri üzerine yapılan çalışmalarda standart özelliğe sahip bir veri tabanının bulunmayışı ticari bir yazılım ve aygıt geliştirmedeki en önemli eksiklik olarak belirtilmektedir (Gurung et al., 2011). Bu problemin üstesinden gelebilmek için ülkemizde geniş kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Aras, 2018). Bu önceki çalışmamızdaki akciğer sesleri üzerine bir veri tabanının oluşturulmasında ilgili etik kurul izin belgesi alınmıştır. Bu veri tabanındaki sesler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Tıp Fakültesi Göğüs Hastalıkları Bölümü’nde görev yapan iki uzman hekim tarafından uygun diyafram aralığında (20-2000 Hz.) tek kanallı elektronik stetoskop (Thinklabs ds32a+) kullanılarak kaydedilmiş ve etiket değerleri isimlendirilmiştir. Kayıtlarda birden fazla solunum döngüsü bulunduğu için her bir solunum döngüsünü otomatik olarak ayırmak için (Aras et al., 2018)’de belirtilen yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntemin akış şeması Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Akciğer Seslerindeki Solunum Döngülerinin Otomatik Olarak Bulunması

Şekil 2’de aşamaları belirtilen yöntemin kullanılması ile solunum döngülerinin sınırları yani başlangıç ve bitiş süreleri tespit edilmektedir. Tespit edilen bu sınırlar orijinal akciğer seslerine uygulanarak solunum döngüleri otomatik olarak ayırt edilmiştir. Bu şekilde standart bir veri tabanı oluşturulması amaçlanmaktadır. Tüm sınıflandırma işlemlerinde solunum döngüleri otomatik olarak ayrılan orijinal akciğer seslerine ait veri tabanı kullanılmıştır. Bu yöntem ile 94 kişiden elde edilen akciğer sesleri ile oluşturulan veri tabanı Tablo 1’de detaylı olarak gösterilmektedir.

Tablo 1. Veri Setinin Akciğer Ses Tipleri İle Oluşturulması

Kişi Sayısı	Solunum Döngüsü Tipi	Solunum Döngüsü Sayısı
23	Ronküs	150
20	İnce Ral	148
21	Kaba Ral	146
30	Normal	150

Tablo 1’de belirtilen akciğer sesleri incelendiğinde, sağlıklı ve sağlıklı olmayan kişiler üzerine olan bu çalışmada solunum döngüleri normal (150 adet) ve normal olmayan (444 adet) sesler olarak iki kısma ayrılmıştır.

Özniteliklerin Hesaplanması

Yapılan çalışmada, veri tabanında bulunan ses sinyalleri kullanılarak öznitelik elde etme konusunda literatürdeki mevcut çalışmalarda kullanılan 12 farklı zaman ve frekans bölgesi öznitelik çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler; sıfır geçiş oranı (f_1) Denklem 1’de,

$$f_1 = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N |sgn[x_i(n)] - sgn[x_i(n-1)]| \quad (1)$$

Enerji (f_2) Denklem 2’de,

$$f_2 = E(i) = \sum_{n=1}^N [x_i(n)]^2 \quad (2)$$

Enerji entropisi (f_3) Denklem 3’de,

$$f_3 = H_i = - \sum_{j=1}^M e_j \cdot \log_2(e_j) \quad (3)$$

Spektral merkezilik (f_4) Denklem 4’de,

$$f_4 = C_i = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} k X_i(k)}{\sum_{k=1}^{N/2} X_i(k)} \quad (4)$$

Bir çerçevenin yayılımı (f_5) Denklem 5’de,

$$f_5 = S_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N/2} (k - C_i)^2 X_i(k)}{\sum_{k=1}^{N/2} X_i(k)}} \quad (5)$$

Spektral entropi (f_6) Denklem 6’da,

$$f_6 = H = - \sum_{f=0}^{L-1} n_f \cdot \log_2(n_f) \quad (6)$$

Spektral akı (f_7) Denklem 7’de,

$$f_7 = SF_{(i,i-1)} = \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} (X_i(k) - X_{i-1}(k))^2 \quad (7)$$

Spektral devrilme (f_8) Denklem 8’de belirtilmektedir.

$$f_8 = \sum_{k=1}^m X_i(k) = 0.85 \sum_{k=1}^{N/2} X_i(k) \quad (8)$$

Ayrıca yapılan çalışmada MFCC (Volkman et al. 1937) yöntemi kullanılarak elde edilen katsayılar da öznitelik olarak kullanılmıştır ($f_9 \dots f_{21}$). Tüm bu yöntemlere ek olarak, harmonik oran (f_{22}) ve pencerenin temel frekansı

(f_{23}) (Kim et al., 2007) ve renk vektörü (Bartsch & Wakefield, 2005) ($f_{24} \dots f_{35}$) yöntemleri de kullanılarak toplam 35 birim uzunluğunda bir öznitelik vektörü elde edilmiştir.

Özniteliklerin Seçilmesi

Öznitelik seçimi, makine öğrenmesi, örüntü tanıma ve veri madenciliği konularında verimli ve aktif bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır (Mitra & Murthy, 2002). Sınıflandırma problemlerinde öznitelik seçiminin temel avantajı, fazlalık içeren gereksiz verileri indirgeyerek vektör boyutunu düşürmek yani depolama alanından tasarruf etmek ve sınıflandırma verimliliğini artırmaktır (Ladha & Deepa, 2011). Bu bakımdan öznitelik seçimi, ilgili sınıfı en iyi tanımlayabilecek ve birbirleri ile ilişkisi bulunmayan en uygun özniteliklerin elde edilmesidir (Forman, 2003). Öznitelik seçimi, süzgeç, sarıcı ve gömülü yöntemler olmak üzere üç temel başlıkta ele alınmaktadır (Guyon, 2006). Süzgeç tipi yöntemlerde sınıflandırıcıdan bağımsız olarak özniteliklerin muhtevassından çıkarılan bilgiler ile analiz gerçekleştirilmektedir. Sarıcı yöntemlerde öznitelik vektöründen elde edilen alt kümelerin sınıflandırıcı kullanarak başarımlarının ölçümü ile en uygun özniteliklerin elde edilmesi sağlanır. Gömülü yöntemlerde ise en başarılı özniteliklerin seçim işlemi ile sınıflandırıcının öğrenme süreci aynı anda gerçekleşmektedir. Ayrıca öznitelik seçim yöntemlerinin incelenmesinde bir diğer husus ise sınıflandırmadaki etiket değerlerini kullanan denetimli ve etiket değerlerini kullanmayan denetimsiz yöntemlerdir.

Yapılan çalışmada sarıcı ve gömülü öznitelik seçim yöntemleri kullanılmıştır. Sınıflandırıcıdan bağımsız olarak hesaplanmaları, daha hızlı çalışmaları gibi özelliklere sahip olmalarına rağmen başarımları sınırlı olan süzgeç yöntemleri bu çalışmada göz ardı edilmiştir. Kullanılan öznitelik seçim yöntemleri, tipi ve sınıfı Tablo 2'de belirtilmektedir. Ayrıca Tablo 2'de verilen yöntemlerin hesaplama karmaşıklığı da belirtilmektedir. Burada T, örnek sayısı, n, seçilen ilk öznitelik sayısı, i, yinelemeli algoritmalarda kullanılan iterasyon sayısı ve C sınıf sayısına karşılık gelmektedir.

Tablo 2. Öznitelik Seçimi Üzerine Kullanılan Yöntemler

Yöntem	Tipi	Sınıfı	Hesaplama Karmaşıklığı
RFE	Sarıcı	Denetimli	$O(T^2 n \log_2 n)$
FSASL	Sarıcı	Denetimsiz	$O(n^3 + Tn^2)$
DGUFs	Sarıcı	Denetimsiz	$O(n^3 + Tn)$
UFSOL	Sarıcı	Denetimsiz	$O(iTCn^3)$
FSV	Gömülü	Denetimli	$O(T^2 + n^2)$
LASSO	Gömülü	Denetimli	$O(T^2 + n^2)$

Özyinelemeli Öznitelik Eliminasyonu (Recursive Feature Elimination, RFE) (Guyon et al., 2002) yönteminde öznitelikler ilk olarak belirli bir ölçüt kullanılarak sıralanır. Daha sonra her bir adımda ağırlık vektörüne bağlı olarak sıralı bir şekilde geriye doğru eleme şeklinde en küçük sıralama puanına sahip olan öznitelik elenir. Uyarlanabilir Yapı Öğrenimi ile Öznitelik Seçimi (Feature Selection with Adaptive Structure Learning, FSASL) yöntemi temel olarak doğrusal regresyona dayanmaktadır. Bu yöntemde yapı öğrenme ve öznitelik seçimi aynı anda gerçekleşmektedir (Du & Shen, 2015). Güncel yöntemlerden biri olan Bağımlılık Kılavuzlu Denetimsiz Öznitelik Seçimi (Dependence Guided Unsupervised Feature Selection, DGUFs) yönteminde orijinal veriler, küme etiketleri ve seçilen öznitelikler arasındaki karşılıklı bağımlılık dikkate alınır (Guo & Zhu, 2018). Sıralı Yerellik ile Denetimsiz Öznitelik Seçimi (Unsupervised Feature Selection with Ordinal Locality, UFSOL) görelî komşulukların korunması ve mesafeye dayanan kümeleme tabanlı bir yaklaşımdır (Guo et al., 2017). İçbükey küçültme yoluyla öznitelik seçimi (Feature Selection via Concave Minimization, FSV) yönteminde özniteliklerin seçimi lineer programlama tekniği ile ağırlık minimizasyonuna dayanmaktadır (Bradley & Mangasarian, 1998). En Küçük Mutlak Büzülme ve Seçim Operatörü (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, LASSO) (Tibshirani, 1996) yöntemi, çıkış değeri ile model parametrelerinin arasındaki karesel hatalar toplamının yanında regresyon katsayılarının mutlak değerlerinin toplamını da belirli bir değerden az tutarken, tahmin hatasını minimuma indirmeye çalışır.

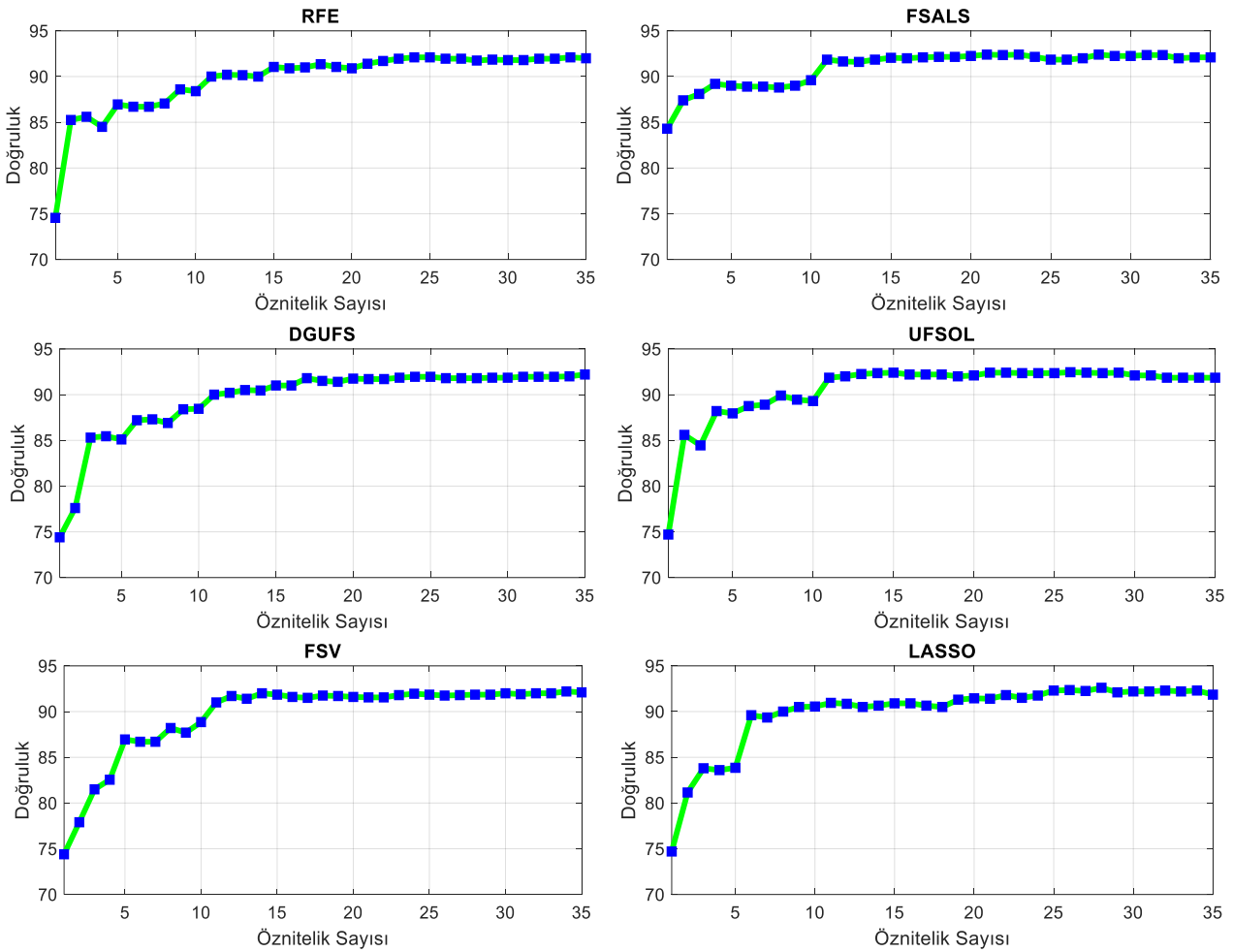
Sınıflandırma Yöntemleri

Yapılan çalışmada, öznitelik seçim aşamasında doğrusal destek vektör makineleri (DVM) sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Veri setinin doğrusal vektörlerle bölünmesi üzerine olan DVM yöntemi, Cortes ve Vapnik tarafından örüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir (Cortes & Vapnik, 1995). Ayrıca yapılan çalışmada öznitelik seçim aşamasındaki en başarılı sonucun elde edilmesinde kullanılan özniteliklerin, farklı sınıflandırıcılardaki performansları da incelenmiştir. Bu sınıflandırıcılar; k en yakın komşuluk sınıflandırıcısı

(KNN), karar ağaçları (KA) ve naive bayes (NB) sınıflandırıcılarıdır. Uygulanan KNN (Fix & Hodges, 1951) sınıflandırma yönteminde birinci dereceden en yakın komşuluklar Öklid mesafesi kullanılarak ele alınmıştır. Uygulanan KA yönteminde ise CART algoritması kullanılmıştır (Sezer et al., 2010). Uygulanan NB yönteminde ise Gauss tipi çekirdek kullanılmıştır (Berrar, 2018).

BULGULAR

Yapılan çalışmada, solunum döngülerinin otomatik olarak algılandığı akciğer seslerinden oluşan veri tabanı kullanılarak 12 farklı yöntem ile 35 birim uzunluğundaki öznitelik vektörü toplam 594 adet ses verisi için elde edilmiştir. Veri seti %80 eğitim ve %20 test olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Daha sonra eğitim aşamasında, elde edilen bu özniteliklere 4 adet sarıcı 2 adet gömülü öznitelik seçim algoritması tatbik edilmiştir. Seçim yöntemlerinde doğrusal destek vektör makineleri sınıflandırıcısı kullanılmıştır.



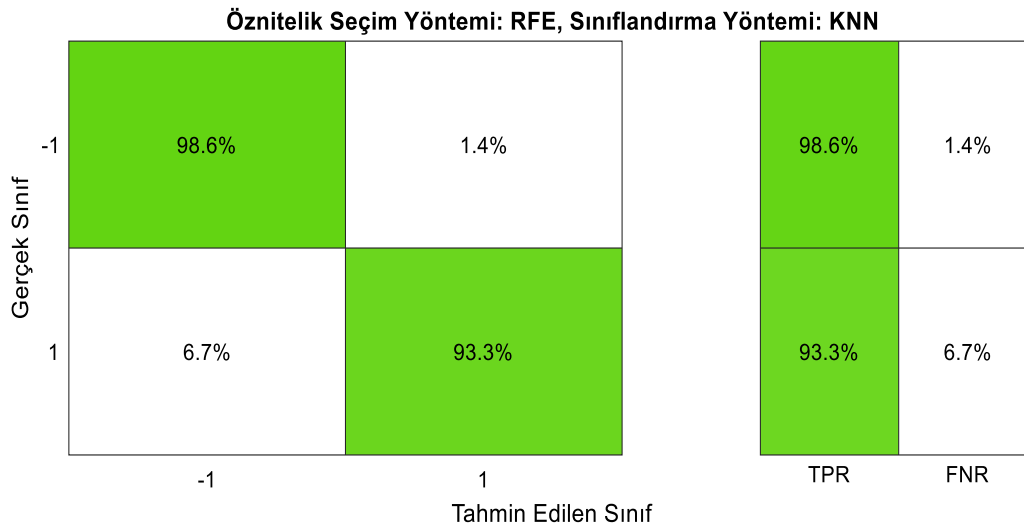
Şekil 3. Kullanılan Yöntemlerin Öznitelik Sayısına Göre Sınıflandırma Doğruluklarının Karşılaştırılması

Ayrıca eğitim aşamasında öznitelik alt kümelerinin öznitelik seçim yöntemleri vasıtasıyla elde edilmesinde 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde eğitim seti 10 eşit parçaya bölünmekte ve bir bölme doğrulama kümesi olmak üzere 10 kez farklı doğrulama kümesi seçilecek şekilde tekrar eden eğitim kümelerine karşılık doğrulama kümesinin başarımının ortalaması ölçülmektedir. Verilen sonuçlar ise eğitim modelinin oluşturulması akabinde eğitimde kullanılmayan test kümesine aittir. Ayrıca test ve eğitim kümelerinin rastgele seçilmelerinden dolayı tüm bu işlemler 10 defa tekrarlanmış ve test işlemi akabindeki doğruluk değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Şekil 3'de kullanılan öznitelik seçim yöntemlerinin öznitelik vektörü boyutuna göre sınıflandırma doğruluklarının karşılaştırılması verilmektedir. Tablo 3'de ise, Şekil 3 de verilen yöntemlerin en başarılı sonuçlara ulaştıkları durumun farklı sınıflandırıcılarda incelenmesine ait sınıflandırma doğrulukları gösterilmektedir. Tablo 3'de belirtilen sınıflandırma yöntemlerinde de 10 kat çapraz doğrulama kullanılmıştır. Rastgele seçimin üstesinden gelebilmek için sınıflandırma işlemi de 10 defa tekrarlanmış ve test işlemi sonucu doğruluk değerlerinin ortalamaları verilmiştir. Tablo 3'de verilen en yüksek başarımdaki sonucun hata matrisi Şekil

4'de verilmiştir. Burada normal akciğer sesleri 1 ile etiketlenirken, normal olmayan akciğer sesleri -1 ile etiketlenmiştir. Yeşil renk doğru pozitif oranı (TPR) gösterirken, renksiz kısım ise yanlış pozitif oranını (FNR) göstermektedir. Sunulan yöntem doğrultusunda hata matrisi yorumlandığında normal olmayan akciğer sesleri %98,6 başarıyla tespit edilirken, normal akciğer sesleri %93,3 başarıyla tespit edildiği gözlemlenmektedir.

Tablo 3. Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Farklı Sınıflandırıcılardaki Başarımları

Yöntem	Öznitelik Boyutu	DVM	KNN	NB	KA
RFE	24	92,1	97,3	88,7	91,8
FSASL	21	92,4	95,3	79,8	90,4
DGUFSS	35	92,2	96,4	85,4	90,4
UFSOL	26	92,5	96,2	84,3	89,9
FSV	34	92,2	96,2	86,2	90,8
LASSO	28	92,6	96,5	84,0	90,9



Şekil 4. RFE ve KNN Yöntemlerinin Beraber Kullanılması İle Elde Edilen Hata Matrisi

En başarılı yöntemin sınıflandırmada %97,3 değerinde bir doğruluğa tekabül etmesine karşılık 24 adet özniteliği kullanması pratikte çok ideal bir durum değildir. Bu sebeple kullanılan öznitelik sayısının üç ile sınırlandırılması durumundaki sınıflandırıcı başarımının karşılaştırılması Tablo'4 de verilmiştir. Burada uygulanan sınıflandırma yöntemlerinin zaman yönünden performansları ise Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 4 ve Tablo 5'deki verilen değerler aynı işlemin 10 defa tekrarlanması sonucunda elde edilen ortalama değerlerdir.

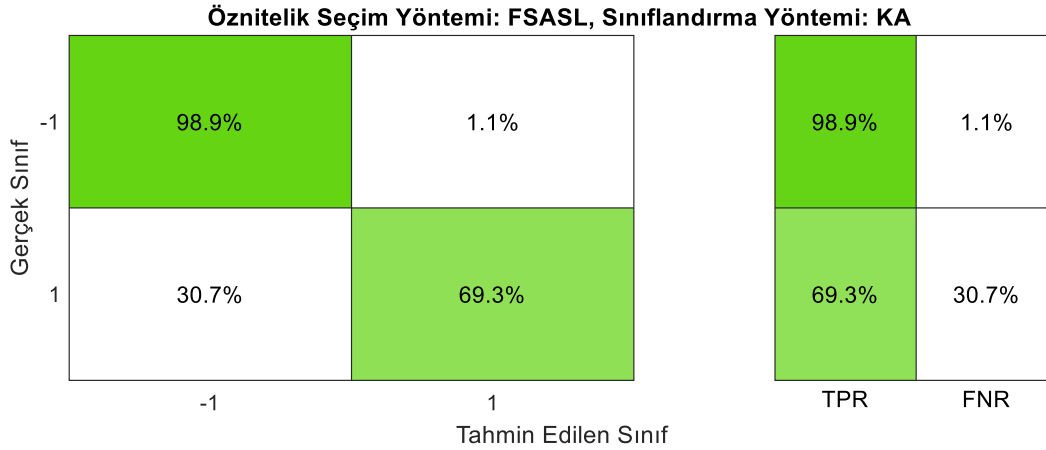
Tablo 4. Belirli Sayıda Öznitelik İle Elde Edilen Sınıflandırma Performansı

Yöntem	DVM	KNN	NB	KA
RFE	85,8	89,4	86,9	87,7
FSASL	88,9	88,2	89,4	91,4
DGUFSS	85,5	88,4	87,2	88,2
UFSOL	85,7	90,9	86,9	87,7
FSV	81,5	87,0	80,0	83,5
LASSO	83,8	85,2	86,0	87,8

Ayrıca Şekil 5'de, Tablo 4'de belirtilen en iyi sonuç için hata matrisi verilmektedir. Burada da normal akciğer sesleri 1 ile etiketlenirken, normal olmayan akciğer sesleri -1 ile etiketlenmiştir. Yeşil renk doğru pozitif oranı (TPR) gösterirken, renksiz kısım ise yanlış pozitif oranını (FNR) göstermektedir. Üç adet özniteliğin belirtilen yöntem ile kullanılması durumundaki hata matrisi yorumlandığında normal olmayan akciğer seslerinin %98,9 başarıyla tespit edildiği görülmektedir.

Tablo 5. Belirli Sayıda Öznitelik İle Elde Edilen Sınıflandırmadaki Eğitim Süreleri

Yöntem	DVM (sn.)	KNN (sn.)	NB (sn.)	KA (sn.)
RFE	1,123	1,056	1,084	1,179
FSASL	1,171	1,162	1,192	1,189
DGUFSS	1,025	1,016	1,125	1,012
UFSOL	1,006	0,989	0,979	0,981
FSV	1,038	1,064	1,032	1,043
LASSO	1,138	1,089	1,083	1,090

**Şekil 5.** FSASL ve KA Yöntemlerinin Beraber Kullanılması İle Elde Edilen Hata Matrisi

Tablo 6'da en başarılı sonuçlara ait farklı performans metrikleri kullanılarak başarımın ölçülmesine yer verilmiştir.

Tablo 6. En Başarılı Yöntemlerin Farklı Metriklerle Sınıflandırma Performansının Ölçülmesi

Yöntem	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
RFE ve KNN	0,93	0,99	0,99	0,96
FSASL ve KA	0,76	0,98	0,99	0,86

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada tek kanal akciğer sesleri kullanılarak normal ve normal olmayan akciğer seslerinin sınıflandırılması için kapsamlı bir öznitelik araştırması gerçekleştirilmiştir. Çok kanallı kayıt yöntemi ile oluşturulan akciğer sesleri daha çok bilgi içermesine rağmen çoklu mikrofonların hastaya bağlanması zor bir işlem olduğundan yapılan çalışmada, tek kanal akciğer sesleri tercih edilmiştir. Buna karşılık tek kanallı kayıt yöntemi ile elde edilen akciğer sesleri muhtevassında daha az veri barındırmaktadır. Bu bakımdan yapılan çalışmada daha az veri ile daha yüksek sınıflandırma başarımına erişebilmek için özniteliklerin verimli bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla farklı öznitelik seçim yöntemleri kullanılmıştır.

Tek kanallı akciğer sesleri kayıt işlemleri sırasında birden fazla solunum döngüsüne sahip olabilmektedirler. Bu bakımdan yapılan çalışmada bu akciğer seslerinin solunum döngülerinin otomatik tespiti ve ayrıştırılması da gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada, zaman ve frekans bölgesine ait ve ses sinyalleri üzerine yapılan geçmiş çalışmalarda çokça tercih edilen, 12 farklı öznitelik elde etme yöntemi kullanılmıştır. Bu 12 farklı yöntem ile elde edilen 35 birim uzunluğundaki öznitelik vektörü, gömülü ve sarıcı öznitelik seçim yöntemlerinden 6 tanesi uygulanarak en başarılı alt kümeler tespit edilmiştir. Kullanılan gömülü ve sarıcı öznitelik seçim yöntemlerinin hesaplama karmaşıklığı göz önünde bulundurulduğunda işlem yükü ağır olan yöntemlerdir. Fakat en başarılı sonuçlara ulaşılması ve sınıflandırma modelinin oluşturulması için tek sefer için gerçekleştirilecek bu işlemlerin yoğunlukları kabul edilebilir düzeydedir. Yapılan çalışmada öznitelik sayısı sınırlandırılmadığı durum için RFE öznitelik seçim yönteminin KNN sınıflandırma yöntemi ile beraber kullanıldığı durum için 24 adet öznitelik kullanılması ile %97,3 değerinde sınıflandırma başarımına ulaşılmaktadır. Fakat 24 adet öznitelik hem elde edilmiş hem de sınıflandırma işlem süresi açısından oldukça büyük bir sayıya tekabül etmektedir. Dolayısıyla öznitelik sayısının üç ile sınırlandırıldığı durum için de başarımlar ölçülmüştür.

Öznitelik sayısının 3 ile sınırlandırıldığı durum için FSASL öznitelik seçim yönteminin KA sınıflandırma yöntemi ile beraber kullanılması ile %91,4 değerinde sınıflandırma başarımına ulaşılmıştır. Ayrıca araştırılan bir diğer konu ise sınıflandırma işlemlerinde sınıflandırıcıların eğitim süresinin hesaplanmasıdır. Öznitelik sayısının 3 ile sınırlı tutulduğu durum için kullanılan 4 farklı sınıflandırma yönteminde de yaklaşık aynı eğitim süresine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu eğitim süresi ise yaklaşık 1 sn. civarındadır. Ayrıca yapılan tüm çalışmalarda Intel i5-11400H işlemciye sahip bir bilgisayar ve Matlab2021b ortamı kullanılmıştır.

Akciğer sesleri üzerine yapılan çalışmalarının dezavantajlarından biri, bu çalışmalarda kullanılan yaklaşımların standardizasyonunun olmamasıdır. Ayrıca bu alanda yapılan çalışmaları karşılaştırmak için ortak bir uluslararası standart veri tabanı bulunmamaktadır. Bu nedenle, yapılan çalışmanın sonuçlarını diğer çalışmaların sonuçlarıyla birebir adil bir karşılaştırma mümkün değildir. Buna rağmen sunulan yöntem vasıtası ile elde edilen sonuçların farklı kayıt yöntemleri ve farklı akciğer sesleri üzerine yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmasına ait sonuçlar Tablo 7’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Sunulan Yöntemin Karşılaştırılması

Yöntem	Veri	Sınıflandırma	Doğruluk
(Yılmaz & Kahya, 2006)	27 Normal-21 Normal olmayan Çok Kanal Akciğer Sesleri	AR Model ve KNN	Nefes Veriş %77,8 Nefes Alış %68,9
(Şen et al., 2015)	20 Normal-20 Normal olmayan Çok Kanal Akciğer Sesleri	AR Model & Gauss Karışım Modeli ve DVM	%90,0
(Kim et al., 2021)	1222 Normal-696 Normal olmayan Tek Kanal Akciğer Sesleri	Derin Öğrenme	%85,7
Sunulan	150 Normal-444 Normal olmayan Tek Kanal Akciğer Sesleri	RFE ve KNN	%97,3
Sunulan	150 Normal-444 Normal olmayan Tek Kanal Akciğer Sesleri	FSASL ve KA	%91,4

Tablo 7 incelendiğinde Yılmaz ve Kahya tarafından gerçekleştirilen çalışmada solunum döngülerine ait nefes alış ve veriş aşamaları el ile ayrılmıştır. Çok kanal akciğer sesleri için bu işlemin elle gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Solunum döngülerinin bu şekilde ayrılması yüzünden sınırlı sayıda veri ile gerçekleştirilen bu çalışmada karşılaştırılan diğer yöntemlere nazaran daha düşük değerlerde sınıflandırma doğruluğuna ulaşılmaktadır (Yılmaz & Kahya, 2006). Şen et al. tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise yine çok kanallı akciğer sesleri kullanılmış ve Gauss karışım modeli vasıtasıyla yine küçük çapta bir veri tabanı kullanılarak daha yüksek bir başarıma ulaşılmaktadır (Şen et al., 2015). Çok kanallı akciğer seslerinin sağlıklı ve patolojik ayrımının yapıldığı ve sınırlı sayıda veri kullanılan bu iki çalışma daha çok özniteliklerin çıkarımı üzerinedir. Kim et al., tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise yeterli miktarda tek kanal akciğer sesleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada veri tabanının oluşturulmasında belirli süre boyunca elde edilen birden fazla solunum döngüsü el ile ayrılarak kullanılmıştır. Yöntem olarak ses sinyallerinin spektrum görüntülerinin evrimsel sinir ağı yapıyla beraber kullanılması sonucunda yüksek başarıma ulaşılabileceği gösterilmiştir. Tarafımızdan sunulan yöntemlerde ise farklı özniteliklerin başarımlarının öznitelik seçimi ile farklı sınıflandırıcılardaki tek kanallı akciğer sesleri üzerine etkisi yeterli veri kullanılarak incelenmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, tek kanallı akciğer seslerinin belirtilen öznitelik seçim yöntemleri ile beraber kullanılması durumunda daha yüksek başarımlara ulaşılabileceği görülmektedir. Sunulan yöntem, kullanılan veri tabanındaki solunum döngülerinin otomatik olarak tespit edilmesi yönüyle de diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Hem öznitelik sayısının sınırlandırılmadığı RFE ve KNN yöntemlerinin beraber kullanıldığı durum için, hem de öznitelik sayısının sınırlandırıldığı FSASL ve KA yöntemlerinin beraber kullanıldığı durum için, doğruluk değerleri karşılaştırılan diğer çalışmalardan daha yüksektir.

Akciğer seslerinin solunum döngülerinin otomatik olarak elde edilmesi ile sınıflandırılmasının gerçekleştirildiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, ilgili alanda tasarlanacak tamamen otomatik olarak çalışan ve sadece doktorların onayı ile hastalık teşhisinde kullanılabilecek bir cihazın tasarımı için temel teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

- Aras, S. (2018). Tek Kanallı Yaygın Akciğer Seslerinden Solunum Döngülerinin Otomatik Algılanması ve Sınıflandırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Trabzon 119s.
- Aras, S., Öztürk, M., & Gangal, A. (2018). Automatic detection of the respiratory cycle from recorded, single-channel sounds from lungs. *The Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26, 11–22.
- Azmy, M. M. (2015). Classification of lung sounds based on linear prediction cepstral coefficients and support vector machine. IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT), 1–5.
- Bartsch, M. A., & Wakefield, G. H. (2005). Audio thumbnailing of popular music using chroma-based representations. *IEEE Transactions on Multimedia*, 7, 96–104.
- Berrar, D. (2018). Bayes' theorem and naive Bayes classifier. Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics. Elsevier Science Publisher.
- Bohadana, A., Izbicki, G., & Kraman, S. S. (2014). Fundamentals of lung auscultation. *The New England Journal of Medicine*, 370, 744-751.
- Bradley, P. S., & Mangasarian, O. L. (1998). Feature selection via concave minimization and support vector machines. In Machine Learning Proceedings of the Fifteenth International Conference (pp. 82–90).
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20, 273–297.
- Du, L., & Shen, Y. D. (2015). Unsupervised feature selection with adaptive structure learning. In Proceedings of the 21th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 209–218).
- Fix, E., & Hodges, J. L. (1951). Discriminatory Analysis, Nonparametric Discrimination: Consistency Properties USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field (pp. 1-21). Texas, Tech. Report 4.
- Forman, G. (2003). An extensive empirical study of feature selection metrics for text classification. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 1289–1305.
- Guo, J., Quo, Y., Kong, X., & He, R. (2017). Unsupervised feature selection with ordinal locality. In IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME) (pp. 1213–1218).
- Guo, J., & Zhu, W. (2018, April). Dependence guided unsupervised feature selection. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 32, No. 1).
- Gurung, A., Scrafford, C. G., Tielsch, J. M., Levine, O., & Checkley, W. (2011). Computerized lung sound analysis as diagnostic aid for the detection of abnormal lung sounds: a systematic review and meta-analysis. *Respiratory Medicine*, 105(9), 1396–1403.
- Guyon, I. (2006). Feature extraction: foundations and applications. Springer Science & Business Media.
- Guyon, I., Weston, J., & Barnhill, S. (2002). Gene selection for cancer classification using support vector machines. *Machine Learning*, 46, 389–422.
- Himeshima, M., Yamashita, M., Matsunaga, S., & Miyahara, S. (2012, August). Detection of abnormal lung sounds taking into account duration distribution for adventitious sounds. In 2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) (pp. 1821-1825). IEEE.
- İçer, S., & Gençgeç, Ş. (2014). Classification and analysis of non-stationary characteristics of crackle and rhonchus lung adventitious sounds. *Digital Signal Processing*, 28, 18–27.
- Kim, H. G., Moreau, N., & Sikora, T. (2007). MPEG-7 audio and beyond: Audio content indexing and retrieval. Nashville, TN: John Wiley & Sons.
- Kim, Y., Hyon, Y., Jung, S. S., Lee, S., Yoo, G., Chung, C., & Ha, T. (2021). Respiratory sound classification for crackles, wheezes, and rhonchi in the clinical field using deep learning. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11.
- Koeipensri, T., Boonchoo, P., & Sueaseanak, D. (2016). The development of biosignal processing system (BPS-SWU V1. 0) for learning and research in biomedical engineering. In 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON) (pp. 1–4). Laos.

- Ladha, L., & Deepa, T. (2011). Feature selection methods and algorithms. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 3(5), 1787–1797.
- Lehrer, S. (2008). *Understanding lung sounds with audio CD* (3rd ed.). London, England: W B Saunders.
- Li, J., & Hong, Y. (2015, December). Wheeze detection algorithm based on spectrogram analysis. In 2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID) (Vol. 1, pp. 318-322). IEEE.
- Mitra, P., & Murthy, C. A. (2002). Unsupervised feature selection using feature similarity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(3), 301–312.
- Mondal, A., Bhattacharya, P., & Saha, G. (2014). Detection of lungs status using morphological complexities of respiratory sounds. *ScientificWorld Journal*, <https://doi.org/10.1155/2014/182938>
- Palaniappan, R., Sundaraj, K., & Lam, C. K. (2016). Reliable system for respiratory pathology classification from breath sound signals. In IEEE International Conference on System Reliability and Science (ICSRS).
- Sankur, B., Kahya, Y. P., Çağatay, G. E., & Engin, T. (1994). Comparison of AR-based algorithms for respiratory sounds classification. *Computers in Biology and Medicine*, 24(1), 67–76.
- Şen, I., Saraclar, M., & Kahya, Y. P. (2015). A Comparison of DVM and GMM-Based Classifier Configurations for Diagnostic Classification of Pulmonary Sounds. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(7), 1768–1776.
- Sezer, E. A., Bozkır, A. S., Yağız, S., & Gökçeoğlu, C. (2010). Karar Ağacı Derinliğinin CART Algoritmasında Kestirim Kapasitesine Etkisi: Bir Tünel Açma Makinesinin İlerleme Hızı Üzerinde Uygulama. *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu*.
- Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)*, 58, 267–288.
- Volkman, J., Stevens, S. S., & Newman, E. B. (1937). A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 8, 185–190.
- Xie, S., Jin, F., Krishnan, S., & Sattar, F. (2012). Signal feature extraction by multi-scale PCA and its application to respiratory sound classification. *Medical & biological engineering & computing*, 50(7), 759-768.
- Yilmaz, C. A., & Kahya, Y. P. (2006). Multi-channel classification of respiratory sounds. In 28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (pp. 2864–2867). New York, USA.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.06.2022
Kabul Tarihi : 09.08.2022

Received Date : 30.06.2022
Accepted Date : 09.08.2022

NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) UYGULAMALARI İÇİN POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ METAMALZEME EMİCİ TABANLI ENERJİ HASATLAMA

POLARIZATION-INDEPENDENT METAMATERIAL ABSORBER BASED HARVESTING FOR INTERNET OF THINGS (IOT) APPLICATIONS

Ayşe İNCESU DOKUMACI^{1*} (ORCID: 0000-0001-9746-1935)

Vedat ÖZKANER² (ORCID: 0000-0001-8293-0022)

Muharrem KARAASLAN² (ORCID: 0000-0003-0923-1959)

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik Programı Bölümü, Kilis, Türkiye

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İskenderun, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ayşe İNCESU DOKUMACI, ayseincesu@kilis.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Nesnelerin İnterneti (IoT) için metamalzeme emici tabanlı enerji hasatlayıcı önerilmiştir. Önerilen metamalzeme yapının ön yüzeyi bakır rezonatör ile dielektrik malzemeden ve arka yüzey de tamamen bakırdan oluşmaktadır. Önerilen metamalzeme tabanlı emici 2.44 GHz ve 4.33 GHz mikrodalga frekanslarında çalışmaktadır. Bu çalışmada enine elektrik (TE), enine manyetik (TM) ve enine elektromanyetik (TEM) modları sayısal olarak incelenmiş ve emilim değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı simülasyon programı kullanılmış ve FIT tabanlı simülasyon sonuçlarına göre 2.44 GHz'de emilim tepe noktası yaklaşık %91 ve 4.33 GHz frekansta ise emilim tepe noktası %97'dir. Sunulan yapının sinyal emici özelliği sayesinde hapsolan elektromanyetik enerji yerleştirilen dirençler üzerinden elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Bu çalışmanın amacı ISM çalışma frekanslarında metamalzeme emici tabanlı hasatlayıcı ile elektromanyetik dalgaların enerji emilimi ve dönüşümü daha küçük yapılarla sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler: IoT teknoloji, metamalzeme, sinyal emici

ABSTRACT

In this study, a metamaterial absorber based energy harvester is proposed for the Internet of Things (IoT). The front surface of the proposed metamaterial structure consists of copper resonator and dielectric material, and the back surface is completely copper. The proposed metamaterial-based absorber operates at microwave frequencies of 2.44 GHz and 4.33 GHz. In this study, transverse electric (TE), transverse magnetic (TM) and transverse electromagnetic (TEM) modes were numerically investigated and their absorption values were compared. In this study, Finite Integration Technique (FIT) based simulation program was used and according to the FIT based simulation results, the absorption peak is approximately 91% at 2.44 GHz and 97% at 4.33 GHz frequency. Thanks to the signal absorbing feature of the presented structure, the trapped electromagnetic energy converted into electrical energy through resistors placed. The aim of this study is to provide energy absorption and conversion of electromagnetic waves with a metamaterial absorber based harvester at ISM operating frequencies with smaller structures.

Keywords: IoT technology, metamaterial, absorber

ToCite: İNCESU DOKUMACI, A., ÖZKANER, V., & KARAASLAN, M., (2022). NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) UYGULAMALARI İÇİN POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ METAMALZEME EMİCİ TABANLI ENERJİ HASATLAMA. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 461-471.

GİRİŞ

Nesnelere interneti (IoT) geçmişten günümüze kadar kullanılan insan-makine iletişiminin yerini almaya hazırlanan bir adaydır. IoT, insan müdahalesi olmadan cihazdan cihaza iletişimi mümkün kılar. Akıllı bir evde yaşamaktan tıp endüstrisine ve nanosensörlerin kullanım alanlarına kadar neredeyse tüm modern hayatı her yönden etkileyecek bir teknolojidir. Nesnelere interneti (IoT) cihazların gelecekte tamamen tüm hayatımızda olması beklenmektedir. Düşük güçlü IoT cihazlarında önemli miktarda enerji tüketen sensörler IoT teknolojisinin önemli elemanlarından bir tanesidir. Elektromanyetik dalgalar kullanılarak enerji hasadı ile sağlanan enerji tıp, gıda ve tarım gibi çeşitli sektörlerde tercih edilen düşük güçlü sensörlerin çalışması için kullanılabilir. Tarım alanında IoT teknolojisinde yağış, sıcaklık, toprak nemi gibi sensörler ya yerin altında ya da üstünde kullanılmaktadır (Mattsson et al., 2018). Yerin üstünde bulunan sensörlerin çalışması için gerekli olan enerji pil veya güneş pilleri gibi seçeneklerle sağlanmaktadır. Fakat bunlar pahalı olması, çevre sorunları ve uzak alanlara erişilmesinin zorlukları gibi nedenlerden dolayı dezavantaj getirmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için de en iyi çözüm elektromanyetik dalgaların enerjisini kullanmaktır. Bununla ilgili bir çalışmada elektromanyetik enerji hasadı kullanarak kablosuz tıp uygulamasında giyilebilir bir sensör önerilmiştir (Biswas et al., 2018).

Yeni nesil IoT cihazlarının hem iletim hem de güç aktarımı açısından tamamen kablosuz olması gerekmektedir. Günümüzde sensörlerin güç kaynaklarından uzak mesafede olması nedeniyle kablosuz güç aktarımı önem kazanmıştır. Ortamdaki enerjiyi kullanmak IoT cihazlarına güç sağlamak için bir alternatif olmaktadır. Ortam enerji kaynaklarından bazıları da güneş, termal, mekanik enerjilerdir fakat pratik olmadığı ve maliyetli olduğu için bu teknolojide tercih edilmemektedir. Bu ortam enerji kaynak çeşitleri arasında düşük güçlü IoT teknolojisinde cihazları şarj etmek için elektromanyetik dalgalar kullanılabilir. Yaşam alanlarında sinyallerin olmadığı bir ortam neredeyse yoktur. Cep telefonları ve Wifi vericileri gibi kablosuz teknoloji elemanlarının bulunmasıyla büyük miktarda elektromanyetik enerji sağlamak mümkündür. Aynı zamanda diğer ortam kaynak çeşitlerine göre elektromanyetik enerjiyi toplamak daha az alt yapı gerektirmektedir.

Metamalzeme doğada bulunmayan özelliklere sahip bir malzemedir. Metamalzemeler, etkin dielektrik katsayısı $\epsilon(\omega)$ ve etkin manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ ile karakterize edilmektedir. IoT teknolojisini daha yaygın kılmak için enerji hasadı ve algılama tasarımlarında metamalzeme kullanmak enerji kullanımını daha verimli hale getirecektir. Bunun nedeni ise düşük güçlü ortamda yayılan elektromanyetik enerjiyi absorbe etme yeteneğinin daha yüksek olmasıdır. Sensörlerin duyarlılığını artırmak için mükemmel metamalzeme emici yapısı tasarlanarak IoT cihazların ve sensörlerin işlevselliğini de artırmak mümkündür. Aynı zamanda metamalzeme yapıları ile yayılan elektromanyetik dalganın büyük çoğunluğunun absorbe edilmesini artırarak enerji hasadının daha verimli hale gelmesi sağlanacaktır (Kaur et al., 2019). Metamalzeme mükemmel emici yapısı bant durdurucu filtreye benzemektedir. Yayılan sinyaller rezonans frekansında ne iletilir ne de yansıtılır. Bu da iletilen sinyallerin (S_{21}) ihmal edilecek kadar az olduğu fakat sıfır olmadığı anlamına gelir. Metamalzeme mükemmel emiciler, farklı uygulamalarda da tercih edilmektedir. Bunlardan metamalzeme sensör (Bakir et al., 2016; Bakir et al., 2018), optik anahtarlama (Hajizadegan et al., 2018), enerji hasadı (Unal et al., 2015; Bağmancı et al., 2018) ve istenmeyen frekans emilimi (Costa et al., 2013) uygulamaları en çok kullanılanlardır.

Ortamdaki elektromanyetik sinyallerin emilimini sağlamak için geleneksel ferrit ve yüksek kayıplı dielektrik levhaların yerini metamalzeme emici yapıları almıştır. Bu malzemelerin özellikleri sayesinde verimlilik artmış ve maliyet azalmıştır. Literatürde bununla ilgili çalışmalara bakıldığında; ortamdaki elektromanyetik sinyallerden WiFi sinyallerini absorbe etmek için fraktal şekilli metamalzeme mükemmel emici tasarlanmıştır ve üç geniş emilim bandı elde edilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan yapı 2.4 ve 5 GHz frekans spektrumunda çalışan uygulamalar için uygundur (Amiri et al., 2019).

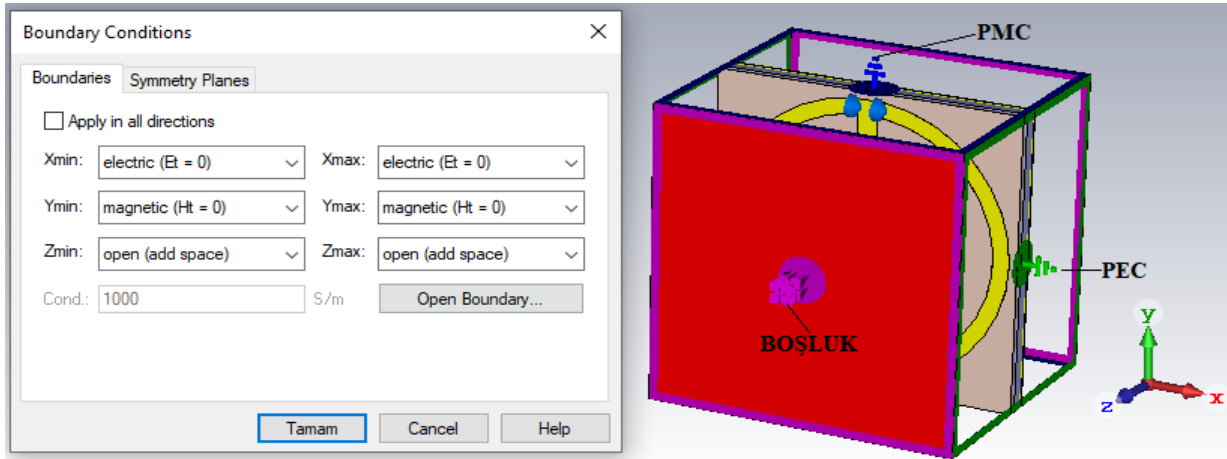
Kullanılan çoğu IoT uygulamaları GSM ve WiFi ticari frekans bantlarında çalışmaktadır. 5G teknolojisinin ilerlemesiyle buna 23 ile 64 GHz frekans spektrumu da eklenecektir. Yüksek frekansların uzun menzilli iletimi zordur fakat kimyasal ve biyolojik algılama, tıbbi teşhis ve yüksek veri hızlı kısa yollu kablosuz iletişim gibi avantajları vardır. Yüksek frekansta yapının boyutunun küçülmesiyle karmaşıklık oluşmaktadır. Burada istenilen emilim bantlarını elde etmek için rezonatör şekilleri olan esnek ve dayanıklı özelliğe sahip metamalzeme kullanılması umut verici bir çözümdür. Literatüre bakıldığında metamalzeme emici tabanlı hasatlayıcı tasarımları genellikle ön yüzeyi ayrık dikdörtgen veya halka rezonatörden arka yüzeyleri de bakır levhadan oluşmaktadır (Dincer et al., 2016). Metamalzeme mükemmel emici yapıları kullanarak yüksek frekanslarda emilim sağlamak için dielektrik olarak silikon ve iletken olarak altın tercih edilmiştir (Redo-Sanchez et al., 2013). Yapılan bir çalışmada

altın alttaş filmi ile silikon çubuk şekilli rezonatör çiftleri kullanarak dört emilim bantlı metamalzeme mükemmel emici tasarlamışlardır (Liu et al., 2020). Bu tasarım dalga boylarını ayarlamaya yarayan optoelektronik cihazlarda kullanmak için önerilmiştir. Diğer bir çalışmada ise alttaş olarak silikon kullanıldığı ve iletken olarak altından oluşan iç içe geçmiş kare halkalardan oluşan mükemmel metamalzeme emici tasarlanmıştır ve yapılan ölçüme göre yüksek verimliliğe sahip olduğu gösterilmiştir (Wang et al., 2014). Kablosuz iletim bantlarında enerji hasadı uygulamaları için çok katmanlı kare bölünmüş halka rezonatör yapısından oluşan metamalzeme emici yapısı önerilmiştir (Karaaslan et al., 2017). Önerilen metamalzeme emici yapısı tüm çalışma frekanslarında yüksek emilime sahip olduğu ve polarizasyon açısından bağımsız olduğu gösterilmiştir. Farklı bir çalışmada ise metamalzeme emici tabanlı elektromanyetik enerji toplayıcı tasarlanmıştır. Tasarlanan yapı ISM bandında 2.4 GHz'de çalışmaktadır. Kare halka rezonatör yapılarından oluşan tasarımda boşluklara direnç eklenmesiyle güç emilimi sağlanmış ve enerji hasadı uygulaması için %83,6 verimlilik elde edilmiştir (Dincer et al., 2016). Enerji hasadı uygulaması için metamalzeme mükemmel emici yapısı üzerine ek bir parçanın eklenmesiyle emilim frekansı ve oranı üzerine olumlu etkisi olduğu bir çalışma yapılmıştır (Shang et al., 2017). Burada ek parçaların emilim üzerine etkisini azaltmak ve doğru akım çıkışını yükseltmek için direnç ve diğer elemanlar tasarlanan yapının arka tarafına yerleştirilmiştir. Bu uygulama metamalzeme alıcı ve doğrultucunun birleşimi olan yöntemlerden biridir.

Bu çalışmada IoT teknolojisinde kullanılan sensörlerin güç aktarımını sağlamak için metamalzeme emici ve hasatlayıcı tasarlanmıştır. IoT teknolojisinde tercih edilen frekanslar, ISM bant frekanslarıdır. ISM bant frekanslarından da çoğunlukla 4.33GHz, 915MHz, 2.4GHz ila 5GHz kullanılmaktadır. Önerilen birim hücre 2.44 GHz frekansında %91 ve 4.33 GHz frekansında ise %97 sinyal emilimi sağlamaktadır. Tasarlanan MTM tabanlı yapı sinyal emici özelliğinin yanı sıra enerji hasatlama özelliği de bulunmaktadır.

MATERYAL VE METOT

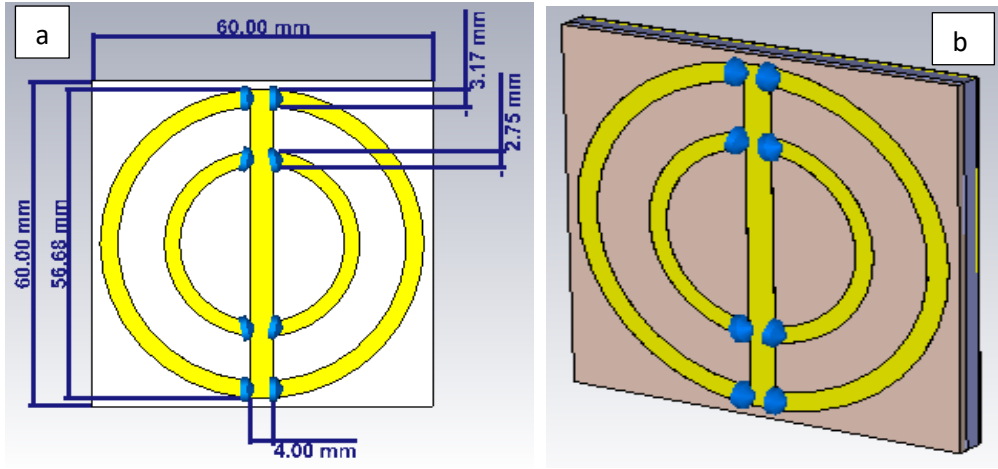
Önerilen birim hücre tasarımı Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı benzetim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TEM modu simülasyonu için benzetim programının sınır koşulu elektrik, manyetik ve simülasyonda açık alan olarak ayarlanmıştır. Tasarlanan birim hücrenin numerik analizde sınır koşulu x-yönünde PEC, y-yönünde PMC ve z- yönünde boşluklu açık olarak Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. FIT Tabanlı Yazılım Programında Önerilen Yapının Sınır Koşulları

Tasarlanan yapının birim hücresi; bakır rezonatör, FR4 dielektrik katmanı, hava ve bakır levha olmak üzere dört tabakadan oluşur. Sarı alanlar bakır metal rezonatör tabakayı ve beyaz alanlar FR4 yalıtkan malzemesini temsil etmektedir. Bakır rezonatörün elektrik iletkenliği $\sigma = 5.8 \times 10^8$ S/m ve FR4 yalıtkan malzemesinin kalınlığı 1.6 mm, kayıp tanjantı 0.025 ve bağıl dielektrik sabiti 4.3'tür. FR4 dielektrik katmanının en ve boyu 60mm'dir. Bakır rezonatörün kalınlığı 0.035 mm'dir. Sinyal emilimini artırmak ve rezonans frekansını ayarlamak için 3.10 mm kalınlıkta hava boşluğu, rezonatör ve arka bakır levha arasına yerleştirilmiştir. Ön ve arka rezonatör, elektromanyetik enerjiyi manipüle etmek için kullanılmakta ve birbiri arasında elektrik bağlantısına sahip değildir. Birim hücrenin arka tabakasının tamamen bakır levha ile kaplanmasından dolayı iletim değeri sıfırdır. Bu nedenle emilim değeri tamamen yapıdan yansıma değerine bağlıdır. Yapı tasarımının en önemli kısımlarından biri rezonatör tabakalarının doğru yerleşmesidir. İstenilen çalışma frekanslarını yakalayabilmek için yapı iç içe geçmiş ayrıık rezonatör yapısı oluşturulmuştur. Şekil 2'de direnç elemanları mavi, bakır rezonatörler ise sarı renklidir. Şekil 2'de

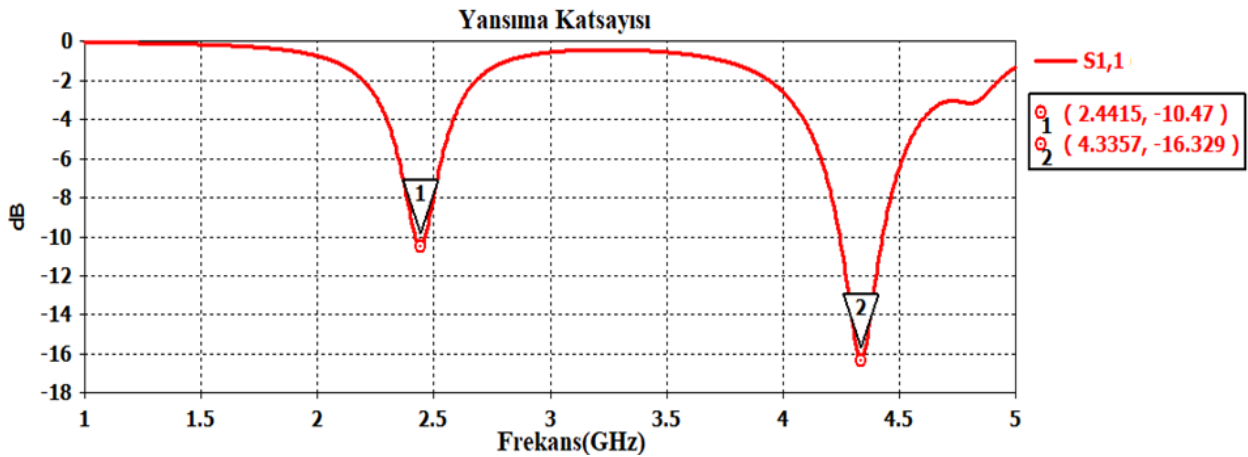
görüldüğü gibi dıştaki rezonatör 3.17 mm, içteki rezonatör de 2.75 mm kalınlığındadır. Rezonatörler arasında dikdörtgen yapı bulunmaktadır. Yapının ön yüzeyinde 1000 Ω değerinde dirençler yerleştirilmiştir. Böylece sinyal emici özelliği sayesinde ortamdan elde ettiği elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjiye dönüştürmektedir. Birim hücrenin arka kısmı da 0.20 mm kalınlığında bakır levha ile kaplanmıştır.



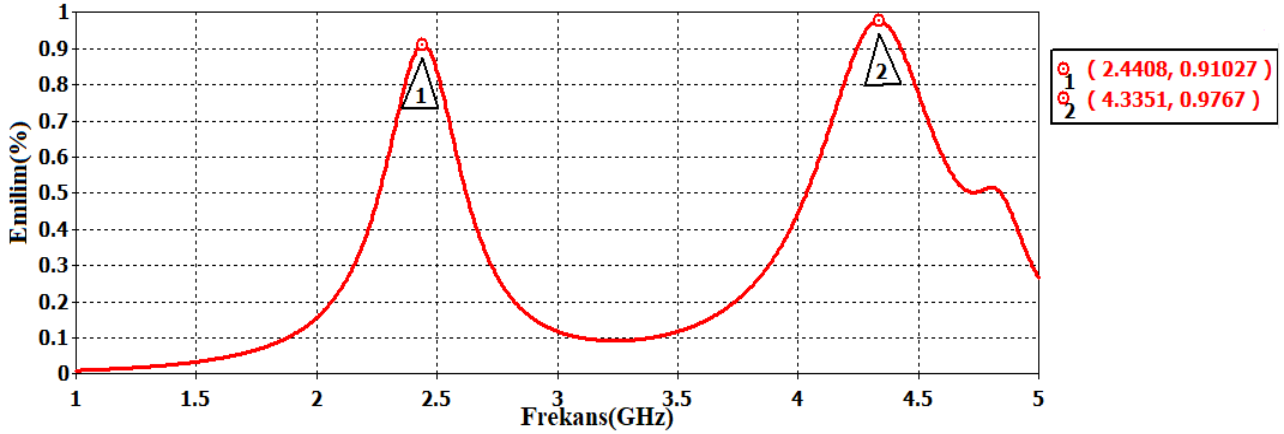
Şekil 2.a. Önerilen Birim Hücrenin Önden Görünümü b. Birim Hücrenin Perspektif Görünümü

Bir metalmazeme tabanlı sinyal emici için en önemli özellik, gelen elektromanyetik dalganın önerilen yapıda maksimum nüfuz etmesini sağlamak için bakır plaka ile yapının arka tarafını kaplamaktır. Yapı tarafından emilen elektromanyetik güç, yük üzerinde kaybolan güç ile hesaplanabilir. Emilen güç, emilim değeri $A(\omega)$ ile gösterilir. Emilim değeri $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ eşitliğinden elde edilir. Burada $R(\omega) = |S_{11}|^2$ yansımaya katsayısı $T(\omega) = |S_{21}|^2$ iletim katsayısıdır. Hava tabakasının arkası tamamen bakır levha olduğu için iletim olmayacaktır. Ortamda var olan mikrodalga enerjisi, önerilen MTM emicide hapsolür. Böylece mükemmel emilim olduğu için enerji hasadı yükselir. Bu benzetim çalışmasında 1000 Ω değerinde direnç elemanı kullanılmıştır. MTM emici için ortamın etkin dielektrik $\epsilon(\omega)$ ve etkin manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ değerlerini ayarlayarak gelen hem elektrik alan hem manyetik alan için emilim yapması sağlanır.

Şekil 3’de görüldüğü gibi önerilen birim hücrenin gelen dalganın TEM olması halinde rezonans frekanslarında yansımaya katsayısı (S_{11}) değeri verilmiştir. Simüle edilen yansımaya katsayısı 2.44 GHz’de -10 dB ve 4.33 GHz’de -16 dB’dir. Aynı şekilde tasarlanan yapının Şekil 4’de görüldüğü gibi emilim değeri incelendiğinde gelen dalganın 2.44 GHz’de %91, 4.33 GHz’de %97’nin emildiği görülmektedir.



Şekil 3. Önerilen Yapının dB Cinsinden Simüle Edilmiş Yansımaya Katsayısı

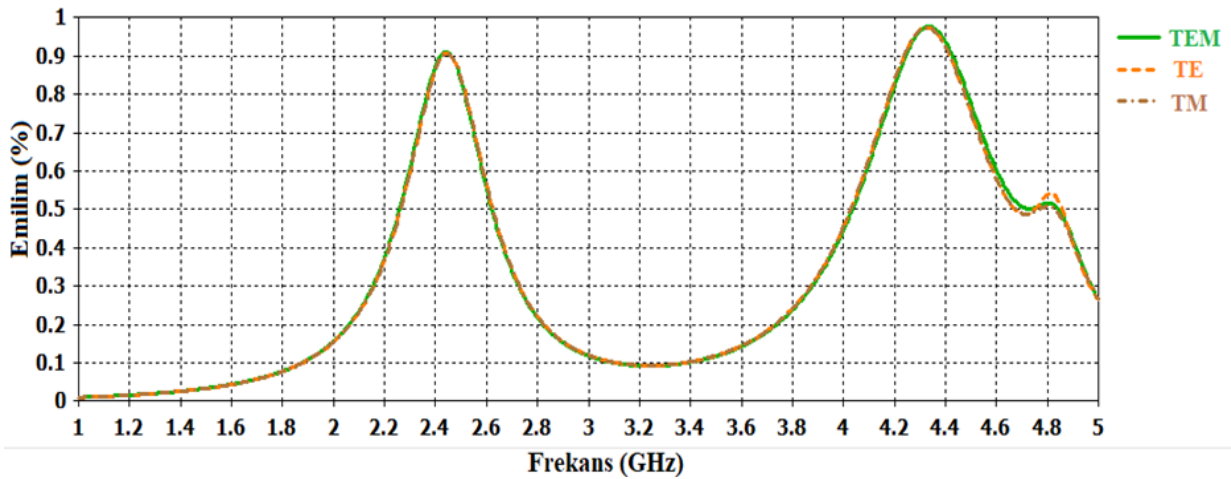


Şekil 4. Önerilen Yapının Emilim Değerleri

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

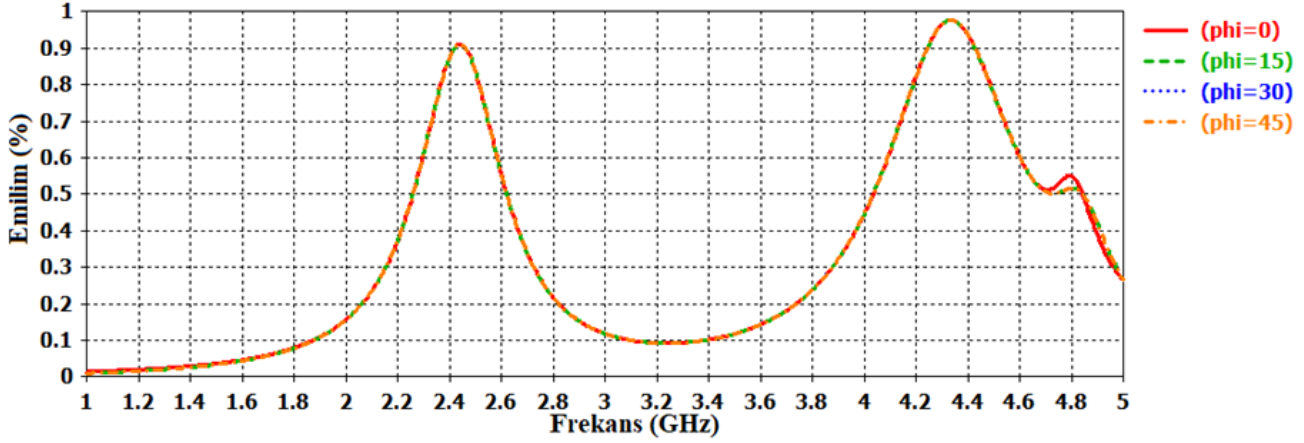
TE, TM ve TEM Mod Analizi

Önerilen metamalzeme tabanlı emici yapısının TE, TM ve TEM modlarında davranışları incelenmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi yapı üç farklı polarize elektromanyetik dalga için incelendiğinde emilim değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. 2.44 GHz ve 4.33 GHz çalışma frekanslarında yapı mükemmel emilim sağlamaktadır.

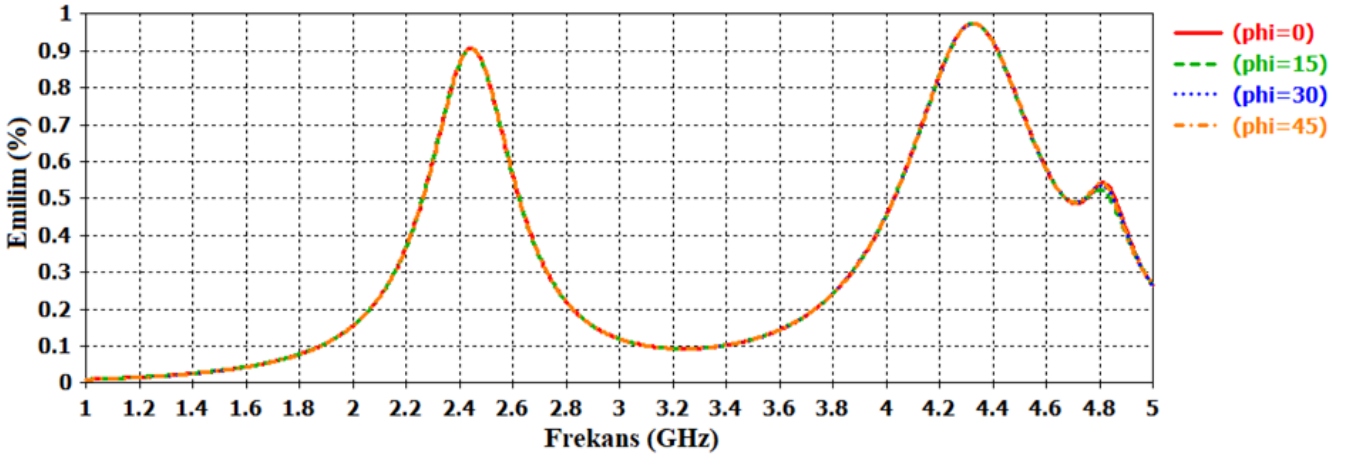


Şekil 5. Önerilen Yapının TEM, TE ve TM Modlarında Emilim Değerleri

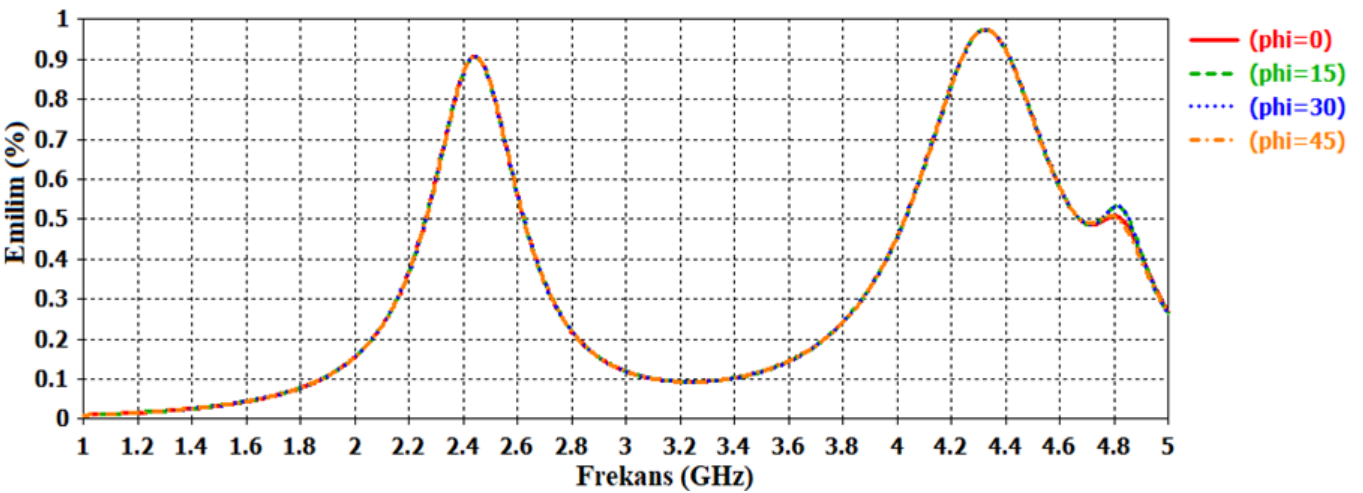
Önerilen yapının emilim karakteristiğini daha iyi anlamak için TEM, TE ve TM polarize elektromanyetik dalga için çeşitli polarizasyon açıları kullanılarak sayısal simülasyonlar yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi birim hücrenin emilim değerinin phi polarizasyon açısından etkilenmediği görülmektedir. Bunun sebebini önerilen birim hücre yapısının merkezi simetrisinden dolayıdır. Önerilen yapı 0° ile 45° arasında değişen tüm geliş açıları için oldukça düzgün ve yüksek bir emilim sağlamaktadır.



Şekil 6. Önerilen Yapının TEM Modunda Farklı Polarizasyon Açılarının Sinyal Emilime Etkisi



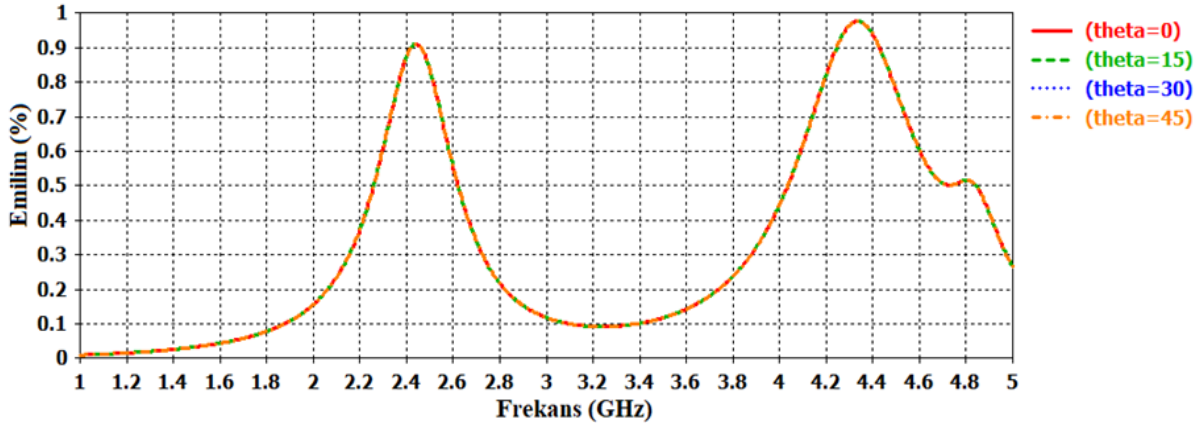
Şekil 7. Önerilen Yapının TE Modunda Farklı Polarizasyon Açılarının Sinyal Emilime Etkisi



Şekil 8. Önerilen Yapının TM Modunda Farklı Polarizasyon Açılarının Sinyal Emilime Etkisi

Geliş açısı 0° ile 45° arasında 4 farklı değerinde incelendiğinde emilim performansı üzerindeki etkisi Şekil 9’da görüldüğü gibi yok denilecek kadar azdır. Birim hücrenin rezonans frekanslarında TEM modunda gelen dalga emilimi maksimum olduğu görülmektedir. Böylece, önerilen metalizeme emici yapısı, çalışma frekansı bandının

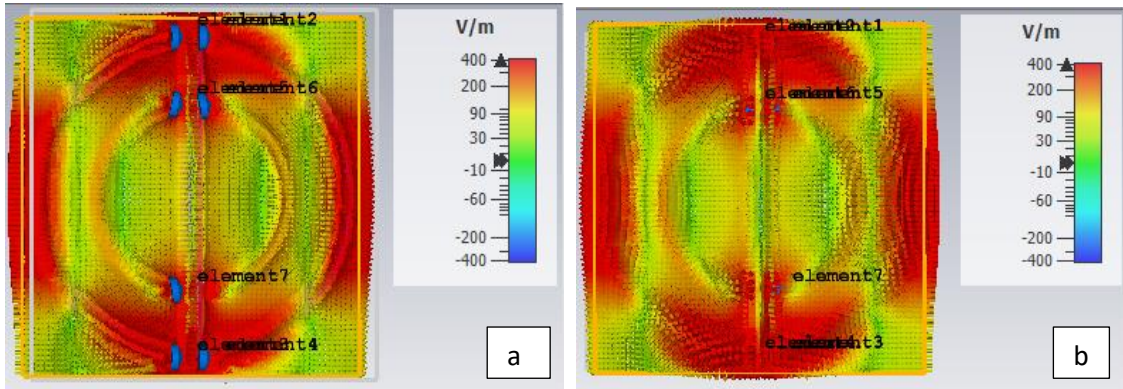
tamamı boyunca hem TE-TM polarizasyonları hem de TEM modu için geliş açısına neredeyse duyarlıdır. Önerilen yapı, mikrodalga frekans aralığında çalışan IoT sinyal emilim cihazların gerçekleştirilmesi için iyi bir adaydır. Aynı zamanda polarizasyon ve geliş açısından bağımsız özellikleri nedeniyle enerji hasadı uygulamalarında da kullanılabilir.



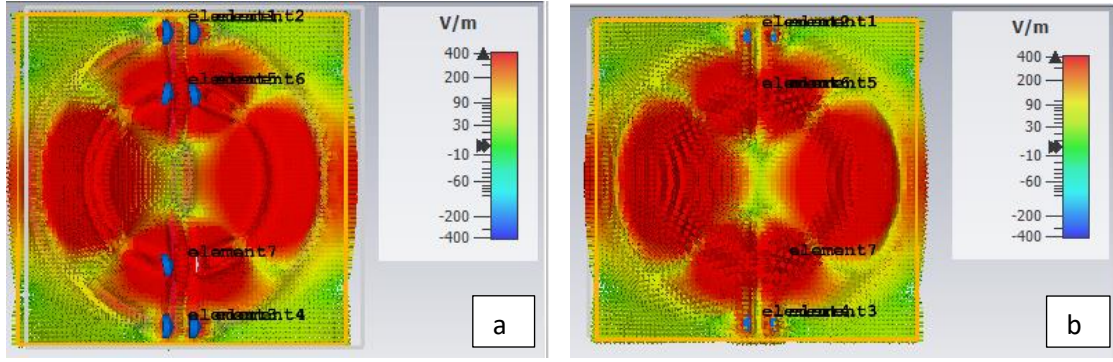
Şekil 9. Önerilen Yapının TEM Modunda Farklı Açılarda Sinyal Emilime Etkisi

Elektrik Alan, Manyetik Alan ve Yüzey Akım Dağılımları

MTM tabanlı sinyal emici yapının, gelen EM dalgaya karşı fiziksel davranışını açıklamak için rezonans frekanslarındaki elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akımı dağılımlarına bakılmıştır. Rezonans frekanslarında yapı maksimum emilime sahip olduğundan dolayı elektrik, manyetik ve yüzey akım dağılımları bu frekans değerlerinde incelenmiştir. Simülasyon programında birim hücrenin hem ön yüzeyinde hem de arka yüzeyinde inceleme yapılmıştır. Böylece üç durum için de metalmateme emici yapısı karakterize edilmiştir. Şekil 10 ve 11’de görüldüğü gibi yapının ilk önce elektrik alan dağılımı incelenmiştir. 2.44 GHz’de elektrik alan daha çok dıştaki rezonatörde, 4.33 GHz’de ise iç rezonatör etrafında yoğunlaşmıştır.

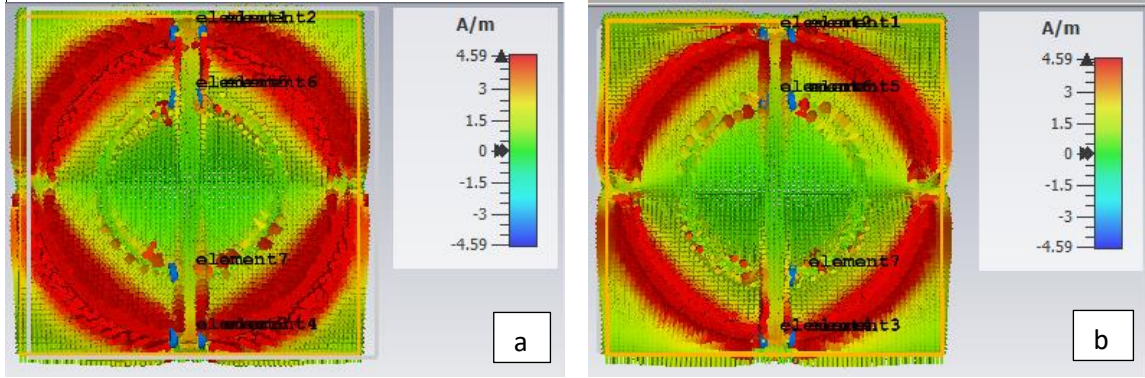


Şekil 10. a. Yapının 2.44 GHz’de Ön Yüzey Elektrik Alan Dağılımı b. Yapının 2.44 GHz’de Arka Yüzey Elektrik Alan Dağılımı

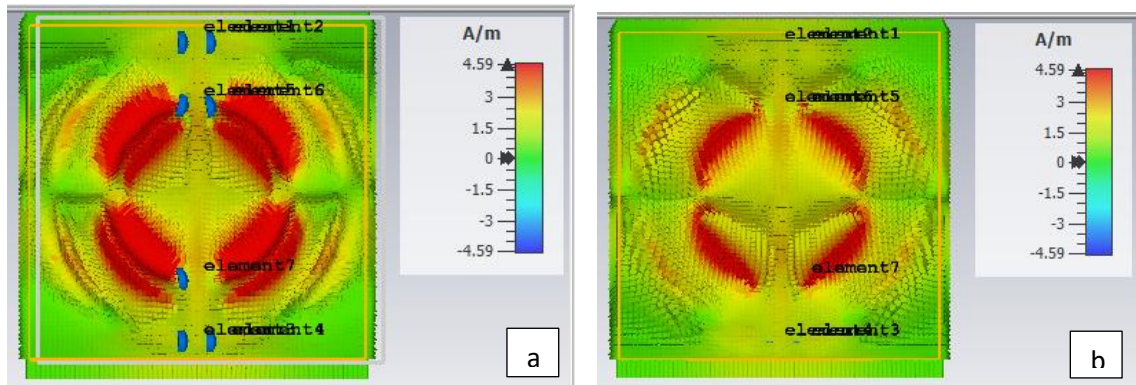


Şekil 11. a. Yapının 4.33 GHz’de Ön Yüzey Elektrik Alan Dağılımı b. Yapının 4.33 GHz’de Arka Yüzey Elektrik Alan Dağılımı

Manyetik alan dağılımı incelendiğinde Şekil 12 ve 13’te görüldüğü gibi elektrik alan ile uyumlu olduğu görülmüştür. 2.44 GHz’de dış rezonatörde, 4.33 GHz’de iç rezonatörde yoğunlaşmıştır. Gelen dalganın elektrik alan bileşeni, bir yüzey akımına neden olan serbest elektronları uyarır ve yüzeyde oluşan yük, dış elektrik alanı boyunca salınır ve bu alan manyetik dipol momentine neden olur ve rezonans frekansında emilime neden olan bu dipol momentidir.



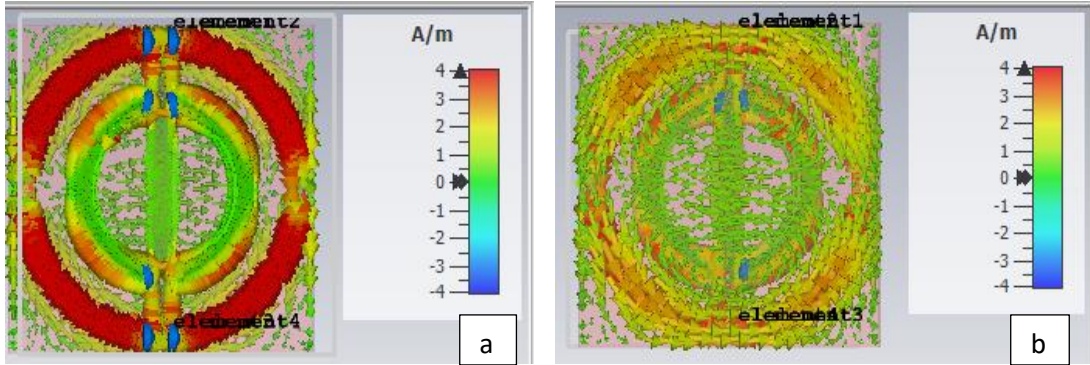
Şekil 12. a. Yapının 2.44 GHz’de Ön Yüzey Manyetik Alan Dağılımı b. Yapının 2.44 GHz’de Arka Yüzey Manyetik Alan Dağılımı



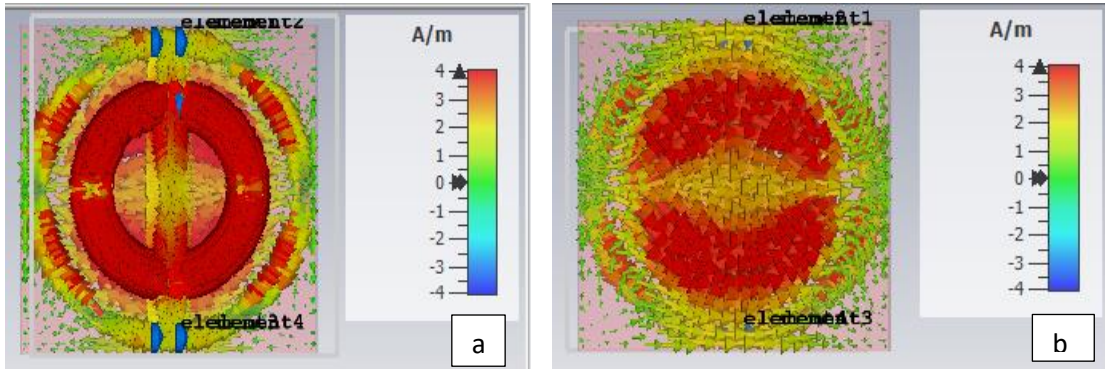
Şekil 13. a. Yapının 4.33 GHz’de Ön Yüzey Manyetik Alan Dağılımı b. Yapının 4.33 GHz’de Arka Yüzey Manyetik Alan Dağılımı

Önerilen yapının Şekil 14 ve Şekil 15’te rezonans frekansları olan 2.44 GHz ve 4.33 GHz’de yüzey akım dağılımları incelenmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi TEM modunda yapı üzerinde paralel ve paralel olmayan yüzey akımlar bulunmaktadır. Paralel akımlar elektrik alanı, paralel olmayan akımlar manyetik alanı oluşturur. Böylece gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri rezonans frekansında güçlü bir elektromanyetik alan üretir. Grafiklerde görüldüğü gibi 4.33 GHz’de emilim değeri 2.44 GHz’e göre daha

büyüktür. Bunun sebebi ise 4.33 GHz’de yüzey akım değerinin daha büyük olmasıdır. Yüzey akım dağılımı rezonatör yapısında 2.44 GHz’de dış rezonatörde, 4.33 GHz’de iç rezonatör üzerinde daha çok yoğunlaşmıştır. Enerji hasadı uygulamaları için elektrik alan ve yüzey akım dağılımlarından ziyade, rezonans frekanslarında güçlü manyetik alan görülmesi daha önemlidir.

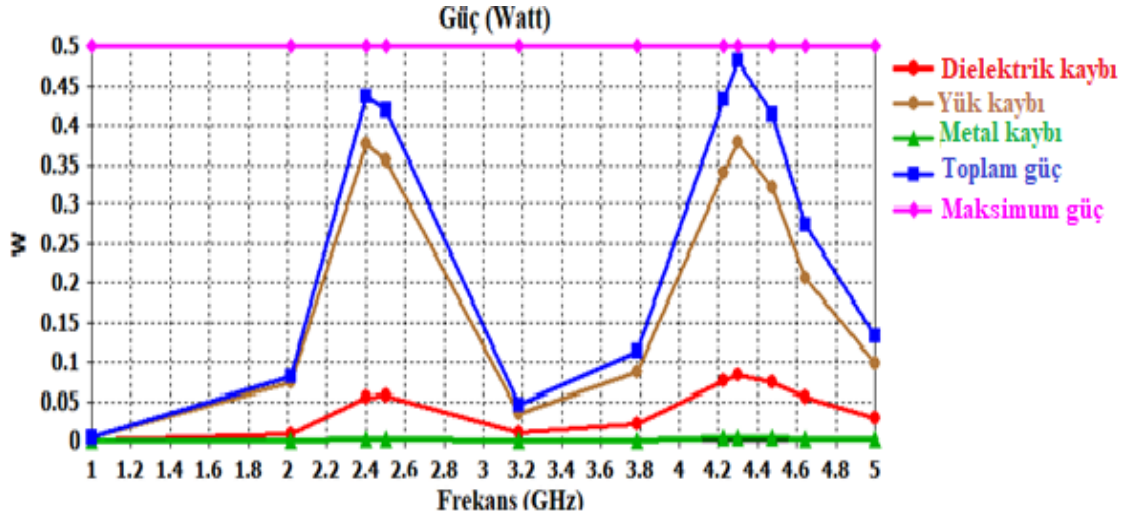


Şekil 14. a. Yapının 2.44 GHz’de Ön Yüzey Akım Dağılımı b. Yapının 2.44 GHz’de Arka Yüzey Akım Dağılımı



Şekil 15. a. Yapının 4.33 GHz’de Ön Yüzey Akım Dağılımı b. Yapının 4.33 GHz’de Arka Yüzey Akım Dağılımı

Önerilen çalışmada enerji hasadı için birim hücreye 1000 Ω değerinde dirençler eklenmiştir. Dirençler emilim değerlerini artırmanın yanı sıra, emilen elektromanyetik sinyalin gücünü toplayarak bu gücü elektrikselsel olarak kullanmayı sağlar. Şekil 16’da simülasyon için TEM modunda metalmalzeme tabanlı sinyal emici yapısına EM dalga tarafından gelen güç, önerilen yapı tarafından emilen güç ve MTM yapısında dielektrik katmanda oluşan kayıp güç, dirençlerde ısıya dönüşen kayıp güç olarak gösterilmiştir. Benzetim programında maksimum güç transferi sağlandığında 0.5 Watt değerine ulaşılmaktadır. Yeşil çizgi metal yüzeylerdeki güç kaybının neredeyse olmadığını ve kırmızı çizgide FR4 dielektrik katmanında dikkate alınmayacak kadar az olduğunu göstermektedir. Kahverengi çizgi ise direnç üzerindeki güç kaybını, mavi çizgi ise toplam güç transferini göstermektedir. Şekil 15’te görüldüğü gibi rezonans frekanslarında önerilen yapı üzerindeki güç transferinin yük elemanları üzerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 16. Önerilen Yapının Güç Karakteristikleri

SONUÇLAR

Metamalzeme tabanlı sinyal emici yapısı simülasyon sonuçları geniş perspektifte incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre ISM çalışma frekanslarından olan 2.44 GHz frekansında %90 ve 4.33 GHz frekansında ise %98 mükemmel sinyal emici özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Önerilen yapının emilim karakteristiği elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akım dağılımı ile açıklanmıştır. Mikrodalga frekans bandında tasarlanan metamalzeme tabanlı yapının sinyal emici özelliğinin yanı sıra enerji hasatlama özelliği de bulunmaktadır. TE, TM ve TEM modlarında 0° ile 45° arasında geliş ve polarizasyon açılarında incelendiğinde üç mod için aynı emilim değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu da tasarlanan yapının enerji hasatlayıcıları arasında iyi bir aday olduğunu göstermektedir. Böylece IoT teknolojisinde kullanılan cihazlar için elektromanyetik dalgaların enerji emilimi ve dönüşümü daha küçük yapılar ve daha verimli sonuçlar ile sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Amiri, M., Tofigh, F., Shariati, N., Lipman, J., & Abolhasan, M. (2019). Miniature tri-wideband Sierpinski–Minkowski fractals metamaterial perfect absorber. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(7), 991-996. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5837>
- Bağmancı, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Karadağ, F., Tetik, E., & Bakır, M. (2018). Wideband metamaterial absorber based on CRRs with lumped elements for microwave energy harvesting. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 52(1), 45-59. <https://doi.org/10.1080/08327823.2017.1405471>
- Bakır, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Altıntaş, O., Unal, E., & Sabah, C. (2018). Sensory applications of resonator based metamaterial absorber. *Optik*, 168, 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.002>
- Bakır, M., Karaaslan, M., Dincer, F., Akgol, O., & Sabah, C. (2016). Electromagnetic energy harvesting and density sensor application based on perfect metamaterial absorber. *International Journal of Modern Physics B*, 30(20), 1650133. <https://doi.org/10.1142/S0217979216501332>
- Biswas, A., Hamidi, S. B., Biswas, C., Roy, P., Mitra, D., & Dawn, D. (2018). A novel CMOS RF energy harvester for self-sustainable applications. In *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)* (pp.1-5). IEEE.
- Costa, F., Genovesi, S., Monorchio, A., & Manara, G. (2013). Low-cost metamaterial absorbers for sub-GHz wireless systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 27-30. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2013.2294791>

Dincer, F., Bakir, M., Karaaslan, M., Delihacioglu, K., & Sabah, C. (2016). Perfect Metamaterial absorber based energy harvesting application in ISM Band. *International Journal of Business and Technology*, 4(2), 5. <https://doi.org/10.33107/ubt-ic.2015.91>

Hajizadegan, M., Ahmadi, V., & Sakhdari, M. (2013). Design and analysis of ultrafast and tunable all optical metamaterial switch enhanced by metal nanocomposite. *Journal of lightwave technology*, 31(12), 1877-1883. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2261854>

Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.043>

Kaur, K. P., Upadhyaya, T., Palandoken, M., & Gocen, C. (2019). Ultrathin dual-layer triple-band flexible microwave metamaterial absorber for energy harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), e21646. <https://doi.org/10.1002/mmce.21646>

Liu, Z., Liu, X., Wang, Y., Liu, G., & Tang, C. (2020). Silicon antennas metasurface based light absorber with quantitatively adjustable operating frequency and intensity. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(1), 1-6. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.2987179>

Mattsson, M., Kolitsidas, C. I., & Jonsson, B. L. G. (2018). Dual-band dual-polarized full-wave rectenna based on differential field sampling. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(6), 956-959. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2825783>

Redo-Sanchez, A., Laman, N., Schulkin, B., & Tongue, T. (2013). Review of terahertz technology readiness assessment and applications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(9), 500-518. <https://doi.org/10.1007/s10762-013-9998-y>

Shang, S., Yang, S., Shan, M., Liu, J., & Cao, H. (2017). High performance metamaterial device with enhanced electromagnetic energy harvesting efficiency. *AIP Advances*, 7(10), 105204. <https://doi.org/10.1063/1.5002165>

Unal, E., Dincer, F., Tetik, E., Karaaslan, M., Bakir, M., & Sabah, C. (2015). Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(12), 9735-9740. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3642-7>

Wang, B. X., Zhai, X., Wang, G. Z., Huang, W. Q., & Wang, L. L. (2014). Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber. *IEEE Photonics Journal*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2381633>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.07.2022
Kabul Tarihi : 01.08.2022

Received Date : 07.07.2022
Accepted Date : 01.08.2022

İKİ FARKLI POMZA AGREGASI İÇEREN CAM TOZU KATKILI BETONLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS POWDER ADDITIVE CONCRETES CONTAINING TWO DIFFERENT PUMICE AGGREGATES

Ali CEYHAN^{1*} (ORCID: 0000-0003-4751-9689)
Ahmet Hayrullah SEVİNÇ² (ORCID: 0000-0003-3338-8366)
Yusuf URAS³ (ORCID: 0000-0001-5561-3275)

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Programı, Kahramanmaraş, Türkiye

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali CEYHAN, muhaliceyhan@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, farklı oranlarda bazaltik ve asidik pomza kullanılarak üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelenmiştir. Pomza agregaları normal agregaya %50 ve %100 oranında ikame edilmiştir. Ayrıca daha çevreci bir beton üretmek amacıyla atık olan cam tozu çimentodan %10 oranında ikame edilerek 5 farklı karışım üretilmiştir. Üretilen numunelere birim hacim ağırlığı, su emme, porozite, ultrasonik ses geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda %100 oranında ikame edilen asidik pomza agregası en düşük yoğunluk, ultrasonik ses geçiş hızı ve basınç dayanımı değerleri verirken su emme ve porozite değerleri ise en yüksek çıkmıştır. %100 asidik pomza agregası içeren beton karışımı hariç diğer hafif beton karışımların tamamında TS 2511 standardında belirtilen taşıyıcı hafif betonu basınç dayanımı değerinden (17,2 MPa) daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bazaltik pomza, atık cam tozu, asidik pomza, hafif beton

ABSTRACT

In this study, the physical and mechanical properties of concretes produced using basaltic and acidic pumice at different rates were investigated. Pumice aggregates have been replaced by 50% and 100% of normal-weight aggregates. In addition, in order to produce a more environmentally friendly concrete, 5 different mixtures were produced by replacing waste glass powder from cement at the rate of 10%. Unit volume weight, water absorption, porosity, ultrasonic pulse velocity and compressive strength tests were applied to the produced samples. As a result of the study, while the 100% substituted acidic pumice aggregate gave the lowest density, ultrasonic sound transmission velocity and compressive strength values, the water absorption and porosity values were the highest. Except for the concrete mixture containing 100% acidic pumice aggregate, all of the other lightweight concrete mixtures have higher compressive strength values than the compressive strength value of the structural light-weight concrete (17,2 MPa) specified in the TS 2511 standard.

Keywords: Basaltic pumice (scoria), waste glass powder, acidic pumice, light-weight concrete

GİRİŞ

Son zamanlarda, yapı ağırlığını azalması ile depreme karşı daha dayanıklı hale gelmesi nedeni ile hafif betonun üretimine talep giderek artmaktadır. Ayrıca hafif betonlar, normal ağırlıklı betonlara nazaran daha iyi termal özelliklere sahiptir. Bu durum yapıların enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Bahrami ve Nematzadeh, 2021). Hafif betonlar; yalıtım amacıyla kullanılan düşük dayanımlı betonlar, 7-17 MPa basınç dayanıma sahip orta dayanımlı betonlar ve taşıyıcı yapısal hafif betonlar olmak üzere 3 farklı amaçla kullanılmaktadır (Serin vd., 2007). ACI 213R-14'e göre yapısal olarak kullanılacak taşıyıcı hafif betonların 28 günlük basınç dayanımının 21 MPa'dan yüksek olması istenmektedir. Ayrıca etüv kurusu olarak ölçülen birim hacim ağırlığının ise 1,12-1,96 t/m³ olması gerekmektedir (ACI 213, 2014). TS 2511 standardında ise taşıyıcı hafif betonların ağırlıkları 1,4-2,0 t/m³ ve basınç dayanımının ise en az 17.2 MPa olması gerektiği belirtilmiştir (TS 2511, 2017).

Pomza, volkanik patlamalar sonucu oluşan lavların hızlı soğuması ve bünyesindeki gazların ani olarak terk etmesi ile boşluklu bir yapıya sahip olmaktadır. Pomza rengi genellikle beyaz ve gri olmakla birlikte kırmızıdan siyaha olmak üzere farklı renk tonları bulunmaktadır. Bu renk farklılıkları kimyasal içeriğine bağlıdır (Rashad, 2019). Açık renkli olan pomza asidik, koyu renkli olan pomza ise bazik olarak adlandırılmaktadır (Çimen vd., 2020). Dünya'da tespit edilen pomza rezervi yaklaşık olarak 18 milyon ton ve Türkiye'nin bu rezerv içerisindeki payı ise %15,8'ine karşılık gelmektedir (Bilgil ve Özdel, 2017). Pomza agregası düşük yoğunluk, iyi ısı yalıtım ve yüksek yangın direnci gibi birçok avantajlı özelliklere sahiptir (Rashad, 2019).

Gündüz ve Uğur (2005), yaptıkları çalışmada farklı oranlarda iri ve ince agrega miktarının çimentoya oranının yapısal olarak kullanılacak hafif betonlarının mühendislik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla toplam agrega/çimento oranlarının 2:1 oranı ile 4:1 oranlarında değişen beş farklı karışım hesabı yapılmıştır. Çimento oranı ise ağırlıkça 245 ile 440 kg/m³ arasında değişmektedir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre üretilen hafif betonların normal betonlara oranla %30-40 oranlarında daha hafif olduğu belirtilmiştir. 28 günlük betonların fırın kurusu ağırlıkları 1150-1271 kg/m³ arasında ve basınç dayanımları ise 14,6-26,1 MPa arasında değişmektedir. Agregası oranı düşüldükçe ve çimento oranı arttıkça basınç dayanımı, elastisite modülü ve basınç dayanımının iyileştiğini bildirmişlerdir. Yapısal hafif beton herhangi bir katkı kullanılmadan üretilmesi için yüksek çimento içeriğini olması gerektiğini vurgulamışlardır (Gündüz ve Uğur, 2005).

Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar boşluklu yapıya sahip olması nedeni ile daha düşük birim ağırlığa sahiptir. Bu durum mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Bu dezavantaj özellikleri giderebilmek amacı ile uçucu kül, silis dumanı vb. mineral katkıları kullanılabilmektedir (Dündar vd., 2020; Ahmad vd., 2019). İnce taneli atık cam tozları (GP), yüksek oranda silikat içeren kimyasal bileşimleri nedeniyle betonda kullanılacak puzolanik malzemeler olarak kabul edilmektedir (Elaqra ve Rustom, 2018).

Endüstrinin gelişmesi ile birlikte şehirlerde büyük miktarlarda katı atık oluşmaktadır. Bu katı atıkların bir kısmı geri dönüştürülmekte ve geri dönüşümü olmayan atıklar ise çevre için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Cam atıkları bu tehditlerden biridir. 2015 verilerine göre Türkiye'de yaklaşık olarak 696 bin ton cam ambalaj üretilmiş ve bunların sadece %31'i geri dönüştürülmüştür (Sevinç ve Durgun, 2020; Elaqra ve Rustom, 2018).

Mineral katkıları, puzolanik özellikleri ve filler etkisi nedeniyle taşıyıcı hafif betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmektedir (Mo vd., 2017). Ayrıca mineral katkıların çimento ile ikame edilmesi daha az çimento kullanılması ve atıkların değerlendirilmesi ile ekolojik fayda sağlamaktadır (Nayır vd., 2021). Durgun ve Sevinç (2019), yaptıkları çalışmada betonda cam tozu kullanımı için en optimum oranın %10 olduğunu belirtmişlerdir (Durgun ve Sevinç, 2019).

Türkel ve Kadiroğlu (2007), yaptıkları çalışmada pomza agregaları taşıyıcı betonların mekanik özelliklerini iyileştirmek için farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül kullanmışlardır. Çalışmada elde edilen verilere göre 28 günlük basınç dayanımı 25,7 ile 28,5 MPa arasında ve kuru birim ağırlıkları ise 1,44-1,85 t/m³ arasında değişmektedir (Türkel ve Kadiroğlu, 2007) Pomza agregalı hafif betonlarda cam tozu kullanımı üzerine yapılmış yeterli sayıda araştırma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada; iki farklı pomza agregaları kullanılarak üretilen hafif ve yarı hafif betonların fiziksel ve mekanik etkileri incelenmiştir. Ayrıca, çimento yerine %10 oranında cam tozu ikame edilerek üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde birim hacim ağırlığı, su emme, porozite, ultrasonik ses geçiş hızı ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Malzemeler

Deneysel çalışmada çimento CEM I 42,5 R kullanılmıştır. Cam tozu Kahramanmaraş bölgesinde temin edilmiştir. Cam tozunun görüntüsü Şekil 1’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’te verilmiştir. Asidik pomza Kayseri, bazik pomza Osmaniye ve normal ağırlıklı agregalar ise Kahramanmaraş bölgesinden temin edilmiştir. Agregaların görüntüsü Şekil 2’de, fiziksel özellikleri ve elek analizleri Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 1. Cam Tozu

Tablo 1. Hammaddelerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Oksitler	İçerik (%)	
	Çimento	Cam tozu
CaO	62,69	11,52
SiO ₂	18,56	70,06
Al ₂ O ₃	4,70	0,78
Fe ₂ O ₃	3,14	1,29
K ₂ O	0,63	0,31
Na ₂ O	0,44	12,88
SO ₃	3,04	0,24
Kızdırma Kaybı (%)	3,15	2,39
Özgül Ağırlık	3,10	2,65
İncelik (cm ² /g)	3376	4189



Şekil 2. Bazik ve Asidik Pomza

Tablo 2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega Çeşidi	Özgül	Su Emme
	Ağırlık	(%)
Normal ince agrega (0-4 mm)	2,55	1,80
Normal iri agrega (4-11,2 mm)	2,71	1,03
Asidik ince pomza (0-4 mm)	1,62	24,28
Asidik iri pomza (4-11,2 mm)	1,16	37,43
Bazik ince pomza (0-4 mm)	2,01	11,19
Bazik iri pomza (4-11,2 mm)	1,67	21,92

Tablo 3. Agregaların Elek Analizleri

Elek no (mm)	Geçen (%)			
	Karışım	A	B	C
16	100	100	100	100
8	75,1	60	76	88
4	54,7	36	56	74
2	40,7	21	42	62
1	31,9	12	32	49
0,25	6,9	3	8	18

Normal ağırlıklı ve hafif ağırlıklı agregaların su emme ve özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 standardına, elek analizleri TS 3530 EN 933 – 1 standardına ve tane dağılımları TS 2511 ve TS 706 EN 12620+A1 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Agregaların maksimum tane çapı 11,2 mm olarak seçilmiştir. Karışım hesapları TS 802 standardına ve TS 2511 standardına göre tasarlanmıştır. Beton karışım hesabı Tablo 4’te verilmiştir. Referans karışımın %50 ve %100 oranlarında ince ve iri agregalarından ikame edilerek asidik ya da bazik pomza agregalar ile yer değiştirilerek 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,45 olarak sabit tutulmuştur. Bağlayıcı miktarının %1’i oranında polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir.

Tablo 4. 1 m³ Beton Karışım Hesabı

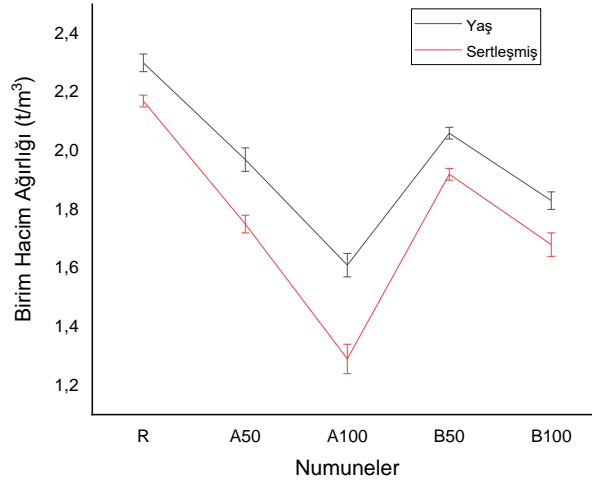
Karışım	Bileşenler (kg/m ³)									
	Çimento	Cam Tozu	Normal Agregata	Normal Kum	Hafif Agregata	Hafif Kum	Su	Kimyasal Katkı	Slump (cm)	Teorik Ağırlık
R	450	50	879	743	-	-	200	5	17,7	2327
A50	450	50	439,5	371,5	188	236,5	200	5	12,4	1966
A100	450	50	-	-	376	473	200	5	9,2	1604
B50	450	50	439,5	371,5	259,5	293,5	200	5	15,3	2087
B100	450	50	-	-	519	587	200	5	12,6	1846

Beton karışımları hazırlanırken malzemeler hassas terazide tartılmıştır. Hafif agregalar miksera konulup kuru halde 60 saniye karıştırılmış ve doyma suyu ilave edilerek 30 dakika süre ile belirli aralıklarla karıştırılmıştır. Bu işlem sonunda bağlayıcı malzeme, bir miktar su ile akışkanlaştırıcı eklenerek 120 saniye daha karıştırılmış ve geri kalan su eklenerek 180 saniye karıştırılarak karışımlar hazırlanmıştır. Taze beton karışımın birim hacim ağırlığı TS EN 12350-6 standardına ve akıcılığını belirlemek amacıyla slump değerleri TS EN 12350-2 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Beton karışımlar 100x200 mm silindir kalıplara yerleştirilmiş ve 24 sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra kür havuzuna konulmuştur. Sertleşmiş beton numunelerin Ultrases geçiş hızı testi ASTM C 597 standardına, su emme ve görünür porozite testi ASTM C 642 standardına ve basınç dayanımı TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Birim Hacim Ağırlıkları

Beton numunelerin taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıkları Şekil 3’te verilmiştir.

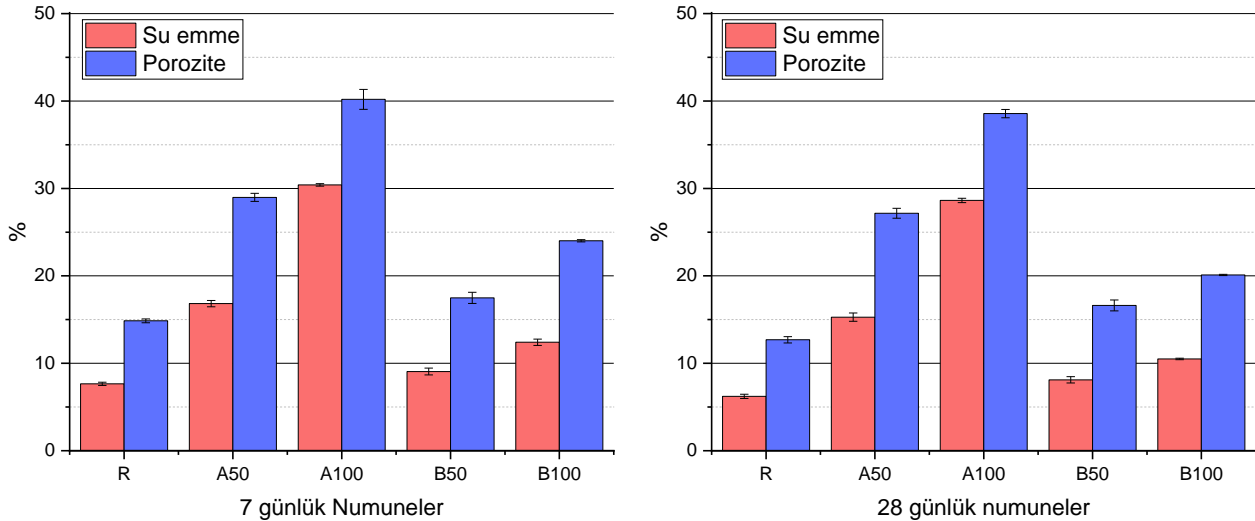


Şekil 3. Numunelerin Taze ve Sertleşmiş Birim Hacim Ağırlıkları

Beton numunelerin taze birim hacim ağırlıkları $1,61-2,30 \text{ t/m}^3$ arasında değişmektedir. En yüksek taze birim hacim ağırlığı R numunesi verirken en düşük değeri ise A100 numunesi vermiştir. Numunelerin sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri $1,29-2,17 \text{ t/m}^3$ arasındadır. En büyük sertleşmiş birim hacim ağırlığı R numunesi vermiştir. En düşük sertleşmiş birim hacim ağırlığını A100 numunesi vermiştir. Asidik pomza oranı arttıkça (%50 ve %100) referans numunesine oranla sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla %19,4 ve %40,6 oranlarında azalmıştır. Asidik ve bazik pomza agregalarında boşluk miktarı normal agregalara oranla yüksektir. Bu durum bu tip agregaların kullanımı ile ağırlığın düşme sebebi açıklamaktadır. Kılıç vd., (2009), asidik pomza agregası kullanımı ile %44,4 oranlarına kadar sertleşmiş ağırlık değerlerinin düştüğünü bildirmiştir (Kılıç vd., 2009). Sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri %50 oranında bazaltik pomza agregası kullanımı ile %11,5 oranında ve %100 oranda ise %22,6 oranında azalmıştır. Betonların birim hacim ağırlık değerlerinde düşüşler kullanılan agregaların yoğunlukları ile ilişkilidir. ACI 213R-14 standardına göre yapısal olarak kullanılacak taşıyıcı hafif betonların 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerinin $1,12-1,96 \text{ t/m}^3$ olması gerektiğini bildirmiştir (ACI 213, 2014) Beton numunelerin sertleşmiş ağırlıkları incelendiğinde; referans numunesi hariç geri kalan numunelerin tamamı bu değerler arasında çıkmıştır.

Su Emme ve Porozite Değerleri

Beton numunelerin su emme ve porozite sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



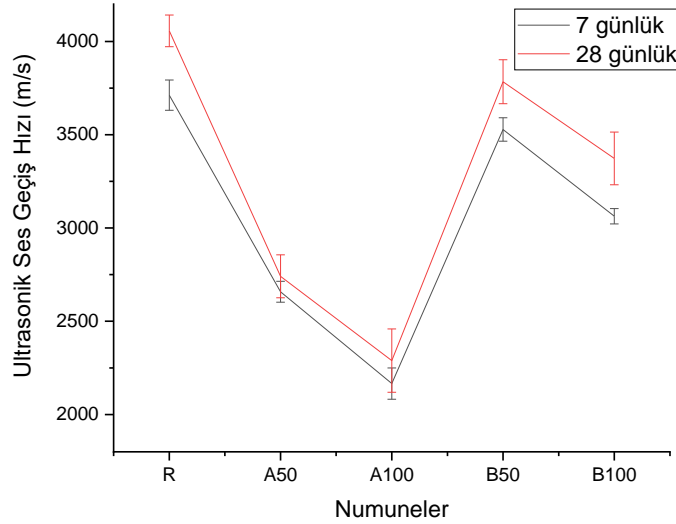
Şekil 4. 7 ve 28 Günlük Numunelerin Su Emme ve Porozite Değerleri

7 günlük numunelerin görünür su emme ve porozite sonuçları incelendiğinde sırasıyla; %7,65-30,41 ve %14,86-40,19 arasında değiştiği görülmüştür. 7 günlük A100 numunesi referans numunesine kıyasla %297,5 oranında daha fazla su emmiş ve %170,5 oranında daha fazla boşluk hacmine sahip olmuştur. B50 ve B10 numunelerinde su emme oranı %18 ve %62,2 oranlarda daha fazla olmuştur. 28 günlük numuneler incelendiğinde; görünür porozite ve su emme değerleri sırasıyla %6,22-28,63 ve %12,69-38,56 arasında çıkmıştır. Tablo 2'deki su emme değerleri

incelendiğinde asidik pomza ve bazik pomzanın normal agregaya oranla daha fazla su emme değerleri olduğu görülmekte ve bu durum boşluk yapısı ile ilişkili olduğu bilinmektedir. B50, B100, A50 ve A100 numuneleri referans numuneye oranla sırasıyla %145,1-%360,3-%30,4-%68,8 oranlarda daha fazla su emmiştir. Bu durum agrega çeşidinin boşluk kapasitesi ile ilişkilidir. Hossain vd., (2011), %50 ve %100 oranlarda bazik pomza kullanımı ile su emme değerleri sırasıyla %16,22 ve %29,73 daha fazla su emmiş ve Kurt vd., (2015), %20-100 oranlarında asidik pomza kullanımı ile %27,79-196,6 oranlarda daha düşük su emme değerleri çıkmıştır (Kurt vd., 2015; Hossain vd., 2011).

Ultrases Geçiş Hızları

Beton numunelerin ultrasonik ses geçiş hızları Şekil 5'te verilmiştir.

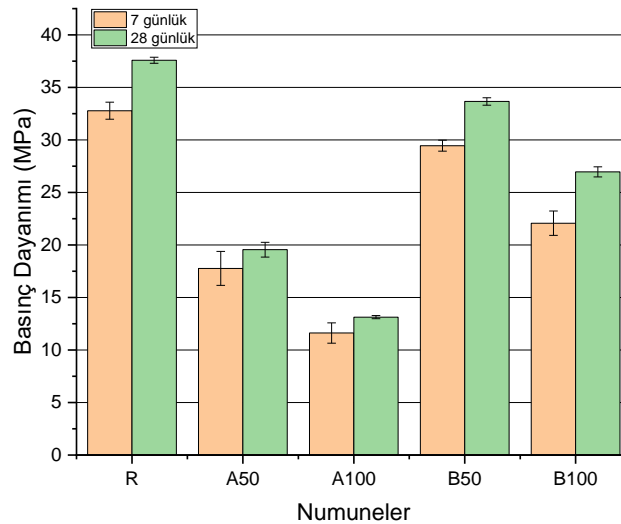


Şekil 5. 7 ve 28 Günlük Numunelerin Ultrasonik Ses Geçiş Hızları

Beton numunelerin ultrasonik ses geçiş hızları incelendiğinde; 7 günlük sonuçlar 2166-3712 m/s arasında ve 28 günlük sonuçlar ise 2289-4057 m/s arasında değişmektedir. Her iki kür sürelerinde eğilim A100 numunesi en düşük ses hız değerine sahip iken R numunesi en yüksek ses hızı değeri elde edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde numunelerin boşluk oranları görülmekte ve ses hızı ile boşluk yapısı ilişkisi bilinmektedir. Bu durum boşluk miktarı arttıkça ses hızının daha düşük olduğu numunelerde açıkça görülmektedir. UPV değerleri, mekanik özelliklerle aynı faktörlerden etkilenir. Numunelerin boşluk yapısı mekanik özellikleri etkiler ve UPV değerleri ile mekanik özellikler arasında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya çıkarır (Benaicha vd., 2015).

Basınç Dayanımları

Beton numunelerin basınç dayanımları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. 7 ve 28 Günlük Numunelerin Basınç Dayanımları

7 günlük basınç dayanımları 11,62-32,78 MPa arasında değişmektedir. Referans numuneye oranla A50, A100, B50 ve B100 numunelerin basınç dayanımları sırası ile %45,8-64,6-10,2 ve %32,7 oranlarında daha az çıkmıştır. 28 günlük değerler ise 13,13-37,58 MPa çıkmıştır. B100 ve A100 numunelerin basınç dayanımı R numunesine kıyasla sırasıyla %10,4 ve %65,1 oranlarında daha az çıkmıştır. Agregaların boşluk miktarı arttıkça daha az basınç dayanımı sergilemesi ile açıklanabilir. ACI 213R-14 standardına göre yapısal olarak kullanılacak taşıyıcı hafif betonların 28 günlük basınç dayanımının 21 MPa'dan yüksek olması gerektiğini bildirmiştir (ACI 213, 2014). A50 ve A100 numuneleri ACI 213R-14 standardında verilen değerleri sağlamazken B50 ve B100 numuneleri ise 21 MPa'dan daha yüksek çıkması ile taşıyıcı betonlarda kullanılabilirlerdir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada iki farklı pomza agregaları kullanılarak üretilen hafif ve yarı hafif betonların fiziksel ve mekanik etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- 28 günlük numunelerin sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri 1,29-2,17 t/m³ arasındadır. Referans numunesi hariç numunelerin tamamı ACI 213R-14 standardına göre yapısal olarak kullanılacak taşıyıcı hafif betonların 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerini sağlamaktadır (1,12-1,96 t/m³). En hafif beton A100 numunesidir.
- 28 günlük porozite ve su emme değerleri sırasıyla %6,22-28,63 ve %12,69-38,56 arasında çıkmıştır. En düşük değerleri 100 oranda asidik pomza agregası kullanılan numune (A100) vermiştir.
- 28 günlük ultrasonik ses hızları 2289-4057 m/s arasında değişmektedir. En yüksek değeri R numunesi verirken en düşük değeri ise A100 numunesi vermiştir.
- 28 günlük basınç dayanımları 13,13-37,58 MPa arasında değişmektedir. ACI 213R-14 standardı 21 MPa üzeri değerleri taşıyıcı hafif beton olarak tanımlamaktadır. Bu durumda B50 ve B100 numuneleri taşıyıcı hafif beton olarak kullanılacak şartları sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar araştırmayı destekleyen, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2021/6-12 YLS) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

ACI Committee 213. 2014. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute.

Ahmad, M. R., Chen, B., Farasat Ali Shah, S. (2019). Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 220, 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171>

ASTM C 597. 1997. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, American Society for Testing and Materials.

ASTM C642-13. 2013. Standard Test Method for Density, Absorption, And Voids in Hardened Concrete, American Society for Testing and Materials.

Bahrami, A., Nematzadeh, M. (2021). Effect of rock wool waste on compressive behavior of pumice lightweight aggregate concrete after elevated temperature exposure. *Fire Technology*, 57(3), 1425–1456. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01070-1>

Benaicha, M., Jalbaud, O., Hafidi Alaoui, A., Burtschell, Y. (2015). Correlation between the mechanical behaviour and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 702–709. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.047

Bilgiç, A., Özdel, H. (2017). Pomza esaslı ve ignimbirit katkılı hafif yapı malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 475-482. DOI: 10.28948/ngumuh.341291

Çimen Ö., Dereli B., Keleş E. (2020). Üç farklı bölgeye ait pomzanın yüksek plastisiteli kile etkisinin karşılaştırılması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 427-433.

- Dündar, B., Çınar, E., & Çalışkan, A. N. (2020). An investigation of high temperature effect on pumice aggregate light mortars with brick flour. *Research on Engineering Structures and Materials*, 6(3), 241–255. <https://doi.org/10.17515/resm2019.163ma1121>
- Durgun, M. Y., Sevinç, A. H. (2019). High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions. *Construction and Building Materials*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.087>
- Elaqra, H., Rustom, R. (2018). Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, 179, 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.263>
- Gündüz, L., Uğur, I. (2005). The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1859–1864. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.003>
- Hossain, K. M. A., Ahmed, S., & Lachemi, M. (2011). Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036>
- Kiliç, A., Atiş, C. D., Teymen, A., Karahan, O., Ari, K. (2009). The effects of scoria and pumice aggregates on the strengths and unit weights of lightweight concrete. *Scientific Research and Essays*, 4(10), 961-965.
- Kurt, M., Cüneyt Aydın, A., Said Gül, M., Gül, R., Kotan, T. (2015). The effect of fly ash to self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Sadhana*, 40, 1343–1359.
- Mo, K. H., Ling, T. C., Alengaram, U. J., Yap, S. P., Yuen, C. W. (2017). Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 139, 403–418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.081>
- Nayır, S., Bahadır, Ü., Erdoğan, Ş., Toğan, V. (2021). Evaluation of structural lightweight concrete in terms of energy performance: A case study. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(6), 696–702. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.27628>
- Rashad, A. M. (2019). A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*, 25, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100802>
- Sarıışık, A., Coşkun, A. (2021). Bor atıklarının pomza agregalı hafif harçların mineralojik ve termal özelliklerine etkisi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 21(2), 408-425. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.851881>
- Serin, G., Çankiran, O., Başıyigit, C., Taş, H. H., Fenkli, M. (2007). Normal, hafif ve yarı hafif beton blokların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*.1, 15-22.
- Sevinç, A. H., Durgun, M. Y. (2020). Properties of high-calcium fly ash-based geopolymer concretes improved with high-silica sources. *Construction and Building Materials*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120014>
- TS 706 EN 12620+A1 (2009). Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 802 (2009). Beton karışım tasarımı hesap esasları”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 933-1 (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- eleme metodu, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 1097-6 (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12350-2 (2019). Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12390-3 (2003) Türk Standardı Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini.
- TS EN 12350-6 (2019). Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 6: Birim hacim kütlesi, Türk Standartları Enstitüsü.

Türkel, S., Kadiroğlu, B. (2007). Pomza agregali taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13, 353-359.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 08.07.2022
Kabul Tarihi : 02.08.2022

Received Date : 08.07.2022
Accepted Date : 02.08.2022

OG-AG ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE DİNAMİK KONTROLLÜ KOMPANZASYON UYGULAMASI

DYNAMICALLY CONTROLLED COMPENSATION APPLICATION IN MV-LV ELECTRIC GRIDS

*Ramazan SOLMAZ*¹ (ORCID: 0000-0001-8933-2922)

*Muhammet SARI*² (ORCID: 0000-0001-8624-2040)

*Fatih BALTACI*³ (ORCID: 0000-0002-4370-1558)

Mustafa TEKİN^{4*} (ORCID: 0000-0002-8682-411X)

¹Bartın Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

^{2,3}Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, Türkiye

⁴Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa TEKİN, mustafatekin@ksu.edu.tr

ÖZET

Elektrik enerjisinin üretim-tüketim dengesinin korunması, değişik yük taleplerinin karşılanması veya sistemde meydana gelebilecek arızaların elimine edilmesi oldukça önemlidir. Çok fonksiyonlu elektrikli cihazların dengesiz güç tüketimleri ve sürekli artan enerji ihtiyacı, elektrik güç sistemlerinin verimini ve enerji kalitesini olumsuz etkilemektedir. Giderek karmaşık hale gelen elektrik şebekelerindeki başlıca problemler; aktif-reaktif güç dengesizlikleri, harmonikler, gerilim dengesizlikleri, geçici ve kalıcı arızalar olarak sıralanabilir. Bu çalışmada kurulu gücü 20 MW olan bir radyal elektrik şebekesi analiz edilerek şebekede meydana gelen güç ve gerilim dengesizlikleri tespit edilmiştir. Şebekedeki reaktif güç problemini elimine etmek için dinamik kontrollü kompanzasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. AG kısmı indüktif ve OG kısmı kapasitif karakteristiğe sahip olan şebekenin reaktif güçleri karşılıklı elimine edilmek suretiyle doğal kompanzasyon sağlanmıştır. Doğal kompanzasyonun yetersiz olduğu durumlarda SVK şebekeye entegre edilmiştir. Dinamik kontrollü merkezi kompanzasyon uygulaması ile şebekedeki güç oranları izin verilen yasal sınırlar içinde tutularak gerilim daha kararlı hale getirilmiş ve güç faktöründe de iyileştirme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik reaktif güç kompanzasyonu, enerji verimliliği, gerilim kalitesi, güç faktörü, SVK.

ABSTRACT

It is very important to protect the production-consumption balance of electrical energy, to meet different load demands, or to eliminate the malfunctions that may occur in the system. The unbalanced power consumption of multifunctional electrical devices and the ever-increasing energy demand adversely affect the efficiency and energy quality of electrical power systems. The main problems in increasingly complex electrical networks are; active-reactive power imbalances, harmonics, voltage imbalances, temporary and permanent faults. In this study, a radial electric network with an installed power of 20 MW was analyzed, and power and voltage imbalances were determined. To eliminate the reactive power problem in the network, a dynamically controlled compensation application has been carried out. Natural compensation is provided by mutual elimination of the reactive powers of the network, which has inductive characteristics in the LV part and capacitive characteristics in the MV part. In cases where natural compensation is insufficient, SVC is integrated into the network. With the dynamically controlled central compensation application, the power ratios in the network were kept within the allowed legal limits, making the voltage more stable and improving the power factor.

Keywords: Dynamic reactive power compensation, energy efficiency, voltage quality, power factor, SVC.

GİRİŞ

İnsanların yaşam kalitesini artırmaya veya kolaylaştırmaya yönelik geliştirilen her türlü teknolojik cihazı çalıştırmak için kısmen veya tamamen elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Elektrik enerjisinin mekanik, ısı ve ses gibi enerjilere dönüştürülmesindeki kolaylığı ve aynı zamanda bir transfer aracı (bilgi transferi) olarak kullanılması gibi diğer enerjilere göre oldukça önemli üstünlükleri vardır. Elektrik enerjisinin, insan yaşam döngüsündeki yeri ve yukarıda bahsedilen üstünlükleri düşünüldüğünde, vazgeçilemez bir konuma sahip olduğu kolaylıkla ifade edilebilir. Teknoloji ve nüfus artışına paralel olarak enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Enerji talebi geleneksel kaynaklar ve yenilenebilir kaynaklar olarak iki türlü kaynaktan karşılanmaktadır. Kömür, petrol, doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynağı olarak bilinen fosil yakıtların sınırlı olması ve çevreye olan negatif etkileri nedeniyle araştırmacılar, yeni kaynaklar olarak ifade edilen yenilenebilir kaynaklara yönelmiştir. Güneş, rüzgâr vb. yenilenebilir kaynakların ise mevcut enerji taleplerini karşılayacak kapasitede olmadığı açıktır. Bütün bu nedenlerden dolayı üretilen elektrik enerjisinin verimli kullanılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bunun en önemli göstergelerinden biri Birleşmiş Milletlerin belirttiği hedeflerdir. Çalışmamız Ülkemizin de dahil olduğu ve Birleşmiş Milletler nezdinde başlatılan “Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları” projesi kapsamında 7. alt başlık olan “Erişilebilir ve Temiz Enerji” konusu ile doğrudan ilişkili olup bu bağlamda 2030 yılına kadar herkes için karşılanabilir, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimi sağlamak öncelikli hedef olarak belirlenmiştir (Web1, 2022). Bunu başarabilmek için elektrik enerjisinin üretim, transfer ve tüketim aşamalarının her birinden optimum fayda sağlanmalıdır. Yani enerji üretirken kaynakların verimli kullanılması, enerji taşırken minimum kayıp ve enerji tüketilirken maksimum faydalanılacak şekilde sistemlerin yeni teknolojilerle yapılandırılmasının iyi bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Reaktif güç dengesizlikleri, iletim kayıpları ve harmonikler elektrik enerjisinin verimsiz tüketildiğini gösteren başlıca etkenlerdir. Güç kalitesi ile alakalı yapılan güncel çalışmalar konunun önemi açısından aşağıda özetlenmiştir.

Xiong vd., (2018), dinamik kapasitör ile endüstriyel santrallerde kompanzasyon ve harmonik filtreleme konusunda çalışma gerçekleştirmişlerdir. Alcalá vd., (2020), yaptıkları çalışmada Voltage Source Converter (VSC) kullanarak şebekede aktif-reaktif güç kontrolü ve akım harmoniğinin elimine edilmesi konusu ele alınmıştır. Tellez vd., (2018), dağıtık enerji üretim santralleri vasıtasıyla dağıtım şebekelerinde optimum reaktif güç kompanzasyonu yapılmasına dair çalışmaları ele alan bir derleme makale yayınlamışlardır. Kashif vd., (2018), gerçekleştirdikleri çalışmada reaktif güç ve harmonik kompanzasyonu çözümü için üç kademeli inverter kullanılmışlardır. Zimann, vd., (2020), çalışmalarında bir alçak gerilim şebekesinde gerilim regülasyonunu sağlamak için koordineli aktif-reaktif güç kontrolü gerçekleştirmişlerdir. ElGebaly vd., (2019), yaptıkları çalışmada demir yolu elektrik şebekelerinde gerilimi regüle etmek için sistemde var olan reaktif güçlerin eliminasyonu için Multi Level Inverter’i STATCOM olarak kullanmışlardır. Skamyin & Vasilkov, (2019), yüksek frekanslı harmoniklerin ve reaktif gücün bulunduğu şebekeler için güç ölçer tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Smadi vd., (2019), çalışmalarında şebeke bağlantılı bir PV sistemin aktif güç üretmenin yanı sıra şebeke gereksinimlerine göre hem reaktif güç üretmek hem de harmoniklerin bastırılması için kullanıldığını ifade etmişlerdir. Bajaj & Rana, (2018), çalışmalarında üç fazlı asenkron motor sürücülerinin şebekede oluşturduğu harmonikleri ve reaktif güçleri elimine etmek için PV temelli D-STATCOM kullanmışlardır. Ferreira vd., (2018), yaptıkları çalışmada şebekede oluşan reaktif güçleri bastırmak için hibrit aktif filtre kullanıldığını belirtmişlerdir. Chavan & Chavan, (2018), çalışmalarında bir rüzgâr santrali ile elektrik şebekesinin bağlanmasında kullanılan sistemin aynı zamanda şebeke için STATCOM olarak kullanıldığını ifade etmişlerdir. Smrithi vd., (2017), çalışmalarında reaktif güç kompanzasyonunda sınırsız seviyeli inverterin geleneksel çok seviyeli invertere göre daha başarılı olduğu belirtmişlerdir. Cheny vd., (2018), Elektrik şebekelerinde oluşan reaktif güç, harmonik ve fazlar arası dengesiz yüklenme gibi kalite problemlerini çözmek için şebekeye bağlı akıllı sistemlerin tümünün bir arada kullanımı durumunda bu sistemlerin beraber çalışmasının organizasyonu yaptıklarını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada OG ve AG kısımlarından oluşan bir dal-budak şebeke analiz edilerek bu şebekede oluşan reaktif güç problemlerinin çözümü için dinamik kontrollü kompanzasyon uygulaması yapılmıştır. Dinamik kompanzasyonun birincil amacı Şekil 3’te verilen algoritma ile şebekeyi anlık kontrol ederek, şebekenin OG tarafında kullanılan XLPE kabloların oluşturduğu kapasitif güç ile yüklerden kaynaklanan indüktif güçleri karşılıklı elimine ederek şebekenin aktif-reaktif güç dengesini kompanzasyon sistemlerini kullanmadan sağlamaktır. Bunun için şebekenin OG girişindeki elektriksel değerler ve her bir binanın tükettiği elektriksel değerler anlık okunarak yerel bir ağ ile merkezde bulunan algoritma tarafından değerlendirilmektedir. Bu sistemde mümkün olduğu sürece kompanzasyon sistemleri kullanılmamaktadır. Dolayısıyla ihtiyaç durumunda kullanılmak için kurulan kompanzasyon sistemleri, özellikle kondansatörler, şebekede oluşan harmoniklerden uzak tutularak uzun süre boyunca kullanılmaları düşünülmektedir. Yük dengesizliklerinin dinamik kompanzasyon tarafından doğal olarak giderilemediği durumlarda

Şekil 2’de belirtildiği gibi kurulan kompanzasyon sistemleri devreye alınarak şebekenin yük dengesi korunmaktadır. Şekil 2’de verilen kompanzasyon bölgelerinin seçimiyle, şebeke yük durumu analiz edilerek, enerji verimliliği açısından problemin yerinde çözümü hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Kompanzasyon

Kompanzasyon, elektrik şebekelerinde oluşan reaktif güçlerin (iş yapmayan güç) elimine edilmesi veya belli sınırlar içerisinde tutulması olarak tanımlanabilir. Bobin ya da kapasitör karakterli devre elemanları tarafından tüketilen reaktif gücün elektrik hatlarında ısınma şeklinde kayba, mevcut şebekenin enerji taşıma kapasitesini sınırlama ve şebekelerde gerilim dengesizlikleri oluşturma gibi problemlere neden olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı reaktif güçlerin şebekelerden giderilmesi veya yasal sınırlar içinde tutulması önem arz etmektedir. Ülkemiz için indüktif güç tüketimi aktif güç tüketiminin %20’sini, kapasitif güç ise aktif güç tüketiminin %15’ini geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır (Web2, 2022).

Bir elektrik şebekesinde var olan Aktif (P), Reaktif (Q) ve Görünür (S) güçler arasındaki ilişkiler Denklem 1,2,3,4’te verilmiştir.

$$P = S \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$Q = S \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(X_L - X_C)}{R} \right) \quad (3)$$

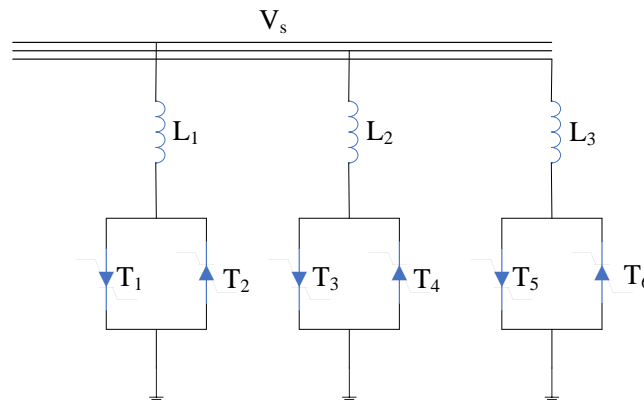
$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (4)$$

Yukarda verilen denklemlerde; R omik direnci, X_L indüktif reaktansı, X_C ise kapasitif reaktansı temsil etmektedir. θ akım gerilim arasındaki açı farkı olup maksimum verim için bu açının sıfır olması yani $X_L = X_C$ veya bu değerlerinin birbirlerine yakın olması gerekmektedir.

Static Var Kompanzator (SVK)

Elektrik şebekelerinde şebekeyi kararlı durumda tutabilmek için çok sayıda Flexible AC Transmission Systems (FACTS) yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerden biri de SVK’dır. SVK genel olarak reaktif güç kompanzasyonu yaparak şebeke gerilimini dengede tutmak ve şebeke kayıplarını azaltmak için kullanılır. SVK’lar şebekeye paralel bağlanan ve şebekenin durumuna göre şebekeye reaktif güç sağlayan (kapasitif mod) ya da şebekeden reaktif güç çeken (indüktif mod) devrelerdir. SVK’lar hızlı cevap süreleri, istenen güçte çalıştırılmaları, doğruluk oranlarının yüksek olması ve sağlamlık gibi nedenlerden ötürü elektrik şebekelerinde klasik kompanzasyona nazaran daha fazla tercih edilmektedir (Khalili vd., 2020).

Analiz edilen şebekenin genellikle kapasitif davranış sergilemesinden dolayı Şekil 2’de Komp1-8 ile belirtilen noktalara 3X10 kVAR SVK kontrollü indüktif yük bağlanmıştır. Bu yükler merkezi algoritma tarafından sürülerek şebekenin güç faktörü 1 veya 1’e yakın tutulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan SVK kontrollü indüktif yük devresi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. SVK Kontrollü İndüktif Yük Devresi

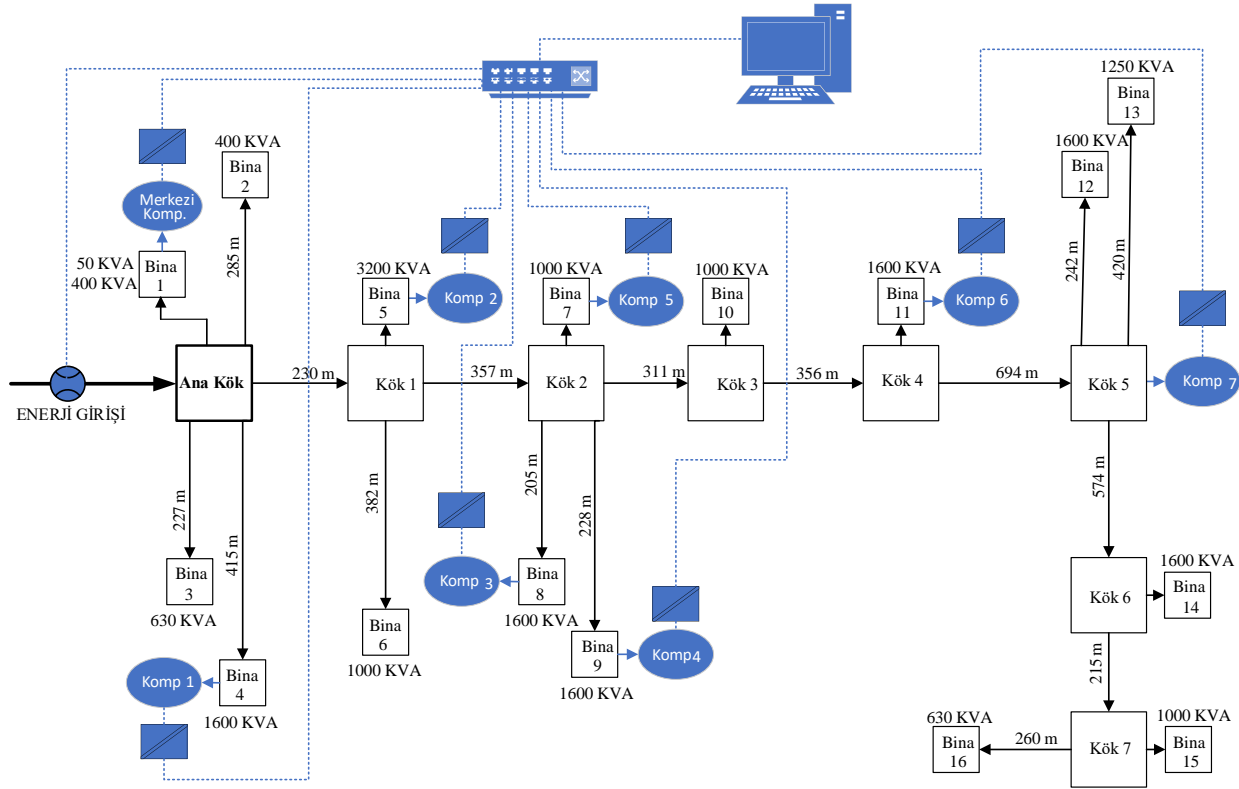
Şekil 1'de T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 ve T_6 tristörleri, L indüktansı ve V_s şebeke gerilimini göstermektedir. Bu devrede çekilecek güç miktarını i_L akımı, bu akımı ise $X_L = \omega L$ belirler.

$$i_L = \frac{V_m}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (5)$$

Denklem 5'te; i_L bobin üzerinden akan akımı, V_m şebeke geriliminin genliğini, ω açısal hızı, L bobinin indüktansını ve α ise gecikme açısını temsil etmektedir. Denklem 5'te verildiği gibi L 'nin devrede tutulma süresi ayarlanarak şebekeden çekilen reaktif güç belirlenmektedir.

Uygulama Yapılan Elektrik Şebekesi

Üzerinde çalışılan elektrik güç şebekesi Şekil 2'de verilmiştir. Bu bölgenin elektrik enerjisini sağlayan elektrik şebekesi, orta gerilim (OG-31,5 kV) ve alçak gerilim (AG-FF/380 V ve FN/220 V) kısımlarından oluşmaktadır. Şebekenin OG kısmı üç fazlı sistem ve AG kısmı bir fazlı ve üç fazlı sisteme sahip olup enerji akışı Şekil 2'de belirtildiği gibi ok yönündedir. Güç şebekesinin OG kısmı ana dağıtım noktası ile binaların girişlerine kadar olan kısımlardan oluşmaktadır ve enerji transferi XLPE kablolar yardımıyla yapılmaktadır. OG şebeke hattının uzunluğu yaklaşık olarak 5,4 (5,4x3=16,2 kablo uzunluğu) km'dir. Bundan dolayı XLPE kablolarının şebekeye olan kapasitif güç etkisi yaklaşık 290 kVAR olarak hesaplanmıştır. AG kısmı ise çevre aydınlatma, spor tesisleri ve 16 yapının iç tüketiminden oluşmaktadır. Şebekeden çekilen güç mevsim koşulları, işyeri özelliği ve çalışma saatlerine bağlı olarak oldukça değişkendir. Yapılan iki yıllık izleme neticesinde şebekenin önemli problemlerinden birinin de dengesiz güç tüketimi olduğu görülmüştür. Mevsimlere bağlı olarak aktif anlık güç tüketiminin 0,1 MW ile 1,9 MW arasında değiştiği tespit edilmiştir. Örneğin kış mevsiminde aktif anlık güç tüketimi gece ortalama 0,6 MW iken gündüz için bu değer 1,4 MW'tır. Yaz mevsimi tatil zamanı ve gündüz saatlerinde tüketim 0,1 MW olarak ölçülmüştür. Şebekenin hizmet alanı kamusal olduğu için anlık yük değerlerinin gece, gündüz, çalışma saatleri, tatil günleri veya mevsimlere bağlı olarak uç noktalarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu koşullar altında aktif-reaktif güç dengesinin sağlanabilmesi için dinamik kontrol gerekmektedir.

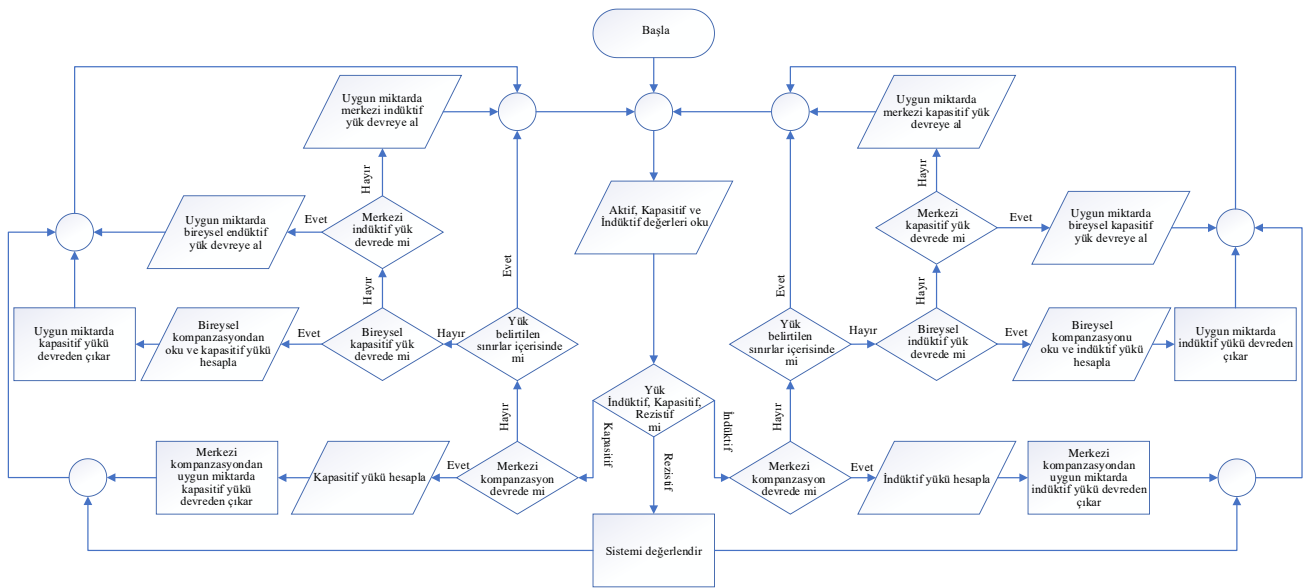


Şekil 2. Uygulama Yapılan Dal-Budak Elektrik Güç Şebekesi

Deneysel Metot

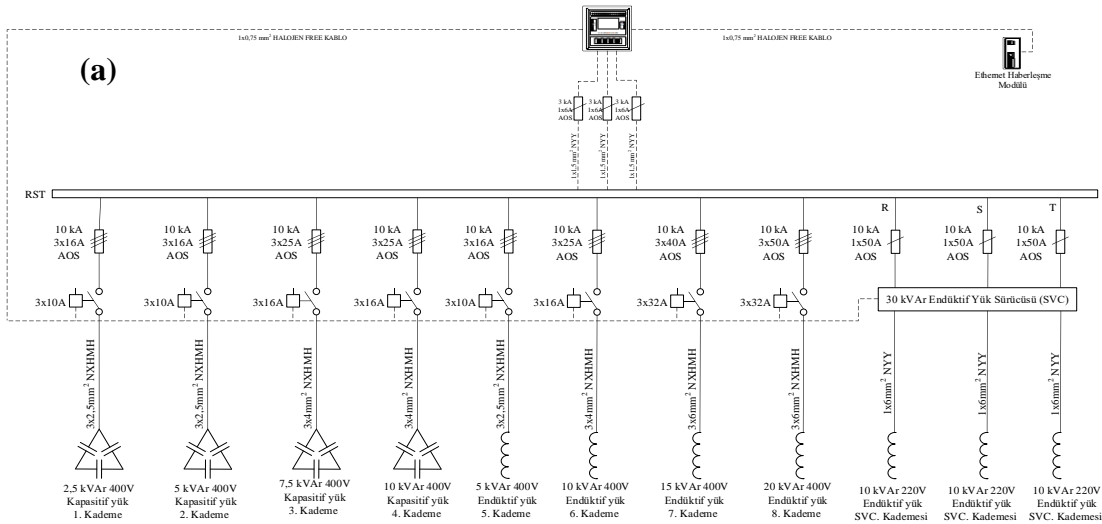
Problem alanı olan elektrik şebekesinde tespit edilen reaktif güçleri dengelemek veya gidermek için planlanan kompanzasyon uygulaması çalışma prensibi şöyledir: İlk olarak şebeke bir bütün olarak düşünülmüş ve bu şebekede meydana gelen yük dengesizliklerinin kendi içerisinde çözülmesi amaçlanmıştır. Burada merkezi bir sistem ile hem şebekenin ana giriş kısmı hem de her bir binanın tükettiği yük tespit edilerek kapasitif ve indüktif yüklerin karşılıklı olarak yok edilmesi varsayımına odaklanılmıştır. Dolayısıyla kompanzasyon sisteminin gerekmediği sürece kullanılmaması öngörülmektedir. Bunun için Şekil 3'te verilen merkezi kompanzasyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma Şekil 2'de verilen şebekeyi anlık olarak kontrol etmekte olup şebekenin ihtiyacına göre reaktif güç dengesini dinamik olarak korumaktadır. Dinamik sistemin kurulumu şöyledir: Şekil 2'de belirtildiği gibi şebekenin ana girişi ve yük dengesizliklerinin fazla olduğu noktalar dikkate alınarak 8 ayrı noktada kompanzasyon tesis edilmiştir. Kompanzasyonun olduğu her bir birimin bilgisi merkezi kontrol noktasına iletilmekte ve merkezi kontrol ünitesi bu bilgileri değerlendirerek hangi birimlerin devreden çıkacağı veya hangi birimlerin devreye gireceğine karar vermektedir.

Her bir bina için; eğer binanın yükü indüktif ise kapasitif kompanzasyon, eğer binanın yükü kapasitif ise indüktif kompanzasyon sistemi kurulmuştur. Kompanzasyon sisteminde bulunan reaktör ve kapasitör kademeleri yine binanın yük karakteristiğine bağlı olarak seçilmiştir. Şebekenin genel yük karakteristiği kapasitif olduğu için her bir kompanzasyon panosunda SVK kontrollü 3x10 kVAR şönt reaktör kullanılmıştır. Bu şönt reaktörlerin görevi şebekenin hassas yük dengesini sağlamaktır. Bu bilgiler ışığında her bir bina için Şekil 4'te tek hat şeması verilen kompanzasyon sistemi tasarlanarak devreye alınmıştır.



Şekil 3. Merkezi Kompanzasyon Çalışma Algoritması

Çalışmada belirtilen hedeflere ulaşmak için Şekil 2'de verilen güç şebekesi analiz edilerek şebekeye bağlı olan yükler belirlenmiştir. Yük akışı ve yük değerleri ölçülerek kompanzasyonun kurulacağı noktalar, güç yoğunluğu ve güç dengeleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kompanzasyon sistemini dinamik olarak kontrol edebilmek için panoların kurulduğu binalar ile kontrol bilgisayarı arasındaki iletişimi sağlayacak internet altyapısı kurulmuştur. Smart power enerji izleme programı ile şebekenin davranışları izlenmiştir. Elde edilen verilerle şebekenin anlık olarak güç dengesini sağlayacak dinamik kontrol sistemi algoritması tasarlanmıştır.

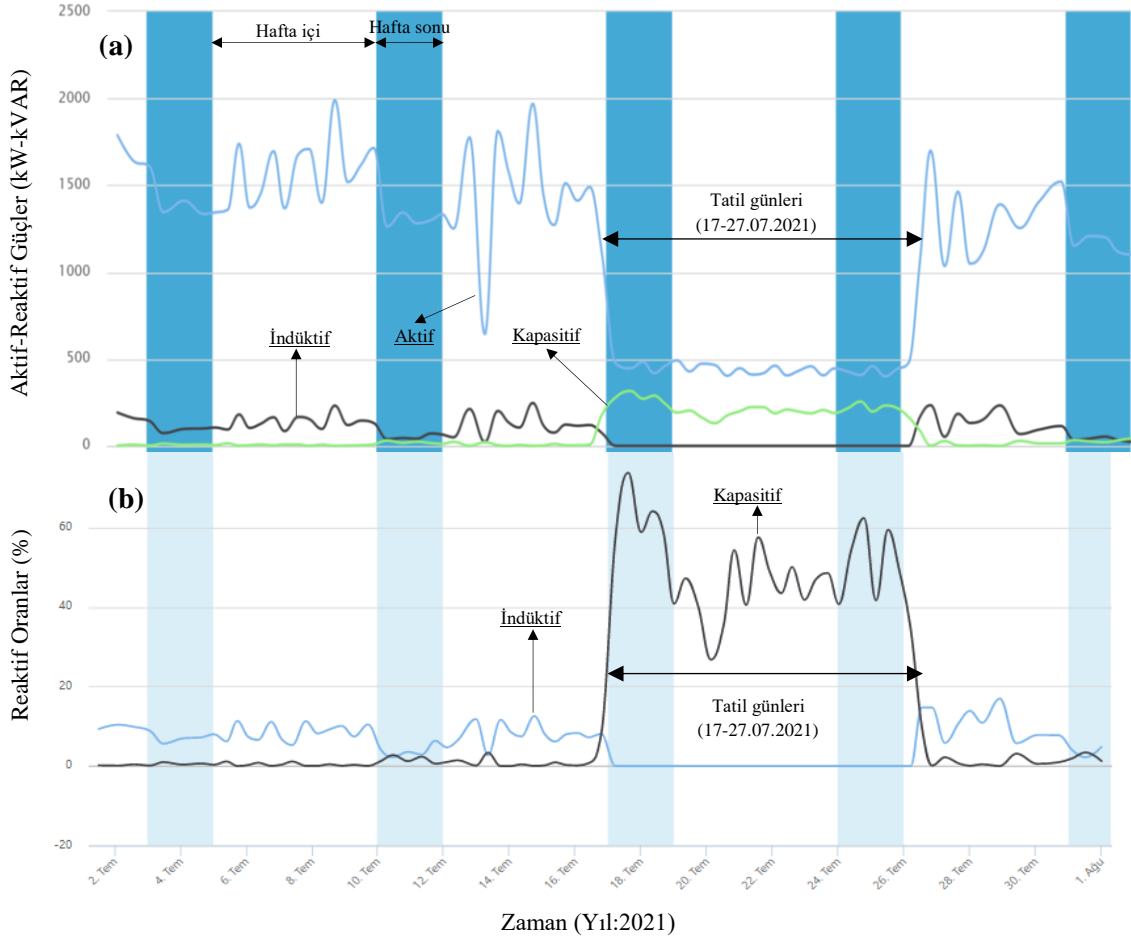


Şekil 4. Kompanzasyon Tek Hat Şeması ve Uygulaması

BULGULAR VE TARTIŞMA

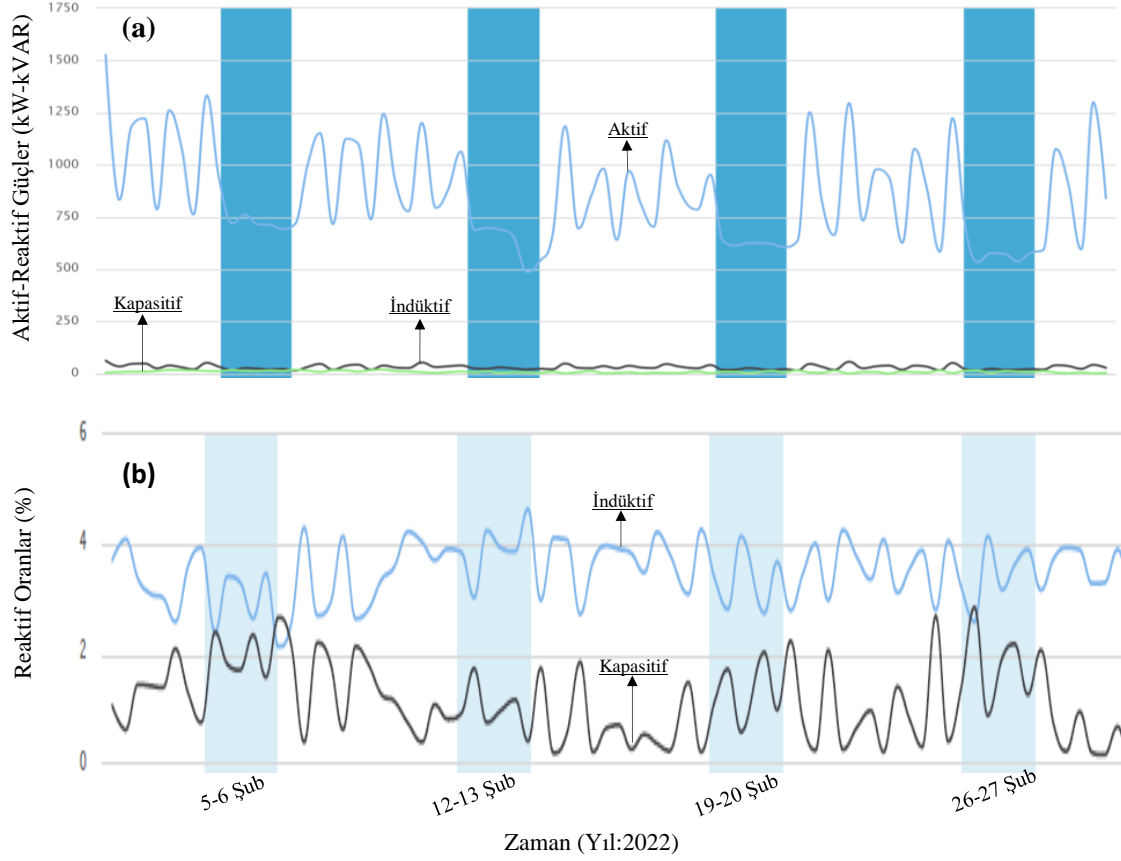
Gerçekleştirilen sistemin çalışma performansını analiz etmek için şebekenin dinamik kompanzasyon uygulaması öncesi verileri ile dinamik kompanzasyon uygulaması sonrası verileri karşılaştırılmıştır.

Analiz edilen şebekenin 2 Temmuz-1 Ağustos 2021 tarihlerine ait sırasıyla aktif-reaktif anlık güç tüketimleri ve reaktif güç oranları Şekil 5'te verilmiştir. Belirtilen zaman aralığında güç tüketimindeki değişim, güç oranları ve şebekenin karakteristik özelliği oldukça belirgin olup problem çözümünde önemli ipuçları vermektedir. Şekillerde mavi ince barlar hafta sonlarını beyaz barlar ise hafta içi zaman dilimlerini göstermektedir. Şekil-5.a aktif güç tüketiminin gece-gündüz, hafta sonu-hafta içi ve resmî tatil günlerine göre değişimini göstermektedir. Bu zaman dilimlerinde tüketilen güçlerin oranları sabit değildir. Örneğin ortalama tüketimi 1500 kW olan aktif güç, 17-27 Temmuz tarihleri arasında ortalama 500 kW kadar olup yaklaşık olarak 2/3 oranında azalma söz konusudur. Buna karşın kapasitif güç tüketiminde lineer olmayan bir artış gözlemlenmiş olup bu değer aktif gücün %75 oranında yaklaşık olarak 375 kVAR olmuştur. Bu durumun sebebi şebekedeki aktif gücün minimum seviyeye inmesiyle ve kısmen endüktif yüklerin devre dışı kalmasıyla birlikte XLPE iletkenlerinin kapasitif özelliklerinin şebekede oldukça baskın hale gelmesi olarak ifade edilebilir. Diğer bir ifadeyle; belirtilen zaman diliminde statik bir yapı sergileyen şebeke harmoniklerinin olmadığı ve buna bağlı olarak kapasitif yükün üstel bir biçimde artış gösterdiği düşünülmektedir. Resmî tatil günlerinde kapasitif oranın yaklaşık %75'lere kadar uzanarak yasal sınırlar (%20) üzerine çıktığı görülmektedir. Dinamik kontrol ile bu olgu anlık olarak kontrol edilerek aktif-reaktif güç dengesizlikleri belirtilen yasal sınırlar çerçevesinde tutulmuş ve bu durum Şekil 6'da gösterilmiştir.

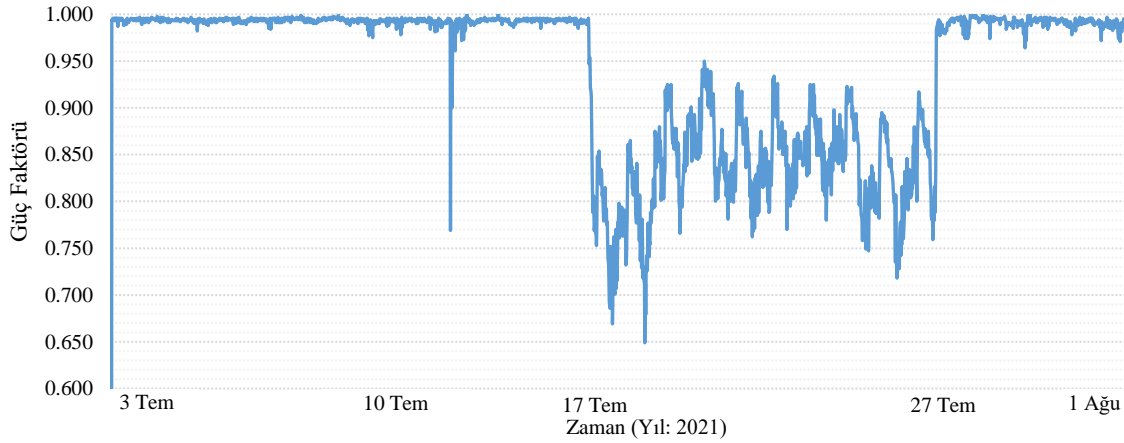


Şekil 5. a. Dinamik Kompanzasyon Öncesi Aktif-Reaktif Güç Grafiği b. Reaktif Oranlar

Şekil 6. a ve b'de 2 Şubat–2 Mart 2022 tarihlerine ait kompanzasyon sonrası aktif, reaktif güç ve reaktif oranlar görülmektedir. Şekil 6.a'dan aktif gücün hafta sonu tatili dışında yaklaşık olarak 750-1000 kW arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Hafta sonlarını temsil eden mavi bar grafiklerde görüldüğü üzere aktif güç 500-750 kW arasında değişmektedir. Kış aylarında alınan ölçümler olduğu için (soğutma sistemleri devre dışı) yaz aylarındaki ölçümlere göre daha az aktif güç tüketimi göze çarpmaktadır. Şekil 5.a'da olduğu gibi Şekil 6.a'da da indüktif reaktif gücün aktif güce eş zamanlı değişimler sergilemektedir. Hafta sonları aktif gücün düşmesine rağmen, Şekil 5.a'nın aksine, kapasitif reaktif güçte herhangi bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Şekil 6.b'de ise indüktif reaktif oranının %4 kapasitif reaktif oranının ise %1 civarında olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda dinamik kompanzasyon öncesi yasal sınırlar dışında olan kapasitif oranlar dinamik kompanzasyon sonrasında yasal sınırlar içerisinde tutulmuştur. Böylece kurulan dinamik kompanzasyon sisteminin XLPE iletkenlerinin şebeke üzerindeki kapasitif etkilerini istenen değerler arasında tuttuğu, Şekil 5 ve Şekil 6'da karşılaştırmalı olarak analiz edildiğinde açıkça görülmektedir.



Şekil 6. a. Dinamik Kompanzasyon Sonrası Aktif-Reaktif Güç Grafiği b. Reaktif Oranlar

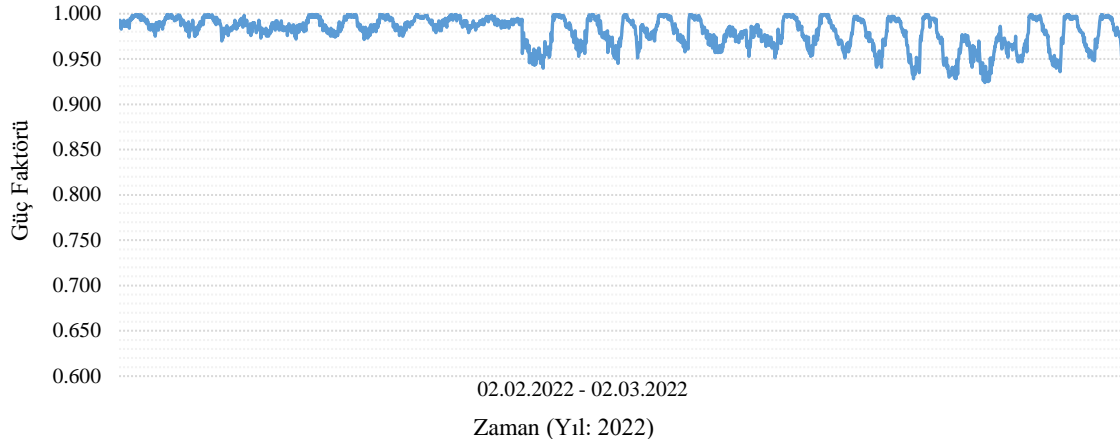


Şekil 7. Kompanzasyon Öncesi Güç Faktörü

Şekil 7’de, kompanzasyon uygulaması öncesinde, ele alınan şebekenin güç faktörü değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde; tatil günleri olan 17-27 Temmuz tarihlerinde güç faktörünün 0,65’e kadar düştüğü ve oldukça dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir. Normal çalışma günlerinde ise güç faktörünün genel olarak 0,98 değeri üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca grafikte bir bölgede, çalışma günleri, güç faktörünün anlık olarak 0,76’ya düştüğü tespit edilmiştir. Bu düşüşün nedeninin anlık bir reaktif gücün devreye girmesinin olabileceği düşünülmektedir.

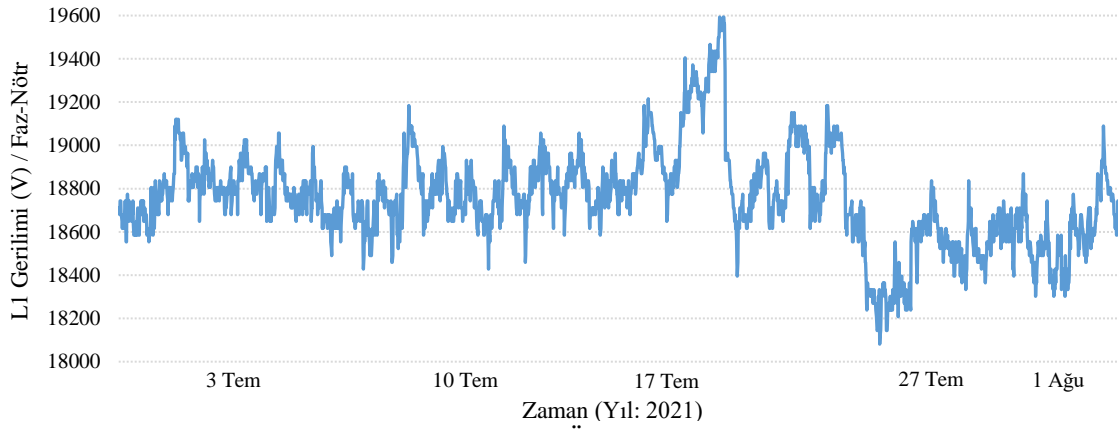
Şekil 8’de kompanzasyon işlemi sonrasında şebekenin güç faktörü grafiği görülmektedir. Bu grafikte güç faktörünün genel olarak 1-0,95 arasında değiştiği gözlemlenmektedir yani sistemin aktif olarak şebekeyi kontrol ettiği ifade edilebilir. Bazı noktalarda güç faktörünün 0,92’ye kadar düştüğü görülmekte ve bu durumun şebekede meydana gelen büyük yük değişimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sistemin bu dalgalanmalardan sonra istenen güç değerlerini tekrar sağladığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla Şekil 7 ve Şekil 8’de verilen grafikler karşılaştırmalı olarak

incelendiğinde; şebeke için kurulan dinamik kontrollü merkezi kompanzasyon sisteminin kararlı çalıştığı görülmektedir.



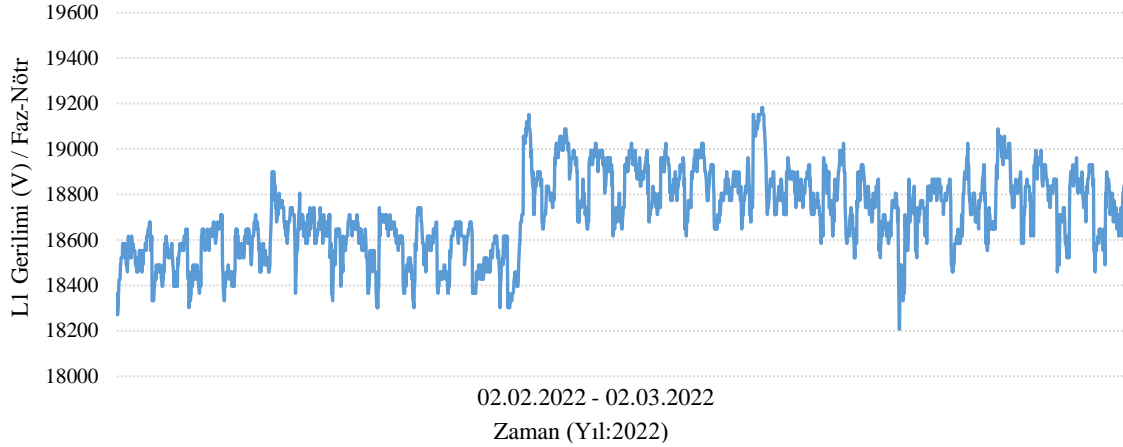
Şekil 8. Kompanzasyon Sonrası Güç Faktörü

Şekil 9’da şebekenin bir fazına ait, kompanzasyon öncesi efektif gerilim grafiği görülmektedir. Gerilim değerinin normal günlerde genel olarak ortalama 18400-19000 V aralığında değiştiği görülmektedir. Ancak Şekil 5’te bahsedilen resmî tatil günlerinde XLPE iletken kaynaklı kapasitif güç etkisiyle şebeke geriliminde ani yükselme olduğu (19600 V) ve daha sonra bu tatil günlerinde şebeke geriliminde oldukça yüksek gerilim dalgalanmaları gözlemlenmiştir. Bu durumun şebeke gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür ve şebekeye bağlı bulunan cihazların verimini olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmektedir.



Şekil 9. Kompanzasyon Öncesi Şebeke Gerilimi

Yukarda bahsedilen gerilim dengesizliğinin kompanzasyon uygulaması sonrasında minimize edildiği Şekil 10’da verilen grafikten anlaşılmaktadır. Bu grafikte gerilimin 18500-18900 V aralığında ortalama bir seyir izlediği ve bu durumun gerilim kalitesi açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 10. Kompanzasyon Sonrası Şebeke Gerilimi

SONUÇLAR

Bu çalışmada kurulu gücü 20 MW olan ve OG-AG kısımlarından oluşan bir dal-budak şebeke; aktif-reaktif güç dengesizlikleri, güç faktörü ve gerilim kalitesi bakımından ele alınmıştır. Şebekeden elde edilen veriler incelendiğinde; tatil günlerinde (aktif güç tüketiminin en az olduğu zaman dilimleri) XLPE iletkenlerinin oluşturduğu ve şebekenin güç dengesi, gerilim kalitesi ve güç faktörünü olumsuz yönde etkileyen kapasitif reaktif güçler analiz edilmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda; tespit edilen olumsuzlukları gidermek veya izin verilen yasal sınırlar içerisinde tutmak amacıyla ele alınan şebeke için merkezi dinamik kontrollü kompanzasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın en önemli noktalarından birisi anlık ve sürekli değişen yük durumlarında dinamik kontrol ile şebekeye ait güç oranlarının istenen değerler aralığında tutulmasını sağlamaktır. Bunu yapabilmek için ilk olarak OG ve AG kısımlarından oluşan şebekenin (Şekil 2) enerji girişi ve her bir kompanzasyon bölgesinden (8 adet) alınan veriler anlık olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu veriler ışığında merkezi bir kontrol ile AG kısmında oluşan indüktif yükler ve OG kısmında (XLPE) var olan kapasitif yükler ile elimine edilmiştir. Dinamik kontrollü sistem kullanılarak, doğal bir kompanzasyon ile şebekenin güç dengeleri belirtilen değerlerde tutulup şebekenin verimi ve kararlılığı artırılmıştır. Ayrıca uygulama kapsamında kompanzasyon panolarının kurulacağı bölgeler her bir nokta için, yük değerleri analiz edilerek, tespit edilmiştir. Bu kompanzasyon sistemleri doğal kompanzasyonun yetersiz olduğu durumlarda merkezi kontrol sistemi tarafından yönetilmektedir. Şebekede var olan reaktif güçlerin giderilmesinde Tristör Kontrollü Reaktör (TKR) tipi dinamik kontrollü bir SVK her bir kompanzasyon sistemine entegre edilmiştir. Bu entegrasyon neticesinde; şebekede güç dengesizliğine neden olan kapasitif güçler hassas bir şekilde faz bazında kompanse edilerek kapasitif reaktif güç oranı %70 seviyelerinden %1 seviyelerine indirilmiştir. Aynı zamanda şebeke geriliminde oluşan dalgalanmaların en aza indirildiği (Şekil 10) ve güç faktörünün de 1'e yaklaştırıldığı (Şekil 8) görülmüştür.

Teşekkür: Bu çalışmaya katkı sunan Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Alcalá, J., Cárdenas, V., Aganza, A., Gudiño-Lau, J., & Charre, S. (2020). The performance of the BTB-VSC for active power balancing, reactive power compensation and current harmonic filtering in the interconnected systems. *Energies*, <https://doi.org/10.3390/en13040831>

Bajaj, M., & Rana, A.S. (2018). Harmonics and reactive power compensation of three phase induction motor drive by photovoltaic-based DSTATCOM. *Smart Science*, 6(4), <https://doi.org/10.1080/23080477.2018.1505114>

Chenyi, L., Lei, X., Shuilian, H., Shengdong, Z., & Xiaobo, F. (2018, September). Research of comprehensive application of intelligent low-voltage power distribution units in improving power quality. In 2018 China International Conference on Electricity Distribution. IEEE.

- ElGebaly, A.E., Hassan, A.E.W., El-Nemr, M.K., (2019, January). Reactive power compensation by multilevel inverter STATCOM for railways power grid. In 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE.
- Ferreira, S.C., Gonzatti, R.B., Pereira, R.R., Henrique da Silva, C., Borges da Silva, L.E., Lambert-Torres, G. (2018). Finite control set model predictive control for dynamic reactive power compensation with hybrid active power filters. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 65(3), 10.1109/TIE.2017.2740819
- Kashif, M., Hossain, M.J., Zhuo, F., & Gautam, S. (2018). Design and implementation of a three-level active power filter for harmonic and reactive power compensation. *Electric Power Systems Research*, 165 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.09.011>
- Khalili, M., Namdari, F., & Rokrok, E. (2020). Traveling wave-based protection for SVC connected transmission lines using game theory. *Electrical Power and Energy Systems*, 123 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106276>.
- M. Chavan, P., & P. Chavan, G. (2018, August). Interfacing of wind energy to grid using static compensator and load reactive power compensation. In 2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET). IEEE.
- Skamyin, A.N., & Vasilkov, O.S. (2019, June). Power components calculation and their application in presence of high harmonics. In 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM). IEEE.
- Smadi, A.A., Lei, H., & Johnson, B.K. (2019, October). Distribution system harmonic mitigation using a PV system with hybrid active filter features. In 2019 North American Power Symposium (NAPS). IEEE.
- Smrithi, K., Vittappan, S., & Jayanand, B. (2017, October). A novel convertertopology based STATCOM for reactive power compensation. In 2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). IEEE.
- Tellez, A.A., Lopez, G., Isaac, I., & Gonzalez, J.W. (2018). Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. *Heliyon*, 4(2018), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00746>
- Web1: Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (2022). <https://turkiye.un.org/tr/sdgs/7/> Accessed 04.07.22.
- Web2: Dağıtım Lisansı Sahibi Tüzel Kişiler Ve Görevli Tedarik Şirketlerinin Tarife Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar (2015). <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1994/dagitim-lisansi-sahibi-tuzel-kisiler-ve-gorevli-t#/> Accessed 04.07.22.
- Xiong, L., Dai, K., Chen, X., Wang, X., & Dai, Z. (2018, March). Reactive power compensation and resonance damping for three-phase buck-type dynamic capacitor. In 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE.
- Zimann, F.J., Stangler, E.V., Neves, F.A.S., Batschauer, A.L., & Mezaroba, M. (2020). Coordinated control of active and reactive power compensation for voltage regulation with enhanced disturbance rejection using repetitive vector control. *Energies*, 13(11), <https://doi:10.3390/en13112812>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.07.2022
Kabul Tarihi : 11.08.2022

Received Date : 10.07.2022
Accepted Date : 11.08.2022

MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS CONTAINING WOOD BOTTOM ASH INSTEAD OF CEMENT

ÇİMENTO YERİNE ODUN TABAN KÜLÜ İÇEREN HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Mehmet Timur CİHAN¹* (ORCID: 0000-0001-5555-5589)
Yunus Emre AVŞAR¹ (ORCID: 0000-0001-5197-0267)

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet Timur CİHAN, mehmetcihan@nku.edu.tr

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂) released into the atmosphere during the production of Portland cement (PC) is one of the important factors causing global warming. Therefore, studies are carried out on different materials to reduce PC consumption. The effect levels of the wood bottom ash (WBA) ratio and specimen age on the response variables (compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity) were investigated in this study. Mortar specimens were produced using PC, WBA, CEN standard sand, and distilled water. The produced specimens were cured in water until the test day. WBA ratios are 0%, 5%, 10%, 20%, 35% and 50% by weight of binder. As a result, it was determined that the optimum WBA ratio was 5%. In addition, R² values of response variables were found to be high (ultrasonic pulsed wave velocity; 0.8925, flexural strength; 0.9356, compressive strength; 0.9404) by analysis of variance (ANOVA). This shows that the models have a high correlation. Moreover, the terms added to the models have a significant effect on the responses.

Keywords: Wood bottom ash, ultrasonic pulse velocity, flexural strength, compressive strength, ANOVA

ÖZET

Portland çimentosu (PÇ) üretimi sırasında atmosfere salınan karbondioksit (CO₂), küresel ısınmaya neden olan önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle PÇ tüketimini azaltmak için farklı malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, değişkenlerin (odun taban külü (OTK) oranı ve numune yaşı) tepki değişkenleri (ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilmede çekme ve basma dayanımı) üzerindeki etki düzeyleri araştırılmıştır. Harç numuneleri; PÇ, OTK, CEN standart kum ve distile su kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numuneler, deney gününe kadar suda kür işlemine tabi tutulmuştur. OTK ilave oranları bağlayıcı ağırlığına %0, %5, %10, %20, %35 ve %50'dir. Sonuç olarak, optimum OTK kullanım oranının %5 olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, varyans analizi (ANOVA) ile tepki değişkenlerinin R² değerlerinin yüksek olduğu (ultrasonik atımlı dalga hızı; 0.8925, eğilme dayanımı; 0.9356, basınç dayanımı; 0.9404) bulunmuştur. Bu durum, modellerin yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca modellerdeki terimler, tepki değişkenleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Odun taban külü, ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı, ANOVA.

INTRODUCTION

Concrete is produced by over annually 7 billion tons in the world (Topçu, 2021). While the amount of concrete produced in EU countries in 2020 was 253 million m³ (ERMCO, 2020), 95 million m³ in Turkey (THBB, 2020). Concrete has many advantages (Erdoğan, 2015) as well as some disadvantages. The crucial disadvantage of concrete in sustainable production is the amount of carbon dioxide (CO₂) released in producing Portland cement (PC) used as a binder. The cement industry is estimated to be responsible for approximately 8% of the amount of CO₂ released worldwide (Preston, 2018). Using different materials has become popular to reduce the amount of cement in concrete due to intense energy consumption and harmful environmental effects.

As a result of the combustion of coal in coal-fired boilers, different types of coal ash such as fly ash (FA), coal bottom ash (CBA), and boiler slag are formed. The heavy and coarse particles that dropped at the bottom of the boiler furnace are called CBA (Singh, 2018). The amount of the CBA is the majority of industrial waste generated from coal-fired thermal power plants (Baite et al., 2016; Nikbin et al., 2016; Kim and Lee, 2015). It has a large, porous, light, glassy, and granular structure and is grayish (Abubakar and Baharudin, 2012). It is used as cement raw material, concrete additive, infrastructure stabilization material, and filler (ECOBA, 2016).

There have been some studies about cement replacement with the CBA (Khongpermgason et al., 2020; Oruji et al., 2017; Aydın, 2016; Kim and Lee, 2011). The wood is used as fuel in some industrial areas (industrial facilities that burn pulp, paper, and wood or power plants that burn wood), and wood bottom ash (WBA) is formed as a by-product. While most of the WBA is disposed of in landfills, the remaining part is used by replacing fine aggregate, coarse aggregate, and PC due to its pozzolanic properties (Akinyemi, 2021).

Adamu (2017) obtained compressive strength for 28 and 90 days as 21.2 and 31.4 MPa, respectively, for the samples used 20% and 5% WBA for PC and a w/c ratio of 0.55. Raheem and Adenuga (2013) determined that using 10% WBA for PC in concrete with a w/c ratio of 0.5 increased the workability. In addition, they obtained compressive strength for 28 days as 19.1 and 21.1 MPa, respectively, for the samples containing 5% and 10% WBA. Nader et al. (2020) studied the effect of 0-50% WBA replacement for PC on compressive strength. As a result, the compressive strength was obtained as 18.2 and 11.8 MPa, respectively, for mortar samples containing 10% and 20% WBA. Ulewicz and Jura (2017) investigated the optimum composition ratio of FA and WBA. WBA/FA composition ratios are 90/10, 80/20, 10/90, and 20/80, and the usage ratio for PC is 20%. As a result, the highest compressive strength for 28 days was 68.5 MPa, obtained from a composition ratio of 10/90. Ghorpade (2012) investigated the change in compressive strength of concrete depending on the WBA ratio (0%-30%) and sample age (28 and 90 days). The compressive strength was obtained as 39.1-44.3 MPa and 39.6-50.6 MPa, respectively, for 28 and 90 days. As a result, the optimum WBA ratio was determined as 10%. Chowdhury et al. (2015) investigated the mechanical and structural properties of concrete containing partially WBA instead of PC. The highest compressive, flexural, and tensile strengths for 28 days are 36.5, 5.63, and 3.24 MPa, respectively. The increase in w/c and WBA ratio decreased the strength, slightly. In addition, it was determined that WBA could be replaced for PC without adversely affecting the strength properties of concrete since it contains amorphous silica. Ramos et al. (2013) investigated the mechanical strength, carbonation resistance, and ASR expansion of mortars containing partially WBA instead of PC. Increasing the WBA ratio in the mortar was not affected the mechanical properties. In addition, it decreased the ASR expansion and increased the carbonation depth. Akinyemi et al. (2020) investigated the effect of WBA in improving the properties of cement mortar modified with banana fiber and polymer additives. As a result, using more than 10% WBA reduced the tensile strength. In addition, it has been determined that the samples prepared with 10% WBA have significant thermal insulation properties.

Models with high estimation accuracy were obtained depending on terms of the effect levels of the WBA ratio and specimen age on the response variables (compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength) in the study. It is aimed to balance the ecosystem, alleviate the burden on natural resources, reduce PC consumption, and minimize carbon footprint thanks to the efficient using WBA.

MATERIAL AND METHOD

In this study, the effects of wood bottom ash (WBA) ratio and specimen age on the compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity were investigated.

Material

PC (CEM I 42.5 R), WBA, standard sand, and distilled water were used to produce the mortar samples. The physical and chemical properties of PC are given in Table 1, and SEM images of the PC are shown in Figure 1. Figure 1 shows that the cement grains are angular, and the grain surfaces are smooth. In addition, no porous structure is observed in the cement grains (Figure 1).

Table 1. Properties of the PC

Chemical, %										
SiO ₂ -Solute	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl	Insoluble Residue	NaO/K ₂ O	Loss of Ignition	F. CaO – Free Lime
19.78	62.65	5.25	3.59	0.84	3.24	0.04	0.97	0.57/0.75	2.44	1.21
Physical										
Specific Gravity, gr/cm ³	Setting Time, min.		Volume Expansion, mm	Fineness						
	Start	Finish		Specific Surface, cm ² /gr	Sieve Residue (45µm), %	Sieve Residue (90µm), %				
3.16	119	170	1	3550	3.1	0.2				

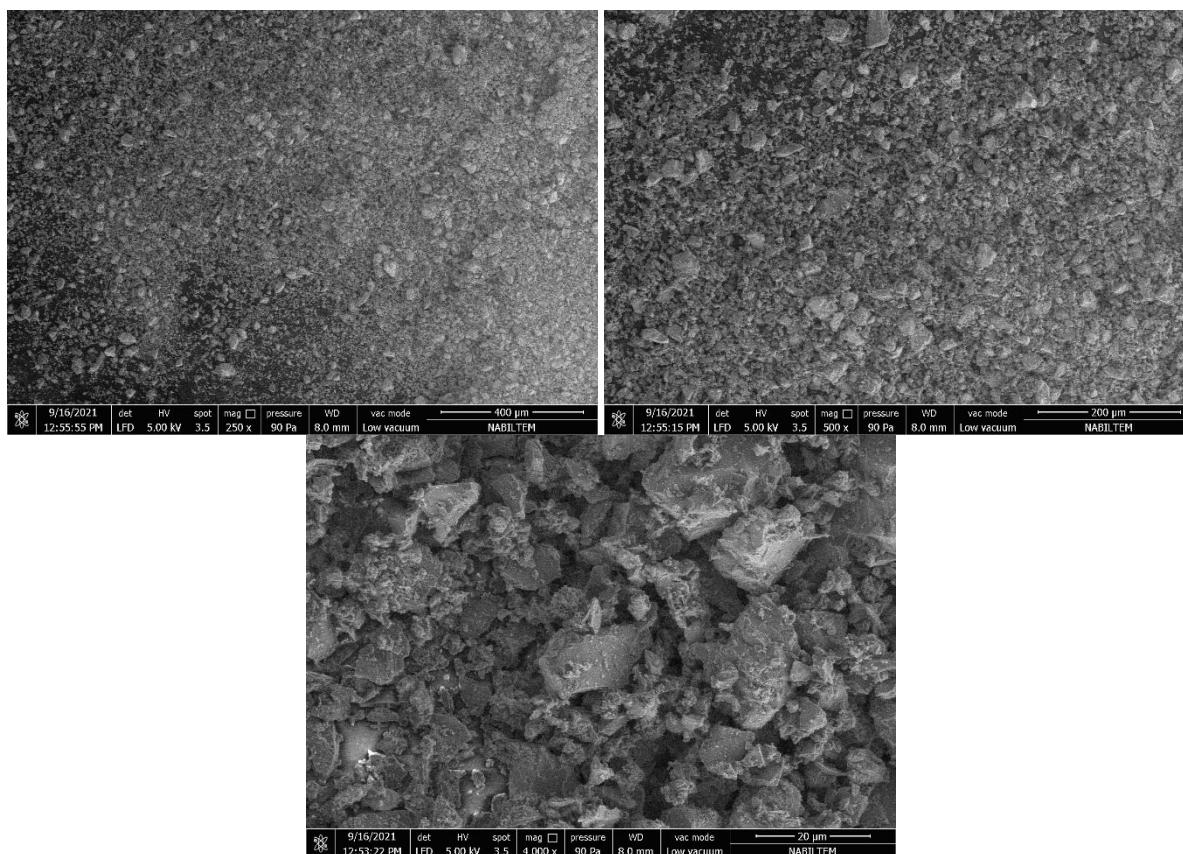


Figure 1. SEM Images of the PC

In the study, WBA obtained from the furniture industry in the Thrace region was used. Wood bottom ash was obtained by burning pine, oak, and poplar woods. Firstly, WBA was ground by the Los Angeles abrasion machine. 75-micron WBA (Figure 2) was used in the production of mortar. The chemical properties of WBA are given in Table 2, and SEM images of WBA grains are shown in Figure 3. WBA grains have an angular, porous, and rough structure (Figure 3). In specimens with a high WBA ratio and a constant water/cement ratio, the workability decreases due to the increased water requirement from the grain structure of WBA.



Figure 2. Undersize WBA Grains from 75-Micron

Table 2. The Chemical Properties of WBA

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O/K ₂ O	Loss of Ignition
11.74	33.14	4.64	2.53	5.75	1.51	1.01/1.89	17.07

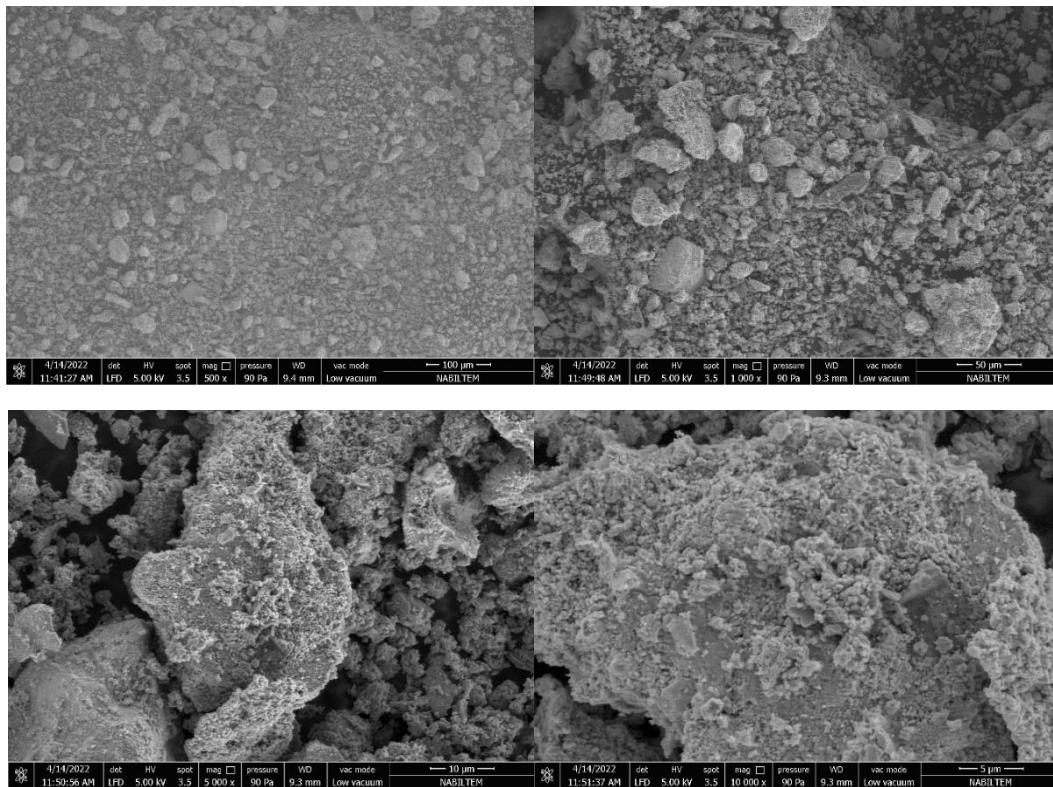


Figure 3. SEM Images of WBA Grains

Method

In the study, 72 mortar specimens (40×40×160 mm) were produced according to the TS EN 196-1 (2016). The produced samples were cured in water until the test day. WBA ratios are 0%, 5%, 10%, 20%, 35% and 50% by weight of binder. The experimental design is given in Table 3. The workability, compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity of the specimens containing partially WBA were determined.

Table 3. The Experimental Design

Codes	Number of samples	WBA ratio by weight of PC	Sample age	PC	Water	Sand	WBA
	Piece	%	Day	g	g	g	g
Ref-28	6	0	28	900	450	2700	0
TKÇ-%5-28	6	5	28	855	450	2700	45
TKÇ-%10-28	6	10	28	810	450	2700	90
TKÇ-%20-28	6	20	28	720	450	2700	180
TKÇ-%35-28	6	35	28	585	450	2700	315
TKÇ-%50-28	6	50	28	450	450	2700	450
Ref-60	6	0	60	900	450	2700	0
TKÇ-%5-60	6	5	60	855	450	2700	45
TKÇ-%10-60	6	10	60	810	450	2700	90
TKÇ-%20-60	6	20	60	720	450	2700	180
TKÇ-%35-60	6	35	60	585	450	2700	315
TKÇ-%50-60	6	50	60	450	450	2700	450
TOTAL	72	-	-	8640	5400	32400	2160

The workability of the mortar specimens was determined according to the TS EN 1015-3 (2000). The flow-table test is shown in Figure 4. Flow-table values of mortars with WBA are approximately 11.75-16.5 mm (~15.75 mm in reference samples). 5% and 10% WBA have increased the flow-table value by 1 mm (~16.5), while 50% WBA reduced by 4 mm (~11.75).

**Figure 4.** Flow-Table Test

Flexural strength (f_r , MPa) was determined according to TS EN 196-1 (2016) by applying 3-point loading (Figure 5a). The compressive strength was determined by the test (Figure 5b) performed according to the TS EN 196-1 (2016) on half prisms divided into two parts during the flexural test.

**Figure 5.** Flexural Strength (a) and Compressive Strength (b) Tests

The effect levels of the WBA ratio and sample age on the compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength were determined by ANOVA, and models were created for actual values. Design Expert V13 Trial” (StatEase, 2021) program was used for the Experimental design and ANOVA. The variation of the effect variables is given in Table 4.

Table 4. The Variation of the WBA Ratio and Specimen Age

Factor	Units	Type	Minimum	Maximum	Coded low	Coded High	Mean	Std.*
A WBA ratio	%	Numerical	0.00	50.00	-1 ↔ 0.00	+1 ↔ 50.00	20.00	17.94
B Specimen age	day	Numerical	28.00	60.00	-1 ↔ 28.00	+1 ↔ 60.00	44.00	16.34

*Std., standard deviation

EXPERIMENTAL RESULTS

The run point values were obtained by taking the average of the test results of the 3 specimens (24 run points and 72 specimens). The variations of compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity depending on the WBA ratio are shown in Figure 6. Compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural tensile decreased in 28 and 60-day specimens with the increase in WBA ratio (increase in void ratio). A little increase was shown in flexural strength and compressive strength of 28-day specimens with 5% WBA. However, this increase does not affect the decreasing trend of the strengths. Compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength at 28 and 60-day specimens decrease moderately up to 35% WBA. However, at a 50% WBA ratio, the decrease observed in the 28-day specimens is greater than in the 60-day specimens. It shows that the effect of WBA on mechanical properties increases in advanced ages. In the literature, experiments have been carried out on 28 and 90 days of samples, and the WBA ratios used range from 0% to 30%. The obtained compressive strengths decrease in 28-day specimens with the increase in WBA ratio. However, an increase in compressive strength is observed with the increase in WBA ratio in advanced age samples. Therefore, the experimental results obtained within the scope of the study are compatible with the literature.

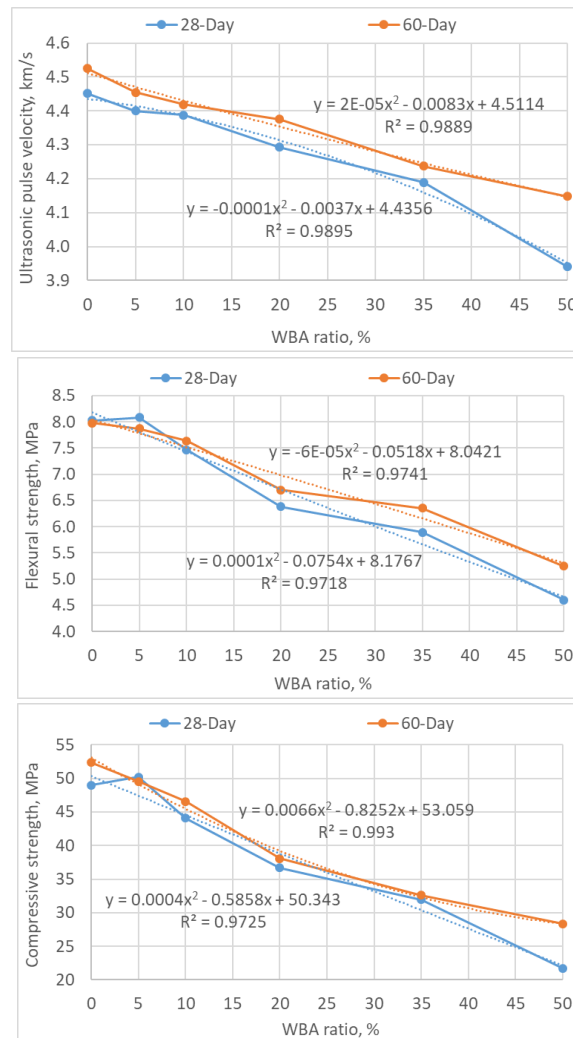


Figure 6. The Variations of Flexural Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, and Compressive Strength Depending on the WBA Ratio

Run points of the experimental design and the results of the tests are given in Table 5. The design summary of the responses is given in Table 6.

Table 5. Runs Points and the Results of the Response Variables

Runs	A: WBA ratio	B: Specimen age	Ultrasonic pulse velocity	Flexural strength	Compressive strength
	%	Gün	km/s	MPa	MPa
1	0	28	4.396	8.000	48.367
2	5	28	4.376	8.067	50.133
3	10	28	4.344	7.833	44.517
4	20	28	4.222	6.167	34.417
5	35	28	4.149	6.033	31.150
6	50	28	3.941	4.600	21.417
7	0	28	4.507	8.050	49.625
8	5	28	4.424	8.100	50.250
9	10	28	4.432	7.100	43.675
10	20	28	4.364	6.600	39.000
11	35	28	4.229	5.750	32.700
12	50	28	3.941	-	22.050
13	0	60	4.563	8.050	54.400
14	5	60	4.482	7.800	49.275
15	10	60	4.444	7.950	45.475
16	20	60	4.392	6.700	39.000
17	35	60	4.248	6.250	32.950
18	50	60	4.071	5.250	24.500
19	0	60	4.486	7.900	50.350
20	5	60	4.428	7.950	49.850
21	10	60	4.394	7.325	47.650
22	20	60	4.360	6.700	37.100
23	35	60	4.225	6.450	32.225
24	50	60	4.225	-	32.225

Table 6. The Summary of the Response Variables

Response	Units	Observations	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std.	Model
Ultrasonic pulse velocity	km/s	24	Polynomial	3.94	4.562	4.318	0.166	Linear
Flexural strength	MPa	22	Polynomial	4.6	8.1	7.028	1.042	2FI
Compressive strength	MPa	24	Polynomial	21.416	54.4	40.095	9.872	Linear

The effect levels of the WBA ratio and specimen age on the responses were obtained by ANOVA. In addition, the response models were created. ANOVA for compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity are shown in Table 7.

Table 7. ANOVA for Compressive Strength, Flexural Strength, and Ultrasonic Pulse Velocity

Source	Compressive strength		Flexural strength		Ultrasonic pulse velocity	
	p-value	Significance	p-value	Significance	p-value	Significance
Model	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant
A-WBA ratio	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant
B-Specimen	0.036	significant	0.0358	significant	0.0019	significant
AB	-	-	0.0531	significant	-	-
Lack of fit	0.1551	not significant	0.2368	not	0.6187	not significant

The models' p-values of the compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength determined with ANOVA are < 0.0001, and therefore, the obtained models are significant. The p-values of the terms are less than 0.05, indicating that the terms significantly affect the response variable. The p-values over 0.1 indicate that the terms are not significant (do not significantly affect the response variable) (StatEase, 2021). It is seen that the terms A and B are significant for all response variables. In addition, the term AB (p-value=0.0531) in the model obtained for the flexural strength was added to the model since its p-value was nearly equal to the 0.05 significance level.

The lack of fit is used to obtain two or more observations (replication) on the response (StatEase, 2021). In the experimental design, two replicates were performed for each run. The determination of whether the two experimental results were compatible with each other was carried out with the lack of fit test. It is desired that the lack of fit is not significant, and it was determined that the lack of fit was insignificant for all response variables.

The obtained models at selected variation intervals of the variables for compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength are given in Equation (1), Equation (2), and Equation (3), respectively. The fit statistics of the responses are shown in Table 8.

$$\text{Ultrasonic pulse velocity} = 4.28 - 0.2118 \cdot A + 0.0414 \cdot B \tag{1}$$

$$\text{Flexural strength} = 6.55 - 1.55 \cdot A + 0.154 \cdot B + 0.2005 \cdot AB \tag{2}$$

$$\text{Compressive strength} = 37.45 - 13.24 \cdot A + 1.15 \cdot B \tag{3}$$

When the equations are examined, it is seen that the WBA ratio has a negative (-) effect, and the specimen age has a positive (+) effect. Therefore, response variable values decrease with the increase in WBA ratio and increase with the increase in specimen age. In addition, it can be said that the absolute effect of the WBA ratio in all response variables is greater than the specimen age.

Table 8. The Fit Statistics of the Models

Response	Units	Standard deviation	Mean	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	Adequate precision
Ultrasonic pulse velocity	km/s	0.0573	4.32	0.8925	0.8823	0.8503	25.0087
Flexural strength	MPa	0.2857	7.03	0.9356	0.9249	0.9136	28.6889
Compressive strength	MPa	2.52	40.1	0.9404	0.9347	0.9183	32.2722

R² values for the response variables were obtained as 0.8925, 0.9356, and 0.9404, respectively. It shows that the models have a high correlation. The adjusted R² value shows that both the sufficiency of the model and the added terms to the model have a significant effect on the responses (StatEase, 2021). A high adjusted R² value is desirable and should not show wide deviations from the predicted R² value. Also, the results of the adjusted R² minus predicted R² is under 0.2 (StatEase, 2021) indicates that the prediction error of the data estimated from the models is appropriate. The adjusted R² minus predicted R² values of the ultrasonic pulsed wave velocity, flexural strength, and compressive strength are 0.032, 0.0113, and 0.0164, respectively.

The desirable adequate precision should be greater than 4 (StatEase, 2021). The adequate precision value of the compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength are 32.2722, 25.0087, and 28.6889 respectively. This indicates that the models form sufficient signals in the selected variation ranges.

Contour and 3D graphs of ultrasonic pulse velocity, compressive strength, and flexural strength are shown in Figure 7, Figure 8, and Figure 9, respectively. The maximum ultrasonic pulse velocity was obtained in the maximum specimen age with the minimum WBA ratio, and the minimum ultrasonic pulse velocity was obtained in the minimum specimen age with the maximum WBA ratio (Figure 7). The maximum flexural strength was obtained with the minimum WBA ratio. Specimen age was not affected the maximum flexural strength. The minimum flexural strength was obtained in the minimum specimen age with the maximum WBA ratio (Figure 8). The maximum compressive strength was obtained in the maximum specimen age with the minimum WBA ratio, and the minimum compressive strength was obtained in the minimum specimen age with the maximum WBA ratio (Figure 9).

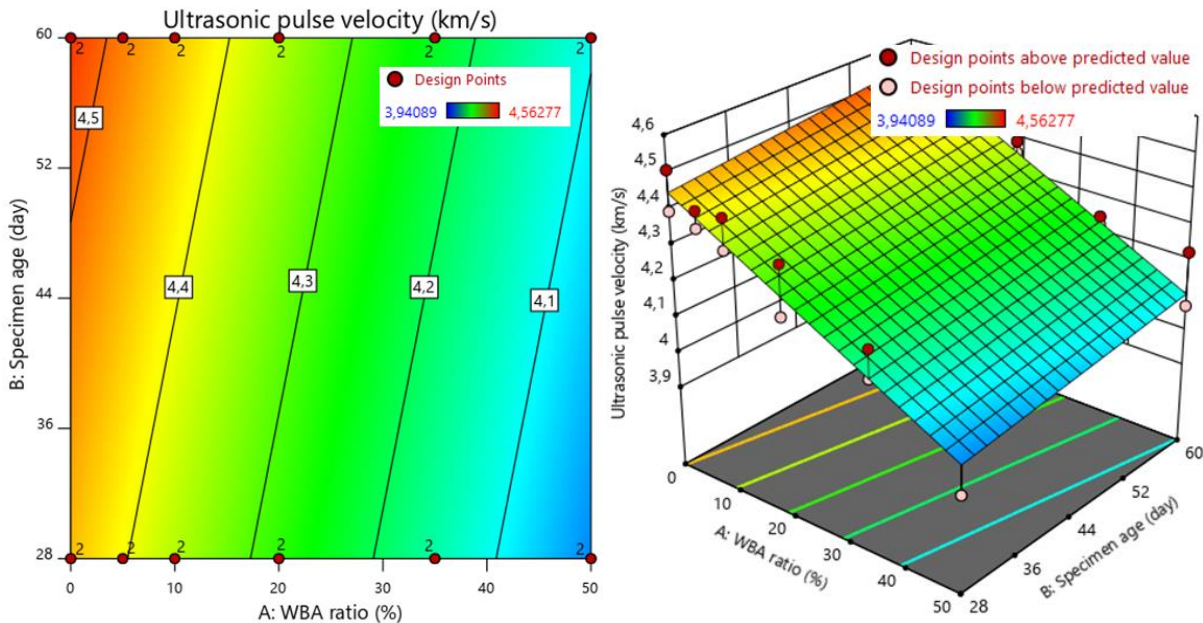


Figure 7. Contour and 3D Graphs of Ultrasonic Pulse Velocity

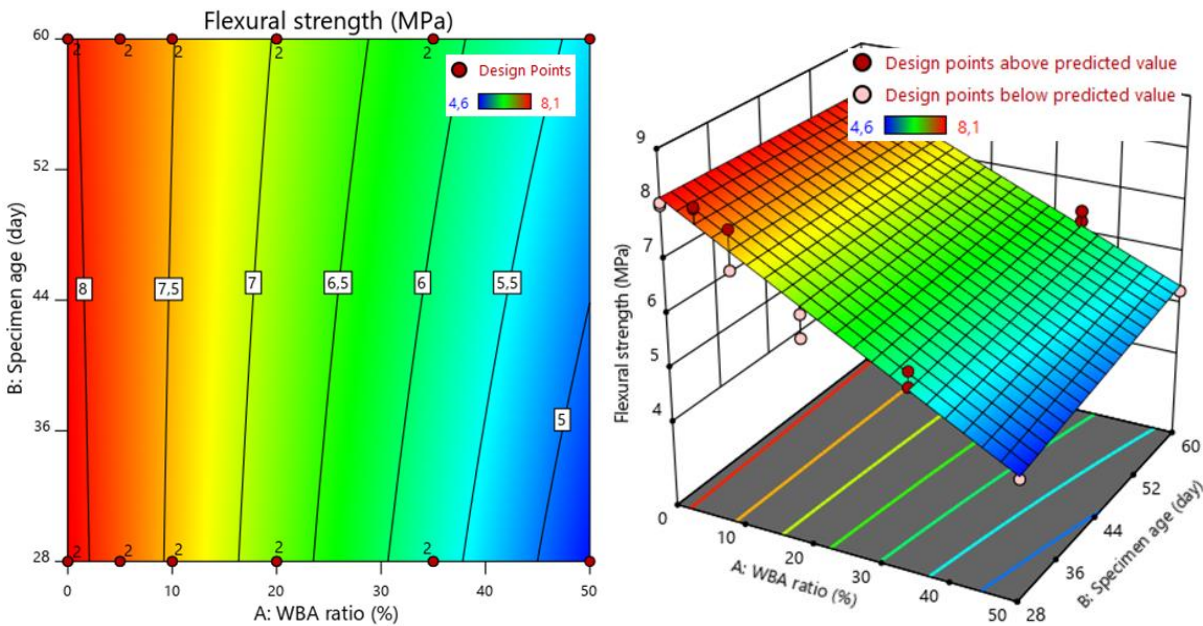


Figure 8. Contour and 3D Graphs of Flexural Strength

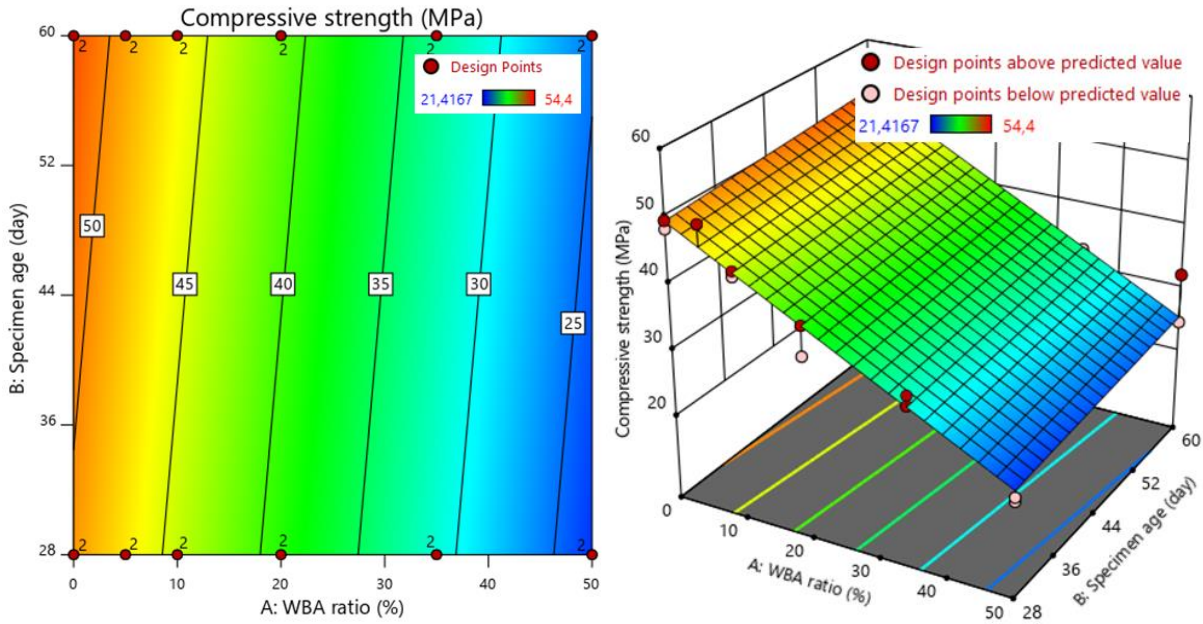


Figure 9. Contour and 3D Graphs of Compressive Strength

The predicted and the actual values (runs) of compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength are shown in Figure 10. The predicted results determined by the models obtained for the responses overlap the experimental results (Figure 10).

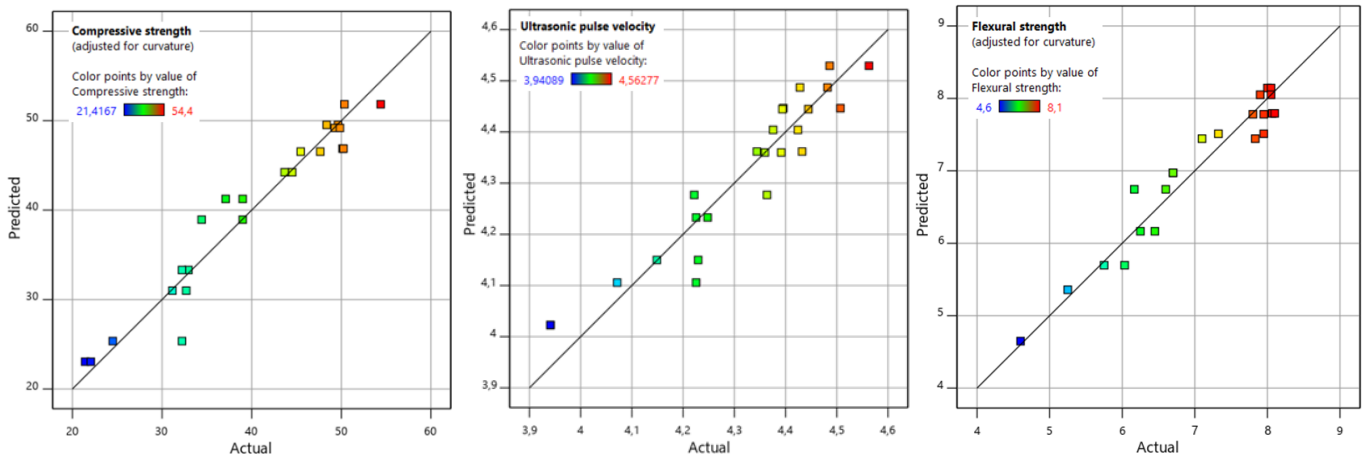


Figure 10. Actual and Predicted Values of Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, and Flexural Strength

CONCLUSION

In the study, the effect of the PC with the replacement for WBA on the mechanical properties of mortars was investigated. Firstly, the effect of each effect variable on response variables was examined. Then, taking into account the interaction terms, their effect level on the response variables was determined. The results are summarized below.

- Up to 5% WBA ratio increases the flexural and compressive strength at 28-days slightly, while more than 5% WBA ratio decreases them.
- It is seen that the increase in the WBA ratio decreases the flexural and compressive strength at 60 days.
- An increase in the WBA ratio decreases the ultrasonic pulse velocity at 28 and 60-days. It shows that the increase in the WBA ratio raises the porosity.
- In mortars with a 50% WBA ratio, the decrease in compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength of the 28-day samples is higher than the 60-day samples. It shows that WBA is more effective on the mechanical properties of mortars at advanced ages.

- It is seen that the models obtained for compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and flexural strength are significant.
- R^2 values of the response variables (UPV; 0.8925, f_t ; 0.9356, f_c ; 0.9404) were found to be high. It shows that the models have a high correlation. Adjusted R^2 values of the response variables (UPV; 0.8823, f_t ; 0.9249, f_c ; 0.9347) were found to be high. It shows that both the adequacy of the obtained models and the terms in the models have a significant effect on the response variables. Adjusted R^2 - predicted R^2 values of the response variables (UPV; 0.032, f_t ; 0.0113, f_c ; 0.0164) are greater than 0.2. It shows that the prediction error of the estimated data from the models is adequate.
- The fact that the adequate precision value for the responses is above the desired value (UPV; 25.0087 > 4, f_t ; 28.6889 > 4, f_c ; 32.2722 > 4) indicates that the models form sufficient signals in the selected variation ranges.

It can be said that the ratio of WBA that can be used in 28-day mortar samples is 5%, and this rate is higher at later ages in mortar samples. The predictability of compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity of WBA-added mortars are high ($R^2 > 0.90$). Therefore, the predictability of response variable models can be further increased by increasing the number of effect variables and narrowing the controllable ranges of variation selected.

ACKNOWLEDGMENTS

All authors thanks to Tekirdağ Namık Kemal University.

REFERENCES

- Abubakar, A. U., & Baharudin, K. S. (2012). Potential Use of Malaysian Thermal Power Plants. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, 3(2), 25-37.
- Adamu, M. (2017). Engineering Properties of Industrial Wood Waste Ash-Concrete. *International Journal of Advances in Construction Engineering*, 1, 1-10.
- Akinyemi, B. A. (2021). Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105351. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105351>
- Akinyemi, B. A., & Dai, C. (2020). Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241, 118041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118041>
- Aydın, E. (2016). Novel coal bottom ash waste composites for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 124, 582-588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.142>
- Baite, E., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., & Prince, W. (2016). Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre (Niger). *Construction and Building Materials*, 125, 919-926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.117>
- Chowdhury, S., Maniar, A., & Suganya, O. M. (2015). Strength development in concrete with wood ash blended cement and use of soft computing models to predict strength parameters. *Journal of Advanced Research*, 6(6), 907-913. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2014.08.006>
- Erdoğan, T. Y. (2015). Beton. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 6-8.
- European Coal Combustion Products Association (ECOBA). (2016). Production and Utilisation of CCPs in 2016 in Europe. http://www.ecoba.com/evjm,media/ccps/ECO_stat_2016_EU15_tab.pdf Accessed 31.12.2020.
- European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO). (2020). Statistics.
- Ghorpade, V. G. (2012). Effect of wood waste ash on the strength characteristics of concrete. *Nature Environment and Pollution Technology*, 11(1), 121-124.
- Khongpermgoson, P., Boonlao, K., Ananthanet, N., Thitithananon, T., Jaturapitakkul, C., Tangchirapat, W., & Ban, C. C. (2020). The mechanical properties and heat development behavior of high strength concrete containing high fineness coal bottom ash as a pozzolanic binder. *Construction and Building Materials*, 253, 119-239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119239>

- Kim, H. K., & Lee, H. K. (2015). Coal bottom ash in field of civil engineering: A review of advanced applications and environmental considerations. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(6), 1802-1818. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0282-7>
- Kim, H. K., & Lee, H. K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065>
- Nader, V., Awwad, E., Wakim, J., & Haya, L. B. (2020). A study on cement-based mixes with partial wood bottom ash replacement. *Waste and Resource Management*, 173(1), 15-23. <https://doi.org/10.1680/jwarm.19.00005>
- Nikbin, I. M., Rahimi, S., Allahyari, R. H., & Damadi, M. (2016). A comprehensive analytical study on the mechanical properties of concrete containing waste bottom ash as natural aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 121, 746-759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.078>
- Oruji, S., Brake, N. A., Nalluri, L., & Guduru, R. K. (2017). Strength activity and microstructure of blended ultra-fine coal bottom ash-cement mortar. *Construction and Building Materials*, 153, 317-326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.088>
- Preston, F., Lehne, J. (2018). Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete.
- Raheem, A. A. & Adenuga, O. (2013). Wood Ash from Bread Bakery as Partial Replacement for Cement in Concrete. *Int J Sustainable Constr Eng Technol*, 4, 75-81.
- Ramos, T., Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 49, 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>
- Singh, M. (2018). Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete. Woodhead Publishing, 3-50.
- StatEase. Analysis of Variance (ANOVA). (2021). <https://www.statease.com/docs/v11/contents/analysis/anova-outputK/> Accessed 23.11.2021.
- Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T. (2021). Yapı Malzemesi. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 1-3.
- TS EN 1015-3. (2000). Kagir harcı-Deney metotları-Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). Ankara: TSE.
- TS EN 196-1. (2016). Çimento deney yöntemleri-Bölüm 1: Dayanım tayini. Ankara: TSE.
- Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB). (2020). Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri.
- Ulewicz, M., & Jura, J. (2017). Effect of fly and bottom ash mixture from combustion of biomass on strength of cement mortar. *E3S Web of Conferences*, (18). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201712301029>