

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 10 Sayı/Issue: 2 Haziran/June 2022



İmtiyaz Sahibi / Owner

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

Editörler / Editors

Gultekin OZDEMIR

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

Mehmet AVCAR

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

Erdal AYDEMİR

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

Turgay AYDOĞAN

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

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Çağlayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yıl University, Van

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

Artvin Coruh University, Artvin

Habib GURBUZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Baris GUREL

Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK

Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Karani KURTULUŞ

Suleyman Demirel University, Isparta

Alper KUSCU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet OZCELİK

Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf OZTURK

Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT

Pamukkale University, Denizli

Fatih Ahmet ŞENEL

Suleyman Demirel University, Isparta

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Kerim YAPICI

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Danışma Kurulu / *Editorial Advisory Board*

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

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

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

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

Yayın Editörleri / *Technical Editors*

Ayşe BIYIKLI
Suleyman Demirel University, Isparta

Yasemin SIMSEK TURKER
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa UZUM
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / *Abstracting & Indexing*

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

Duyurular / *Announcements*

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.
As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

İçindekiler / Contents

Araştırma / Research

[1. EPS VE ATIK POLİÜRETAN İLE ÜRETİLMİŞ HAFİF HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN, ISI GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNİN VE YÜKSEK SICAKLIĞA KARŞI DİRENÇLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI](#)

Halil EREN Serhan İLKENTAPAR Uğur DURAK

Sayfa: 360-370 PDF

[2. ORGANİK PEKMEZLERDEN JELİ ŞEKER ÜRETİMİ](#)

Muhammed Mustafa ÖZÇELİK Burçak DUMAN Gülcan ÖZKAN

Sayfa: 371-379 PDF

[3. TAVŞANLI \(KÜTAHYA\) OVASI YÜZEY SULARININ HİDROJEOKİMYASI VE SU KALİTE İNDEKS \(WQI\) YÖNTEMİ İLE SU KALİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ](#)

Şehnaz ŞENER Erhan ŞENER

Sayfa: 380-391 PDF

[4. YÜKSEK HIZ VE BASINÇ ŞARTLARINDA ÇALIŞAN YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETERETERKETON TERMOPLASTİK POLİMERİNİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ](#)

Hüseyin ÜNAL Salih Hakan YETGİN

Sayfa: 392-401 PDF

[5. ISPARTA İL MERKEZİNDE MEYDANA GELEN ÇEŞİTLİ İŞ KAZALARININ ANALİZİ](#)

Özgür Devrim TAN Hakan CEYLAN

Sayfa: 402-411 PDF

[6. FARKLI ÖRNEKLEME YÖNTEMLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARINDA PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI](#)

Ahmet ULUSLU

Sayfa: 412-428 PDF

7. BETON DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY TEPKİ YÖNTEMİ, GENETİK ALGORİTMA VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNİ

Ebru BAŞPINAR TUNCAY Ekin KÖKEN Şemsettin KILINÇARSLAN

Sayfa: 429-441 [PDF](#)

8. DOĞA İLHAMLI OPTİMİZASYON KULLANARAK ÖZELLİK SEÇİMİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE MEME KANSERİ TEŞHİSİ

Onur SEVLİ

Sayfa: 442-452 [PDF](#)

9. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGGREGATE SPECIFIC GRAVITY ON OPTIMUM BITUMEN CONTENT OF HOT MIX ASPHALT

Mehmet SALTAN Gizem KAÇAROĞLU Öznur KARADAĞ İslam GOKALP Volkan Emre UZ

Sayfa: 453-465 [PDF](#)

10. BULANIK CPM İLE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA: İNŞAAT ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

Güllü DEĞİRMENCİ Mehmet Nurettin UĞURAL

Sayfa: 466-481 [PDF](#)

11. KARMA ÇELİK LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENCİ

Kazım TÜRK Nazlı ÇİÇEK Metin KATLAV Paki TURGUT

Sayfa: 482-494 [PDF](#)

12. TEK EKLEMLİ ESNEK ROBOT KOLUNUN SIRALI KONTROL İLE DENETLENMESİ

Hacı Ali ERTAŞ Onur ÖRNEK

Sayfa: 495-503 [PDF](#)

13. TÜRKÇE DİLİNDE YAZILAN BİLİMSEL METİNLERİN DERİN ÖĞRENME TEKNİĞİ UYGULANARAK ÇOKLU SINIFLANDIRILMASI

Mustafa ÖZKAN Görkem KAR

Sayfa: 504-519 [PDF](#)

14. EFFECTS OF THE COVID-19 PANDEMIC ON TURKISH NATURAL STONE INDUSTRY: A GREY FORECASTING MODEL

Gökhan EKİNCİOĞLU Deniz AKBAY Erdal AYDEMİR

Sayfa: 520-531 [PDF](#)

15. TI-6AL-4V SICAK İŞLENMESİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Levent UĞUR

Sayfa: 532-537 [PDF](#)

[16. BİR GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMİNİN DAĞITIM SİSTEMİ GÜVENİLİRLİĞİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ](#)

[Sıtkı GÜNER](#) [Serkan YAZICI](#)

Sayfa: 538-549 [PDF](#)

[17. GAN GÜÇ ANAHTARLARI İLE GERÇEKLEENEN YARIM KÖPRÜ GELİŞTİRME KARTININ ISIL BAŞARIMININ İNCELENMESİ](#)

[Ömer Faruk GÖKSU](#) [Mehmet Onur GÜLBAHÇE](#) [Serkan DÜŞMEZ](#)

Sayfa: 550-560 [PDF](#)

[18. C PROGRAMLAMA DİLİNDE KAYNAK KOD GÜVENLİĞİ: SECUREC](#)

[Meltem KURT PEHLİVANOĞLU](#) [Sinan ÇALIŞIR](#) [Ceren GENÇ](#) [Duygu Evrim ODABAŞ](#) [Berkehan ÖZTÜRK](#)

Sayfa: 561-573 [PDF](#)

[19. HİBRİT GÜÇ SİSTEMİ İLE İKLİMLENDİRME YÜKLERİNİN OPTİMAL İŞLETİM MODELİ VE HASTANE İKLİMLENDİRME YÜKLERİ İÇİN TALEP CEVABI UYGULAMASI](#)

[Gürcan Şahin AKINCI](#) [Yavuz EREN](#)

Sayfa: 574-586 [PDF](#)

[20. MİKROENKAPSÜLE EDİLMİŞ PROPOLİS EKSTRAKTİNİN MUZ AROMALI PUDİNG ÜRETİMİNDE KULLANIMI](#)

[Aygül AKTAŞ](#) [Evren GÖLGE](#)

Sayfa: 587-604 [PDF](#)

[21. PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A HELICAL CROSS-FLOW WATER TURBINE](#)

[Özer ÖĞÜÇLÜ](#)

Sayfa: 605-619 [PDF](#)

[22. MODELING OF SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OF TI-6AL-4V ALLOY USING REGRESSION ANALYSIS](#)

[İnayet Burcu TOPRAK](#) [Oğuz ÇOLAK](#) [Mustafa BAYHAN](#)

Sayfa: 620-630 [PDF](#)

[23. BİTÜMLÜ KAPLAMALARIN SU ETKİLERİNE KARŞI PERFORMANSI ÜZERİNDE ATIK LDPE'NİN ETKİSİ](#)

[Tacettin GEÇKİL](#) [Ceren Beyza İNCE](#)

Sayfa: 631-642 [PDF](#)

[24. AR-GE PROJE SEÇİM SÜRECİ İÇİN YENİ BİR ENTEGRE SEZGİSEL BULANIK GRUP KARAR VERME YAKLAŞIMI](#)

[Bahadır Fatih YILDIRIM](#) [Sultan KUZU YILDIRIM](#)

Sayfa: 643-653 [PDF](#)

[25. DEPREM RİSKİNİN KENTSEL PLANLAMA SÜRECİNE ETKİSİ: İPSALA, KEŞAN VE ENİZ İLÇELERİ \(EDİRNE\) ÖRNEĞİ](#)

[Neslihan KARATAŞ](#) [Mehmet Ali KAYA](#)

Sayfa: 654-679 [PDF](#)

[26. ANTALYA BÖLGESİNE YAĞAN SIRALI YAĞMUR ÖRNEKLERİNİN KİMYASAL KOMPOZİSYONLARININ VE MORFOLOJİLERİNİN BELİRLENMESİ](#)

[Murat KILIÇ](#) [Yunus PAMUKOĞLU](#)

Sayfa: 680-697 [PDF](#)

[27. CO₂ DERİŞİMİNİN VE AZOT STRESİNİN CHLORELLA VULGARIS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA VERİMİNE ETKİSİ](#)

[Gamze AKGÜL](#) [Murat VAROL](#) [Ayça ERDEM](#)

Sayfa: 698-721 [PDF](#)

Derleme / Review

[28. HASTANE ATIKSULARINDAKİ MİKROKİRETİCİLER VE MİKROKİRETİCİLERİN MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE GİDERİMİ](#)

[İnci KARAKAŞ](#) [Yasemin KAYA](#) [İlida VERGİLİ](#) [Zeren Beril ÖZÇELEP](#) [Gülsüm YILMAZ](#)

Sayfa: 722-739 [PDF](#)

[29. ANAEROBİK ÇÜRÜTME ÖNCESİ ATIK BİYOLOJİK ÇAMURLARIN MİKRODALGA RADYASYONU İLE DEZENTEGRASYONU](#)

[Alı ALHRAISHAWI](#) [Şükrü ASLAN](#)

Sayfa: 740-760 [PDF](#)

[30. HABERLEŞME UYGULAMALARINDA UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİNİN KULLANIMI](#)

[Ümit GÜLER](#) [Mehtap ÖZENEN-KAVLAK](#) [Müge DEMİR ÇAKIR](#) [Serhat AYDEMİR](#) [Hatice Selin AYDEMİR](#) [Şeyma BERK ACET](#) [Hakan Oktay AYDINLI](#) [Mahdi HASSAN PASHAEI](#)

Sayfa: 761-775 [PDF](#)



EPS VE ATIK POLİÜRETAN İLE ÜRETİLMİŞ HAFİF HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN, ISI GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNİN VE YÜKSEK SICAKLIĞA KARŞI DİRENÇLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Halil EREN¹, Serhan İLKENTAPAR¹, Uğur DURAK^{1*}

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|--|
| <i>Hafif Harç, Atık Poliüretan, EPS, Mekanik Özellikler, Isı İletkenlik, Yüksek Sıcaklık.</i> | <p>Bu çalışmada endüstriyel işlem sonrası açığa çıkan atık poliüretanın hafif harç imalatında kullanımı araştırılmıştır. Hali hazırda hafif harç üretiminde kullanılan EPS (Expanded polystyren foam) ve atık poliüretan kullanılarak hafif harç numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler eşdeğer birim ağırlıklarına göre karşılaştırılarak, atık poliüretanın hafif harç imalatında kullanımı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında EPS ve atık poliüretan agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80, %100 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmış ve 40x40x160 mm'lik prizmatik harç numuneler üretilmiştir. Üretilen harç numunelerin birim ağırlık değerleri, ultrasonik atımlı dalga hızları, ısı iletkenlik katsayıları ile eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca hem EPS hem de atık poliüretan ile üretilmiş harç numuneler 300°C, 600°C, 900°C'de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuş ve sonrasında numunelerin mekanik dayanımları ile içyapıları incelenmiştir. İçyapı incelemeleri hamur numuneler üzerinde FESEM görüntüleri ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre hem orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren harçlarda, hem de taşıyıcı hafif beton sınıfına giren harçlarda atık poliüretan ile imal edilen harçların EPS'li harçlara göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Özellikle yüksek sıcaklık sonrası mekanik dayanımlar incelendiğinde atık poliüretanlı harç numunelerin, EPS'li numunelere oranla daha yüksek eğilme ve basınç dayanımları verdiği tespit edilmiştir.</p> |

COMPARISON OF THE MECHANICAL PROPERTIES, HEAT PERMEABILITY CHARACTERISTICS AND RESISTANCE AGAINST HIGH TEMPERATURE OF LIGHT MORTARS MADE WITH EPS AND WASTE POLYURETHANE

| Keywords | Abstract |
|--|---|
| <i>Light Mortar, Waste Polyurethane, EPS, Mechanical Properties, Thermal Conductivity, High Temperature.</i> | <p>In this study, the use of waste polyurethane released after industrial processing in light mortar production has been investigated. Lightweight mortar samples were produced using EPS (Expanded polystyren foam) and waste polyurethane, which are currently used in lightweight mortar production. The produced samples were compared according to their equivalent unit weights and the use of waste and polyurethane in light mortar production was examined. Within the scope of the study, 40x40x160 mm prismatic mortar samples were produced by replacing 20%, 40%, 60%, 80%, 100% by volume with EPS and waste polyurethane aggregate. The unit weight values, ultrasonic pulsed wave velocities, thermal conductivity coefficients and flexural and compressive strengths of the produced mortar samples were measured. In addition, mortar samples produced with both EPS and waste polyurethane were subjected to high temperatures at 300°C, 600°C, 900°C, and then the mechanical strength and microstructures of the samples were examined. Microstructure studies were performed on dough samples with FESEM images. According to the data obtained, it has been concluded that mortars produced with waste polyurethane perform better than mortars with EPS in both medium strength lightweight concrete mortars and mortars in the carrier light concrete class. Especially when the mechanical strengths after high temperature are examined, it</p> |

* İlgili yazar / Corresponding author: ugurdurak@erciyes.edu.tr, +90-0352-207-6666

has been determined that waste polyurethane mortar samples give higher flexural and compressive strengths compared to EPS samples.

Alıntı / Cite

Eren H., İlkentapar S., Durak U., (2022). Eps ve Atık Poliüretan ile Üretilmiş Hafif Harçların Mekanik Özelliklerinin, Isı Geçirimsizlik Özelliklerinin ve Yüksek Sıcaklığa Karşı Dirençlerinin Karşılaştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 360-370.

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---------------------|---|------------|
| H. Eren, | 0000-0001-6071-6009 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 10.05.2021 |
| S. İlkentapar, | 0000-0002-9932-2899 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 27.10.2021 |
| U. Durak, | 0000-0003-2731-3886 | Kabul Tarihi / Accepted Date | 15.12.2021 |
| | | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel üretim süreçleri çok miktarda atık ürün açığa çıkmasına neden olmaktadır. Açığa çıkan bu atık ürünlerin çoğu ya dolgu malzemesi olarak kullanılmakta ya da kısıtlı alanlarda kullanılabilir. Bu yüzden ortaya çıkan endüstriyel atıkların zararlı etkilerini azaltmak için uygun geri dönüşüm işlemleri uygulanarak kullanım alanlarının oluşturulması önem arz etmektedir. Endüstriyel üretim sonucu açığa çıkan bu atıklardan birisi de imalat, yapı ve özellikle otomotiv sektöründe kullanılan poliüretan köpüklerdir. Atık olarak ortaya çıkan poliüretan köpük paneller, küçük parçalara bölünerek hafif malzeme üretiminde kullanılabilir. Atık poliüretan köpükler uygun boyutlara getirilerek beton ve harç sistemlerine dahil edilebilir ve hafif yapı malzemeleri elde edilebilir (Gadea vd., 2010; Gutt ve Nixon, 1979; Zevenhoven, 2004). Hafif harç ve beton farklı hafif malzemelerin agrega ile yer değiştirilerek kullanılması ile elde edilebilir. Kullanılan agrega kaynakları doğal hafif agrega olarak pomza taşı, volkanik tüf, (Beycioğlu vd., 2010; Gönen ve Yazıcıoğlu, 2020; Ke vd., 2009; Yazıcıoğlu ve Bozkurt, 2006; Yılmaz vd., 2018) yapay hafif agrega olarak üretilen perlit, genleştirilmiş şeyl, vermikülit (Akçaözöğlü vd., 2010; Alshihri vd., 2009; Gönen, 2009; Koksall vd., 2015) olarak öne çıkmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalar da genleştirilmiş polistiren sert köpük (EPS-Expanded Polystyrene Foam) kullanımı ile hafif harçların imalatı yapılmış ve çeşitli özellikleri (fiziksel, mekanik, yalıtım v.b.) incelenmiştir (Davraz vd., 2011, 2020; Kılınçarslan vd., 2019). İnşaat sektöründe hali hazırda firmalar tarafından üretilen ve satışı yapılan EPS agregalı hafif şap harçları yapının ölü yükünü azaltması ve bunun yanında ses ve ısı yalıtımı sağlayabilmesi sebebiyle tercih edilen bir ürün haline gelmiştir (Kılıç, 2018).

TS EN 206'ya göre beton mevcut yoğunluklarına göre farklı üç gruba ayrılmaktadır. Buna göre normal beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim kütlesi (yoğunluğu), 2000 kg/m³ 'ten büyük olup 2600 kg/m³ 'ü geçmeyen betondur. Hafif beton etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 800 kg/m³ veya daha büyük olup 2000 kg/m³'ü geçmeyen betondur. Ağır beton ise etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 2600 kg/m³'ten daha büyük olan betondur (TS EN 206:2013+A1, 2013). Hafif betonlar ise birim ağırlıklarına göre üç gruba ayrılmıştır. Birim ağırlığı 300 kg/m³ ile 800 kg/m³ arasında olanlar yalıtım betonu, 800 kg/m³ ile 1400 kg/m³ arasında olanlar orta mukavemetli hafif beton, 1400 kg/m³ den büyük olanlar ise taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmıştır (Taşdemir, 2003).

Bu çalışmada endüstride açığa çıkan atık poliüretan köpüğünün, ince agrega boyutlarına getirilerek hafif harç üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çimento bağlayıcılı harçlarda, agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80, %100 oranlarında granül EPS ve atık poliüretan (AP) ayrı ayrı ikame edilmiştir. Özellikle piyasada üretilen EPS'li hafif harçlar referans alınarak, atık poliüretan ikameli harçların fiziksel, mekanik ve ısı geçirimsizlik özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen harç numuneler 28 gün kür edildikten sonra 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin eğilme ve basınç dayanımları ile içyapıları incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Portland Çimentosu (Portland Cement)

Çalışmada TS EN 197-1'e (TS EN 197-1, 2012) uygun 42,5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosu Kayseri Bünyan ÇİMSA çimento fabrikasından temin edilmiştir. Çimentonun özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı üretilen firma tarafından sırasıyla 3.15 ve 3410 cm²/gr olarak bildirilmiştir. Ayrıca çimentoya kimyasal analiz yapılmış ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çimento kimyasal kompozisyonu (%) (Chemical composition of cement)

| Oksit | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O+ 0.66K ₂ O | Serbest CaO | CI | KK | ÇK |
|---------|-------|------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------------------------------|--|----------------|------|------|------|
| Çimento | 62.55 | 18.54 | 5.51 | 3.01 | 2.59 | 2.41 | 0.47 | 0.92 | 0.03 | 3.02 | 0.95 |

2.2. Agrega ve su (Aggregate and Water)

Çalışmada agrega olarak tane çapı 0-4 mm aralığında olan ırmak kumu kullanılmıştır. Irmak kumuna TS 3530 EN 933-1'e (TS EN 933-1, 2012) göre piknometre deneyi yapılmış ve etüv kurusu tane yoğunluğu 2.58 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Su olarak ise içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.3. Genleştirilmiş Polistiren (EPS) (Expanded Polystyrene)

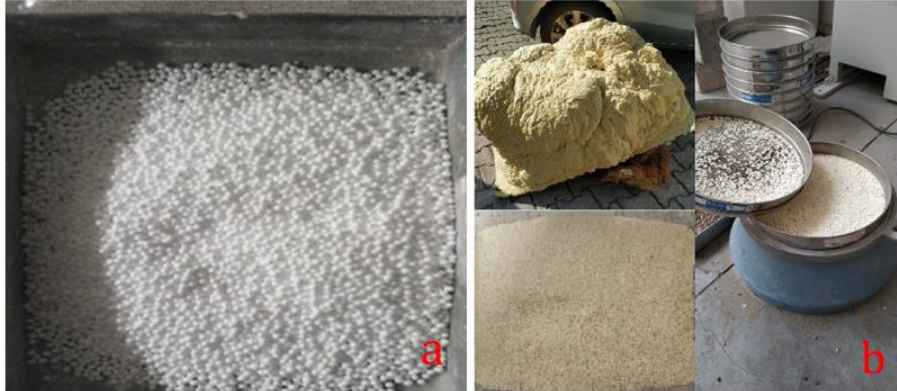
Çalışmada EPS olarak yoğunluğu 14 kg/m³ olan beyaz görümlü yuvarlak taneli ürün kullanılmıştır. Kullanılan EPS'nin görünümü Şekil 1-a'da verilmiştir.

2.4. Kimyasal Katkı (Chemical Additive)

Çimentolu hafif harç imalatında EPS ile çimento hamuru arasında daha homojen bir bağ oluşturması ve EPS granüllerinin çimento hamurunun yüzeyine çıkmaması için Çözüm Beton ve İnşaat Malzemeleri firmasından temin edilen E200P kodlu kimyasal katkı kullanılmıştır.

2.5. Atık Poliüretan (AP) (Waste Polyurethane)

Çalışmada hafif harç üretimi için yüksek mekanik özellikleri ve yangın dayanımı ile bilinen poliüretan köpük atığı kullanılmıştır. Atık poliüretan, harç üretiminde kullanılmadan önce el ile rende kullanılarak öğütülmüş ve 4 mm elekten elenmiştir. Atık poliüretanın görünümü ve öğütülme sonrası durumu Şekil 1-b'de sunulmuştur.



Şekil 1. EPS (a), Atık poliüretanın atık hali ve öğütülmüş hali (b) (EPS (a), Waste polyurethane (b))

2.6. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Çalışma kapsamında 11 grup karışım serisi üretilmiştir. Tüm karışımlarda bağlayıcı olarak %100 çimento kullanılmıştır. Referans çimentolu harç numunesinin ağırlıkça su/bağlayıcı oranı 0,5 ve kum/bağlayıcı oranı 3 olarak belirlenmiştir. Referans numune karışım oranları belirlendikten sonra harç karışımlarına agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında EPS ikame edilmiştir. Granül EPS'nin daha homojen dağılmasını sağlamak için bağlayıcı miktarının kütlece % 1'i kadar kimyasal katkı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının su miktarı toplam karışım suyundan düşürülmüştür. EPS ikamesi ile karışımların işlenebilirlik değerinde yüksek oranda artış meydana gelmiştir. Bu nedenle EPS ikameli bütün harç karışımların işlenebilirlik değerleri 155 mm ile 165 mm arasında kalacak şekilde su/bağlayıcı oranları revize edilmiştir. Aynı işlemler atık poliüretan köpük kullanılan numuneler için de uygulanmıştır. EPS'li ve atık poliüretanlı harçlara ait karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Üretilen taze harç karışımlarının işlenebilirlikleri TS EN 1015-3 (TS EN 1015-3, 2000) standardına göre mm cinsinden belirlenmiştir. Daha sonra imal edilen harçlar 40x40x160 mm'lik kalıplara iki aşamada yerleştirilerek sıkıştırılmış ve numune üretimi tamamlanmıştır. Üretimi yapılan numuneler 24 saat oda sıcaklığında laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat sonrasında tüm numuneler 28 güne kadar 23±2°C sıcaklıkta su kürüne tabi tutulmuştur.

28 gün su kürü sonrasında harç numunelerin birim ağırlıkları ASTM C 642'ye (ASTM C 642-13, 2013), ultrasonik atımlı dalga hızları TS EN 12504-4 (TS EN 12504-4, 2012) standardına ölçülerek belirlenmiştir. Her iki deneyde de üçer adet numune üzerinde ölçümler yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması deney sonucu olarak kaydedilmiştir. Ayrıca numunelerin ısı geçirimsizlik özellikleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (TAUM) yer alan Thermtest markalı cihaz ile 40x140x160 mm boyutlarındaki plakalar üzerinde ölçülerek belirlenmiştir.

Harç numunelerin 28 gün su kürü sonrası eğilme ve basınç dayanımları ise TS EN 1015-11 (TS EN 1015-11, 2000) standardına göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deneyinde, her bir karışım için 40x40x160 mm boyutlarındaki 3 adet numune üzerinde tek noktadan eğilme deneyi yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması eğilme dayanımı olarak kaydedilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde ise her bir karışım için eğilme deneyi sonrasında elde edilen 6 adet numune parçası ile 40x40 mm plaka üzerinde ölçümler yapılmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması basınç dayanımı deney sonucu olarak kaydedilmiştir.

Numunelerin yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığını belirlemek adına 5°C/dakika sıcaklık artışı sağlayarak numunelerin ayrı ayrı 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara erişmeleri sağlanmış ve erişilen bu sıcaklıklarda numuneler 60 dakika süre ile bekletilmişlerdir. Bekleme süresini tamamlayan harç numuneler fırından çıkartılmış ve laboratuvar koşullarında oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Oda sıcaklığına erişen numunelere eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin içyapısını incelemek için hamur numuneler üretilmiştir. Üretilen hamur numuneler 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara tabi tutulduktan sonra kırık yüzey FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) görüntülemesi ve EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) analizleri yapılmıştır.

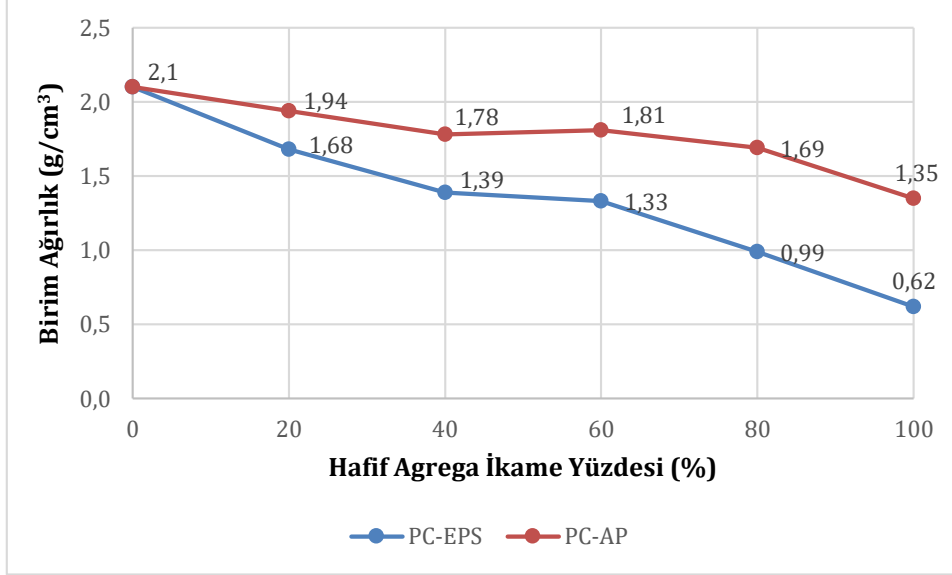
Tablo 2. EPS'li ve atıkpoliüretanlı harçların karışım oranları (Mixing ratios of EPS and waste polyurethane mortars)

| Karışım Kodu | Portland Çimentosu (g) | Toplam agregası hacmi | | | Water / Binder (%) |
|---------------|------------------------|-----------------------|---------|---------------------------|--------------------|
| | | İrmak Kumu (%) | EPS (%) | Atık Poliüretan Köpük (%) | |
| PC (Referans) | 450 | 100 | 0 | - | 0.5 |
| PC-20E | 450 | 80 | 20 | - | 0.4 |
| PC-40E | 450 | 60 | 40 | - | 0.4 |
| PC-60E | 450 | 40 | 60 | - | 0.35 |
| PC-80E | 450 | 20 | 80 | - | 0.35 |
| PC-100E | 450 | 0 | 100 | - | 0.35 |
| PC-20AP | 450 | 80 | - | 20 | 0.4 |
| PC-40AP | 450 | 60 | - | 40 | 0.4 |
| PC-60AP | 450 | 40 | - | 60 | 0.35 |
| PC-80AP | 675 | 20 | - | 80 | 0.35 |
| PC-100AP | 900 | 0 | - | 100 | 0.35 |

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

EPS ve atık poliüretan ikameli hafif harçlara ait birim ağırlık deney sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. 28 gün kür edilmiş EPS'li harç numunelerin birim ağırlık değerleri 0.62 g/cm³ ile 1.68 g/cm³ arasında iken, atık poliüretanlı harçların birim ağırlık değerlerinin 1.35 g/cm³ ile 1.94 g/cm³ arasında olduğu belirlenmiştir. Her iki hafif agregalı harç sisteminde de hafif agregası oranı arttıkça birim ağırlık değerleri azalmaktadır. Ancak hafif agregası ikamesi ile artan işlenebilirlik değerini belirli aralıkta tutabilmek için su/bağlayıcı oranının azaltılması, birim ağırlık değerlerinde artış gözlenmesine sebep olmuştur. %60 oranında hem EPS hem de atık poliüretan ikamesinde, su/bağlayıcı oranının 0,40'dan 0,35'e düşürülmesi ile numunelerin birim ağırlık değerleri bir miktar artmıştır. EPS'li ve atık poliüretanlı hafif harç numuneler kıyaslanırken, kıyaslanmanın kullanılan agregası hacmine göre değil, 28 günlük birim ağırlık değerlerine göre yapılması uygun görülmüştür. Buna göre, birim ağırlığı 800 kg/m³ ile 1400 kg/m³ arasında olan orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren PC-40E (1.39g/cm³) ve PC-60E (1.33 g/cm³)

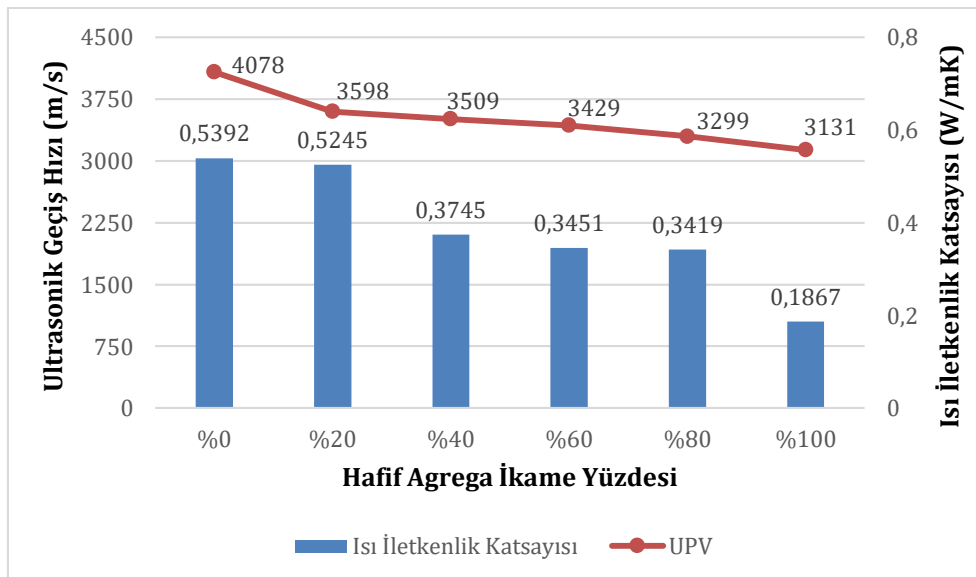
ile PC-100AP(1.35 g/cm³) kıyaslanmıştır. Diğer taraftan birim ağırlığı 1400 kg/m³ den büyük olan taşıyıcı hafif beton sınıfına giren PC-20E (1.68 g/cm³) ile PC-40AP (1,75 g/cm³) ve PC-80AP (1.69 g/cm³) kıyaslanmıştır.



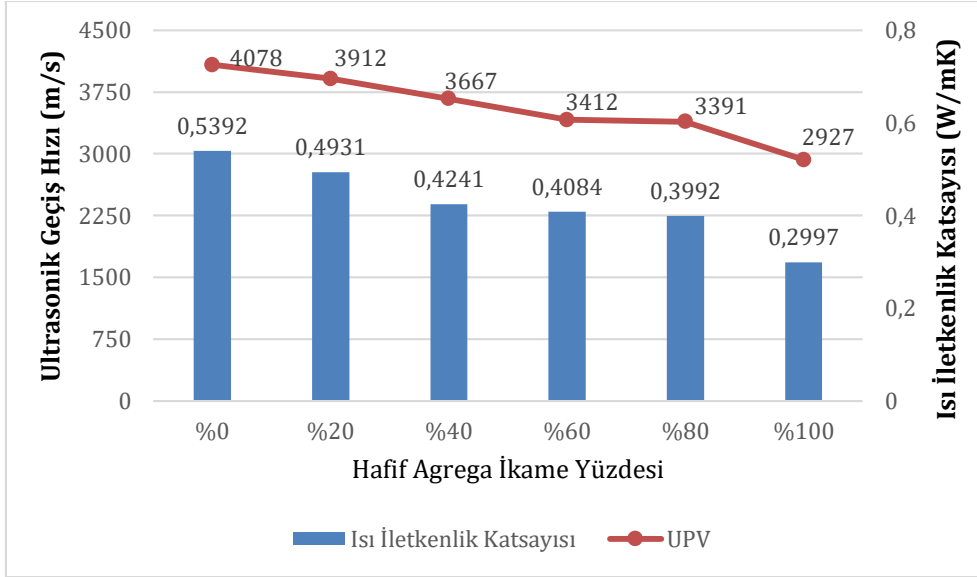
Şekil 2. 28 günlük EPS ve AP ikameli numunelerin birim ağırlık değerleri (Unit weight values of 28-day EPS and AP substituted samples)

28 gün kür edilmiş EPS'li ve atık poliüretanlı harç numunelere ait ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'de sunulmuştur. EPS ikameli harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızlarının 3598 ile 3131 m/s arasında, ısı iletkenlik katsayılarının ise 0.5245 ile 0.1867 W/mK arasında olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde atık poliüretan ikameli harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları 3912 ile 2927 m/s arasında, ısı iletkenlik katsayıları ise 0.4931 ile 0.2997 W/mK arasında ölçülmüştür.

Orta mukavemetli hafif beton sınıfında PC-40E, PC-60E ile PC-100AP kodlu numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla 3509, 3429, 2927 m/s ve 0.3745, 0.3451, 0.2997 W/mK olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre eşdeğer birim ağırlık değerinde, atık poliüretan ikameli numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri, EPS ikameli numunelere oranla daha düşük çıkmıştır. Benzer şekilde, taşıyıcı hafif beton sınıfında PC-20E, PC-40AP ve PC-80AP kodlu numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla 3598, 3667, 3391 m/s ve 0.5245, 0.4241, 0.4084 W/mK, olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerlere göre eşdeğer birim ağırlık değerinde atık poliüretan ikameli numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ile EPS ikameli numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları birbirine oldukça yakın olurken, atık poliüretan ikameli numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri, EPS ikameli numunelere oranla daha düşük çıkmıştır.

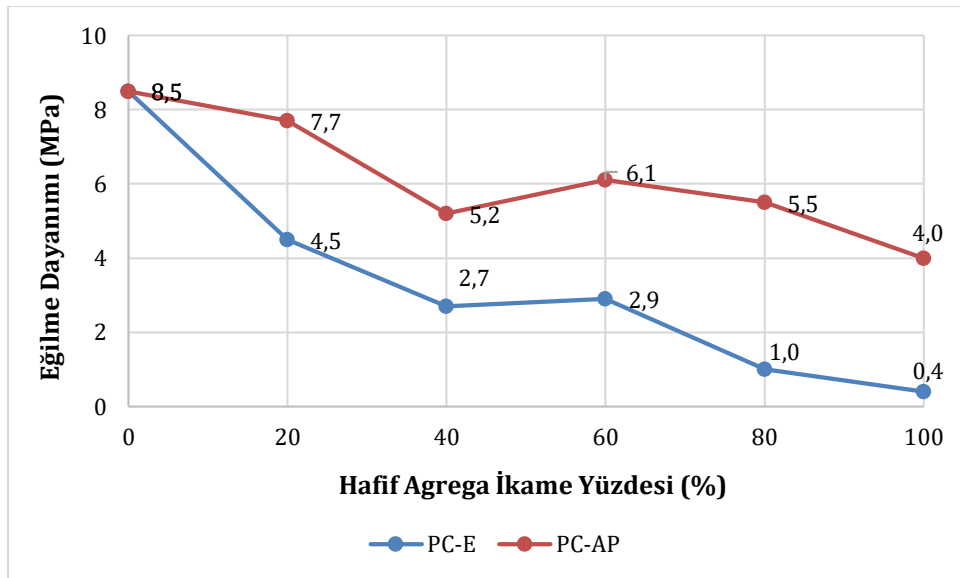


Şekil 3. EPS ikameli numunelerin ısı iletkenlik katsayıları ve ultrasonik geçiş hızları (Thermal conductivity coefficients and ultrasonic pulse velocities of EPS substituted samples)



Şekil 3. EPS ikameli numunelerin ısı iletkenlik katsayıları ve ultrasonik geçiş hızları (Thermal conductivity coefficients and ultrasonic pulse velocities of EPS substituted samples)

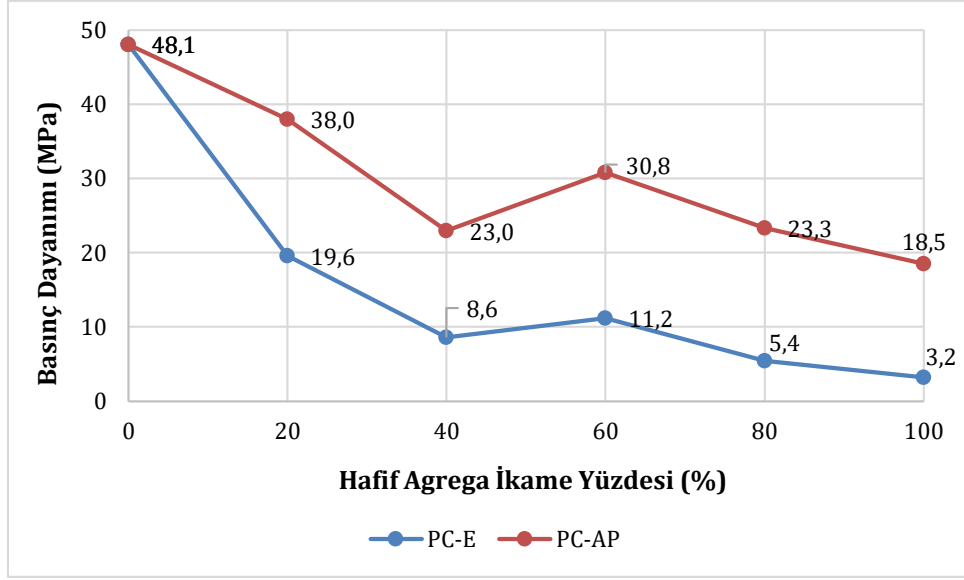
EPS ve AP ikameli harç numuneler için 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde EPS ikameli harçların eğilme dayanımlarının 0.4-4.5 MPa arasında, atık poliüretan ikameli harçların eğilme dayanımlarının ise 4.0-7.7 MPa arasında olduğu görülmüştür. Hem EPS’li hem de atık poliüretanlı harçlarda %40 hafif agrega içeriğinden %60 hafif agrega içeriğine çıktığında eğilme dayanımında artış olmuştur. Bu artış belirli aralıkta işlenebilirliği sağlayabilmek için yapılan su/bağlayıcı oranının azaltılması ile ilişkilendirilmektedir. 28 günlük eğilme dayanımları orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E, PC-60E ve PC-100AP için sırası ile 2.7, 2.9 ve 4.0 MPa olarak tespit edilmiştir. Diğer taraftan taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E, PC-40AP ve PC-80AP için eğilme dayanımları ise sırası ile 4.5, 5.2 ve 5.5 MPa olarak ölçülmüştür. Eşdeğer birim ağırlık değerine göre kıyaslama yapıldığında hem orta mukavemetli beton sınıfında hem de taşıyıcı beton sınıfında atık poliüretan ikamesi, EPS ikamesine göre eğilme dayanımına nispeten daha fazla katkı sağlamıştır.



Şekil 5. 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerleri (28 days flexural strength values)

EPS ve AP ikameli harç numuneler için 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 6’da sunulmuştur. Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde elde edilen bulgular eğilme dayanımı sonuçları ile benzerlik göstermektedir. EPS ikameli numunelerin basınç dayanımları 3.2-19.6 MPa arasında olurken, atık poliüretan ikameli numunelerin basınç dayanımlarının 18.5-38.0 MPa arasında olduğu görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımları orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E, PC-60E ve PC-100AP için sırasıyla 8.6, 11.2 ve 18.5 olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E, PC-40AP ve PC-80AP için basınç dayanımları ise sırasıyla 19.6, 23.0 ve 23.3 olarak belirlenmiştir. Eşdeğer birim ağırlık değerine göre

kıyaslama yapıldığında hem orta mukavemetli beton sınıfında hem de taşıyıcı beton sınıfında yer alan numunelerde atık poliüretan içeren numunelerin basınç dayanımlarının EPS ikameli numunelerden daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



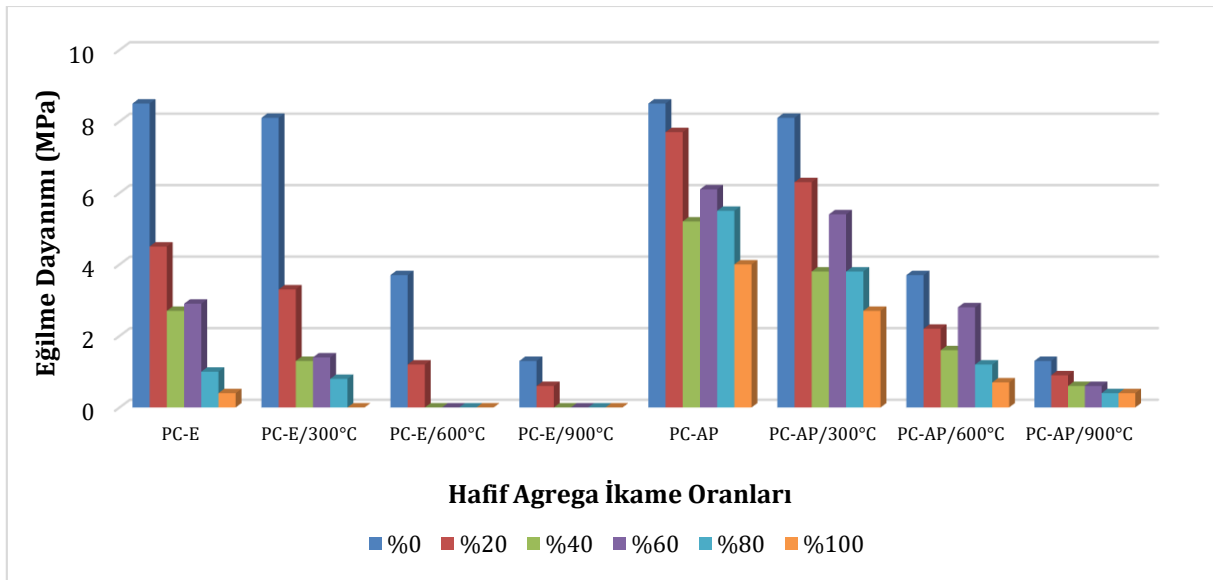
Şekil 6. 28 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri (28 days compressive strength values)

28 gün kür edilen harç numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası dayanımlar incelendiğinde EPS'li ve atık poliüretanlı harçların farklı davranışlar gösterdikleri gözlenmiştir.

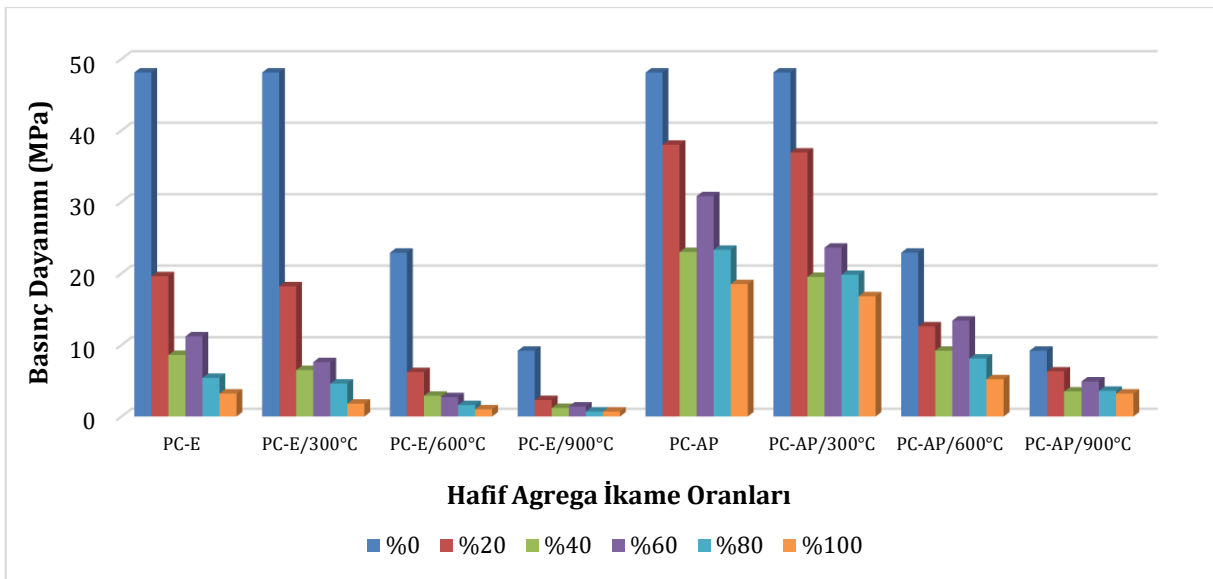
300°C sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde EPS ikameli harçların eğilme dayanımlarının 0.8-3.3 MPa arasında, basınç dayanımlarının ise 3.2-19.6 MPa arasında değiştiği, atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımlarının ise sırasıyla 2.7-6.3 MPa ile 2.5-18.5 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 300°C sonrası orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E, PC-60E ve PC-100AP için eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 1.3, 1.4, 2.7 MPa ve 6.5, 7.6, 16.8 MPa olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E ile PC-40AP ve PC-80AP için eğilme ve basınç dayanımları ise sırasıyla 3.3, 3.8, 3.8 MPa ve 18.2, 19.5, 19.8 MPa olarak ölçülmüştür.

600°C sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde; EPS ikameli harçlarda sadece %20 EPS içeren numunelerde 1.2 MPa eğilme dayanımı ölçülebilenken daha yüksek oranda EPS içeren numunelerde eğilme dayanımı ölçülememiştir. EPS ikameli numunelerde 600°C sonrası basınç dayanımları ise 3.2-19.6 MPa arasında elde edilmiştir. Atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımlarının ise sırasıyla 0.7 – 2.2 MPa ve 5.2-12.6 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 600°C sonrası orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E ve PC-60E kodlu numunelerde eğilme dayanımı elde edilemezken, sırasıyla 2.9 ve 3.7 MPa olarak basınç dayanımı elde edilebilmiştir. Diğer taraftan PC-100AP kodlu numunede 0.7 MPa eğilme dayanımı ve 5.2 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E ile PC-40AP ve PC-80AP kodlu numunelerde eğilme dayanımları sırasıyla 1.2, 1.6 ve 1.2 MPa ve basınç dayanımları ise 6.2, 9.2 ve 8.1 MPa olarak belirlenmiştir.

900°C sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde EPS ikameli harçlarda yine sadece % 20 EPS içeren harç numunelerde 0.6 MPa eğilme dayanımı ölçülebilmıştır. EPS ikameli numunelerde 900°C sonrası basınç dayanımları ise 0.7-2.3 MPa arasında elde edilmiştir. Atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımları ise sırasıyla 0.4-0.9 MPa ve 3.2-6.3 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 900°C sonrası orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E ve PC-60E kodlu numunelerde eğilme dayanımı elde edilemezken, sırasıyla 1.2 ve 1.4 MPa olarak basınç dayanımı elde edilmiştir. Diğer taraftan PC-100AP kodlu numunede 0.4 MPa eğilme dayanımı ve 3.2 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E ile PC-40AP ve PC-80AP kodlu numunelerde eğilme ve basınç dayanımları ise sırasıyla 0.6, 0.6, 0.6 MPa ve 2.3, 3.5, 3.6 MPa olarak ölçülmüştür.



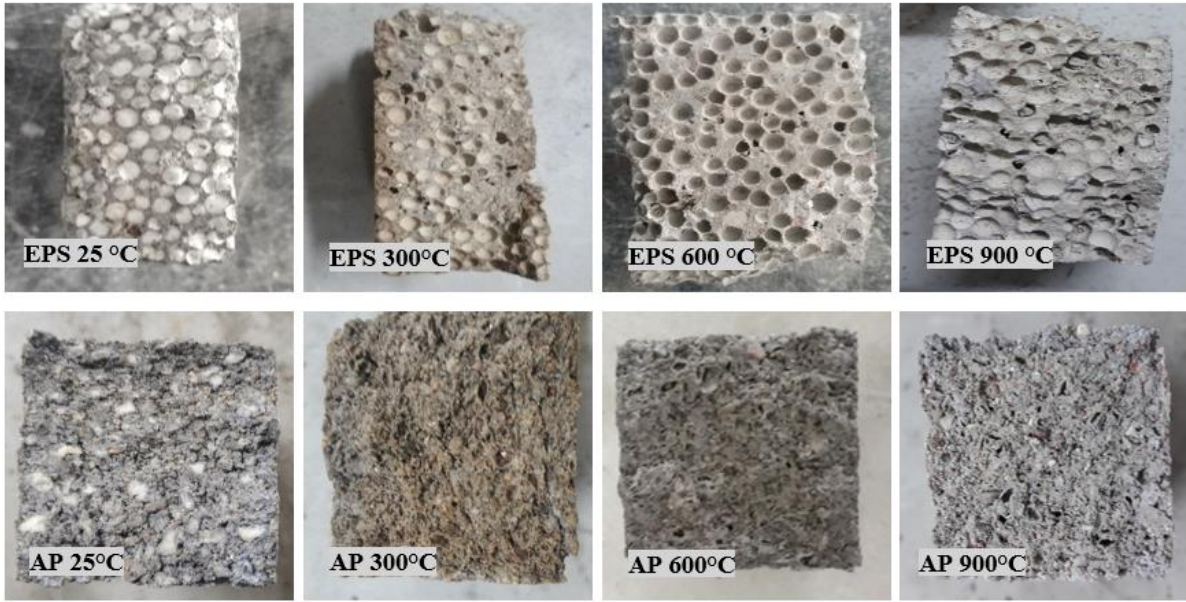
Şekil 7. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen eğilme dayanımları (Flexural strengths after elevated temperature)



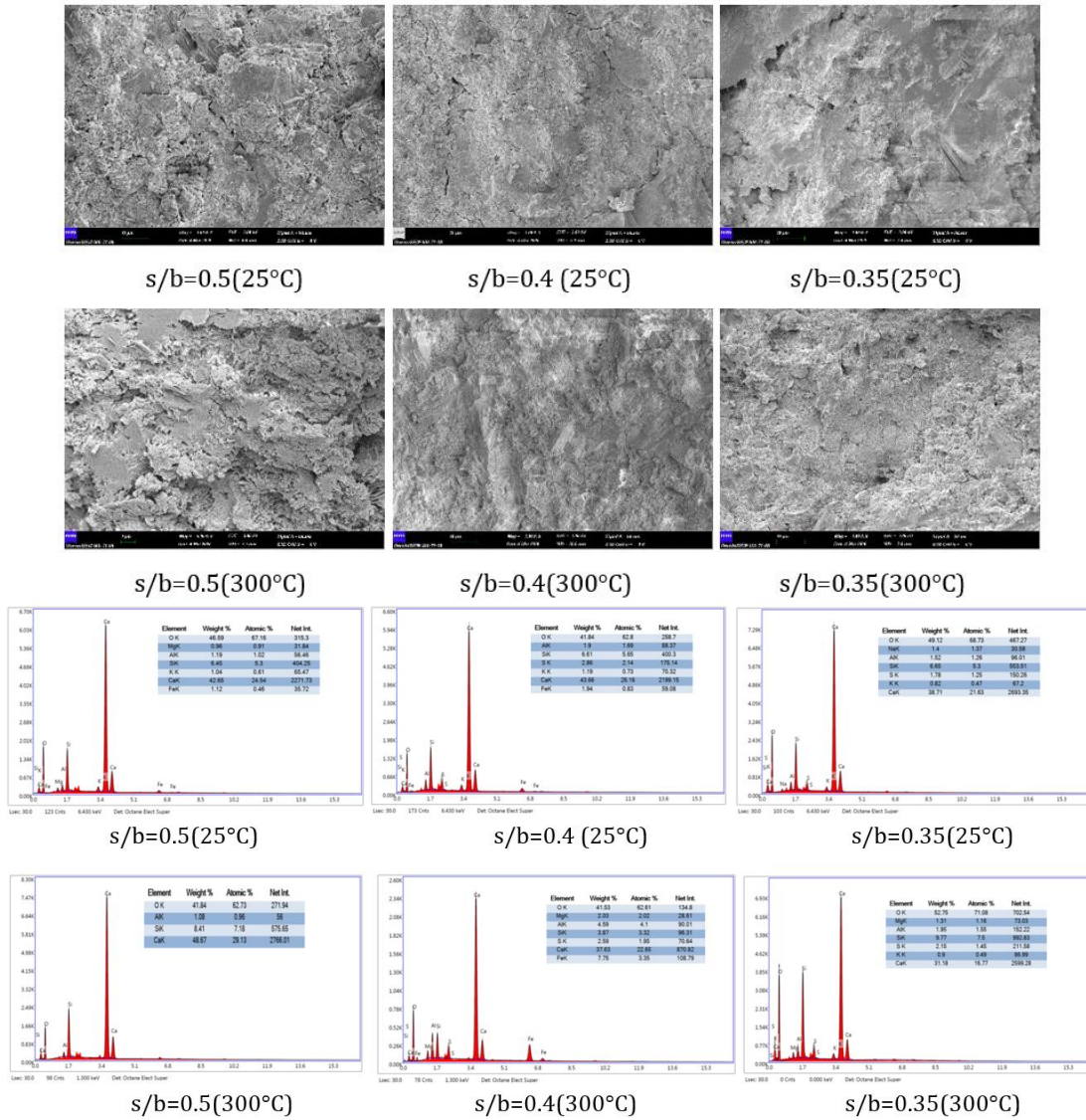
Şekil 8. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen basınç dayanımları (Compressive strengths after elevated temperature)

Yüksek sıcaklık sonrası atık poliüretan içeren numunelerin hem eğilme hem de basınç dayanımlarının EPS ikameli numunelere oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum poliüretan köpüğün yüksek sıcaklığa dayanıklı olması açıklanmaktadır. Ayrıca Şekil 8'de EPS ve atık poliüretan içeren hafif harç numunelerin yüksek sıcaklık sonrası fotoğrafları sunulmuştur. Elde edilen görseller incelendiğinde yüksek sıcaklık sonrası EPS'li harç numunelerde yüksek oranda boşluk ve gözenek oluşurken, atık poliüretanlı köpüklerde bu boşluklar oluşmamaktadır.

Şekil 10'da çimento harçlarına ait FESEM görüntüleri ve EDX analizleri sunulmuştur. Buna göre harç karışımlarında uygulanan su/bağlayıcı oranının 0.35, 0.4 ve 0.5 olmasına uygun olarak, çimento hamur numuneleri de aynı su/bağlayıcı oranlarında incelenmiştir. 300°C sıcaklık sonrası çimento hamurlarının dağılması nedeniyle görüntü alınamamıştır. Su/bağlayıcı oranının azalması nedeniyle hamur yapısında boşlukların azaldığı ve daha yoğun bir yapının oluştuğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının azalması ile oluşan yoğun ve boşluksuz yapı 300°C yüksek sıcaklık sonrasında çimento hamurunun yapısını korumasına yardımcı olmuştur.



Şekil 9. Yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası (300°C, 600°C ve 900°C) numune görünümleri (The appearance of specimens before and after elevated temperatures (300°C, 600°C ve 900°C))



Şekil 10. Çimento hamurlarına ait FESEM görüntüleri ve EDX analizleri (FESEM images and EDX analyzes of cement pastes)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

EPS'li ve atık poliüretanlı harçların birim ağırlık değerleri karşılaştırıldığında, EPS'li numunelerin daha düşük birim ağırlık değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

Hafif harç numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları incelendiğinde hem orta mukavemetli hafif beton sınıfında hem de taşıyıcı hafif beton sınıfında atık poliüretan ikameli numunelerin, EPS ikameli numunelere oranla daha düşük ısı iletkenlik katsayısını sahip olduğu tespit edilmiştir. Ultrasonik atımlı dalga hızları incelendiğinde ise EPS ikameli numunelerin, atık poliüretan ikameli numunelere oranla daha yüksek ultrasonik dalga hızlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Hafif harç numunelerinin eşdeğer birim ağırlık değerlerinde eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde özellikle orta mukavemetli hafif beton sınıfında atık poliüretan ikamesi, EPS'li numunelere göre eğilme ve basınç dayanımına daha fazla katkı sağlamıştır. Orta mukavemetli hafif beton sınıfında atık poliüretanlı numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları EPS'li numunelere kıyasla sırasıyla %38 ve %65'e varan oranlarda artış göstermiştir.

Yüksek sıcaklık sonrası (300°C, 600°C, 900°C) atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımlarının EPS ikameli harçlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurum (TÜBİTAK) 2209 B Sanayiye yönelik lisans araştırma projeleri 2241 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Akçaözöğlü, S., Atiş, C. D., & Akçaözöğlü, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Alshihri, M. M., Azmy, A. M., & El-Bisy, M. S. (2009). Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 23(6). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.003>
- ASTM C 642-13. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. American Society for Testing and Material. <https://doi.org/10.1520/C0642-13.5>
- Beycioğlu, A., Başyigit, C., & Kılınçarslan, Ş. (2010). Pomza Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Silis Dumanının Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 200–205.
- Davraz, M., Gökçe, Y., Koru, M., & Akdağ, A. E. (2020). Çimento esaslı köpük sıvanın fiziksel, mekanik ve termal özellikleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1). <https://doi.org/10.21923/jesd.567408>
- Davraz, M., Gündüz, L., & Başpınar, E. (2011). Lightweight Aggregated Foam Plaster for Thermal Insulation in Buildings. *Journal of Engineering Science and Design*, 1(3), 150–155.
- Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 32(9). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>
- Gönen, T. (2009). Kendiliğinden yerleşen pomza ve perlit agregalı hafif harçların mekanik özellikleri. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 4(2).
- Gönen, T., & Yazıcıoğlu, S. (2020). Pomza agregalı kendiliğinden yerleşen hafif betonların donma çözülme direncine mineral katkıların etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.778058>
- Gutt, W., & Nixon, P. J. (1979). Use of waste materials in the construction industry - Analysis of the RILEM Symposium by Correspondence. *Matériaux et Constructions*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/BF02473543>
- Ke, Y., Beaucour, A. L., Ortola, S., Dumontet, H., & Cabrillac, R. (2009). Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038>
- Kılıç, F. M. (2018). *Hafif şap ile normal şap uygulamasının özelliklerinin karşılaştırılması*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Kılınçarslan, Ş., Davraz, M., & İşıldar, N. (2019). Genleştirilmiş Polistrenin Uçucu Kül İçeren Köpük Beton Özellikleri Üzerine Etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 224–231. <https://doi.org/10.21923/jesd.476358>
- Koksal, F., Gencil, O., & Kaya, M. (2015). Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021>
- Taşdemir, C. (2003). Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 5(427), 57–61.
- TS EN 1015-11. (2000). *Mortar Testing Method, Part 11. Measurement of Compressive and Flexural Tensile Strength of Mortar*.

TSE.

TS EN 1015-3. (2000). *Methods of test for mortar for masonry: Part 3. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. TSE.

TS EN 12504-4. (2012). *Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. TSE.

TS EN 197-1. (2012). *Cement-composition, specifications and conformity criteria-part 1: common cements*. TSE.

TS EN 206:2013+A1. (2013). *Concrete - Specification, performance, production and conformity*.

TS EN 933-1. (2012). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*. TSE.

Yazıcıoğlu, S., & Bozkurt, N. (2006). Pomza ve mineral katkı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4), 675–680.

Yılmaz, H., Sallı Bideci, Ö., & Bideci, A. (2018). Pomza agregalı hafif beton özelliklerine kalsiyum alüminat çimentosunun etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. <https://doi.org/10.21923/jesd.400770>

Zevehoven, R. (2004). *Treatment and disposal of polyurethane wastes: options for recovery and recycling*.



ORGANİK PEKMEZLERDEN JELİ ŞEKER ÜRETİMİ

Muhammed Mustafa ÖZÇELİK^{1*}, Burçak DUMAN¹, Gülcan ÖZKAN¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Jeli Şeker,
Organik Gıda,
Endüstriyel Ürün,
Antioksidan ve Polifenol,
Pekmez.

Öz

Bu çalışmada, doğal karbonhidrat ve enerji kaynağı olan organik pekmezin jeli şeker üretiminde fruktoz şurubu yerine kullanım olanakları araştırılmıştır. Son ürüne C vitamini katkısı yapılarak antioksidan içeriğinin zenginleştirilmesi ve insan vücudunda pekmezden gelen demirin emiliminin artırılması hedeflenmiştir. Organik üzüm, dut ve keçiboynuzu pekmezi kullanılarak üretilen pekmez jeli şekerleri istenilen jel formun oluşması ve stabilitesi açısından başarılı bulunmuştur. Her bir üründe; fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik, duyuşsal ve istatistiksel analizler yapılmıştır. Üzüm, dut ve keçiboynuzu jeli şekerlerinde sırasıyla toplam fenolik madde miktarı 886.37, 1065.81, 3171.29 µg GAE/g KM, askorbik asit miktarı 11.44, 12.80, 16.74 mg A.A/g KM, serbest radikalleri yakalama aktivitesi (DPPH) 132.29, 157.61, 331.45 mg T.E./100gKM, HMF miktarı 3.61, 4.20, 2.54 mgHMF/100gKM, flavonoit miktarı 37,07, 67,70, 67,73 mg Rutin/100g KM olarak bulunmuştur. Yapılan fiziko-kimyasal ve tekstür analizleri sonuçları bakımından en iyi ürün keçiboynuzu jeli şekeri olmasına rağmen, duyuşsal analiz sonuçlarına göre ilk sırayı üzüm jeli şekeri almıştır. Sonuçlar, üzüm, dut ve keçiboynuzu pekmezi kullanılarak üretilen pekmez jeli şekerlerinin endüstriyel anlamda üretim potansiyeline sahip olabileceğini ortaya koymaktadır.

PRODUCTION OF JELLY SUGAR FROM ORGANIC MOLASSES

Keywords

Jelly Sugar,
Organic Food,
Industrial Product,
Antioxidant and Polyphenol,
Molasse.

Abstract

In this study, the possibilities of using organic molasses, which is a natural carbohydrate and energy source, instead of glucose-fructose syrup in the production of gel-sugar were investigated. It was aimed to enrich the antioxidant content by adding vitamin C to the final product and to increase the absorption of iron from molasses in the human body. Gel candies produced using organic grape, mulberry and carob molasses have been successful in terms of the formation and stability of the desired gel form. Physical, chemical, microbiological, sensory, and statistical analyzes were performed in each product. Total phenolic content, vitamin C amount, free radical scavenging activity (DPPH), HMF and flavonoid content of grape, mulberry and carob gel candies were determined as 886.37, 1065.81, 3171.29 µg GAE/g DM; 11.44, 12.80, 16.74 mg AA/g DM; 132.29, 157.61, 331.45 mg TE/100g DM and 3.61 4.20, 2.54 mg HMF/100g DM, 37.07, 67.70, 67.73 mg Rutin /100g DM respectively. According to the physico-chemical and textural analyze results, the best quality product has been found as carob gel sugar however grape gel sugar was the most desired one based on sensory evaluation. The results revealed that molasses gel candies produced using grape, mulberry and carob molasses may have industrial production potential.

Alıntı / Cite

Özçelik, M.M., Duman, B., Özkan, G., (2022). Organik Pekmezlerden Jeli Şeker Üretimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 371-379.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.M. Özçelik, 0000-0002-1933-1737
B. Duman, 0000-0002-4884-7935
G. Özkan, 0000-0002-3333-7537

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 05.10.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date 06.12.2021
Yayın Tarihi / Published Date 30.06.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: ozcelik.m.mustafa@gmail.com, +90-541-910-2908

1. Giriş (Introduction)

Günümüz tüketicileri yaşam ve çalışma koşullarının yoğunluğu sebebiyle daha çok hazır besinlere yönelmektedir. Bu yönelim tüketiciler tarafından sadece besin ihtiyaçlarını karşılamak için değil aynı zamanda iyi bir tat almayı da hedeflemektedir. Bu bağlamda özellikle küçükten büyüğe her yaş grubu tarafından talep gören şekerlemeler dikkat çekmektedir. Tüketicilerin sağlıklı gıda tüketimine olan yönelimi şekerleme endüstrisinde yeni ürün arayışına neden olmaktadır.

Jeli şeker küçük, içi ve dışı jel yapısında, yüksek oranda fruktoz, sakkaroz, dekstroz veya mısır şurubu içeren bir şekerleme türüdür (Moore, 1997). Jeli şekerlemelerde jelleştirici olarak pektin, jelatin ve agar kullanılabilir. Genellikle meyve suları veya özleri ile tatlandırılan bu şekerlemelerde yaygın olarak jelatin kullanılmaktadır. (Godhwani vd., 2012). Gıda endüstrisinde kullanılan jelleştiriciler genelde domuz veya dana derisi ile kemiğinden elde edilmektedir. Ayrıca jelatin üretiminde bazı üreticiler hayvan sinirleri, bağ doku, kıkırdak ve toynakları kullanmaktadır. Yenilebilir jelatin gıda sektöründe dondurma, pastalar ve şekerlemeler, çikolatalar, tatlılar, et endüstrisi ve en önemlisi de gıdalarda parlatici ve şekillendirici madde olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Boran, 2011). Bu ürünlerin aşırı tüketilmesi, yüksek kaloriye sahip oldukları için karaciğer yağlanması, obezite, hipertansiyon ve tip 2 diyabet başta olmak üzere bazı metabolik rahatsızlıklara neden olmaktadır (Yeşilot, 2017, Parnell vd., 2007).

Jeli şekerler aynı zamanda, yapısal ve duyu özelliklerinin kazandırılması için bileşimlerinde renk ve aroma maddeleri, jelatin, pektin ve nişasta gibi maddeler ihtiva etmektedirler. Ancak bu ürünlerin biyolojik açıdan önemli olan mineral maddeleri, vitaminleri ve karotenoidleri içermemelerinden dolayı tüketici talepleri doğrultusunda şekerli atıştırmalık pazarına yeni ürün arayışında bal, pekmez ve meyve gibi doğal gıdaların sağlıklı ve besleyici şeker kaynağı olarak kullanımı gündeme gelmiştir (Dorn vd., 2015; Güneş vd., 2018).

Farklı meyvelerden üretilen pekmezler, hem doğal şeker (%50-80) hemde, organik asit ve mineral içeriği nedeniyle yeni ürün üretiminde sağlıklı/besleyici alternatif bir şeker kaynağıdır (Şimşek ve Artık, 2002). Pekmez, çoğunlukla üzüm, dut, keçiyoynuzu ve incir gibi karbonhidrat ve şeker bakımından zengin meyvelerden üretilmektedir (Akbulut vd., 2007).

Dünya nüfusunun yaklaşık %30'unda anemi hastalığı görülmekte ve bu hastalığın yarısını demir eksikliği anemisi oluşturmaktadır. Anemi anne ve çocuk fiziksel performansını etkileyen major halk sağlığı problemidir (Çipil ve Demircioğlu, 2016). Pekmez insan bünyesinin kullanabildiği (+2) değerli demir içeriğine sahiptir. Özellikle C vitamini emilim oranını artırması nedeni ile büyüme çağındaki çocuklar, hamileler, emziren anneler ve sporcular için bu minerallerden demir miktarının önemi büyüktür. Bu yüzden yüksek demir içeriğine sahip ürünlerin C vitamini ile tüketilmesi tavsiye edilmektedir (Yurdakök ve İnce, 2009).

Bu çalışmada şeker kaynağı olarak organik keçiyoynuzu, dut ve üzüm pekmezleri kullanılmıştır. Böylece doğal, besleyici değeri yüksek ve daha sağlıklı jeli şeker üretimi amaçlanmıştır. Jeli şeker üretiminde askorbik asit ilavesi ile pekmezin içerdiği demirin biyoyararlılığının artırılması hedeflenmiştir. Diğer taraftan pekmezin kullanıldığı ürün portföyünün genişletilerek hem üreticilere hem de şekerleme endüstrisinin en önemli tüketicilerinden özellikle çocuklara daha sağlıklı şekerlemeler sunmak çalışmanın temel amaçlarından birisidir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmada kullanılan bitkisel ve vejeteryan agar agar (Gıda Tipi, E Kodu: E-406), (Tito, Smart Kimya, İzmir), C vitamini katkısı (Voonka, Kamptu İlaç San. Tic. A.Ş. İstanbul) organik üzüm pekmezi (Koska A.Ş., İstanbul), organik dut, keçi yoynuzu pekmezi (Grünn, Naturka organik Ltd.Şti.) ve firmalarından temin edilmiştir.

Analizlerin gerçekleştirilmesinde sitrik asit, sodyum karbonat (Na_2CO_3), 2,2-difenil-1-pikril-hidrazil (DPPH), gallik asit, Tris-HCL, sodyum nitrit (NaNO_2) ve HMF standardı (Sigma, Almanya), Folin-Ciocalteu, metanol (%99.9), meta-fosforik asit ve L-askorbik asit (Merck, Almanya), PCA besiyeri ve PDA besiyeri (CondaLAB, İspanya), 0.45µm HPLC filtreleri ve steril kullanıma hazır petriyeler (Isolab, Almanya) kullanılmıştır.

2.1. Pekmezli jeli şeker üretimi (Production of jelly sugar)

Jeli şeker üretiminde şeker kaynağı olarak organik üzüm, dut ve keçiyoynuzu pekmezleri, jelleştirici ajan olarak agar agar, vitamin katkısı olarak C vitamini ve aroma vermesi amacıyla suda çözünür kahve kullanılmıştır. Jeli şeker bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Üretilen pekmez jeli şeker bileşenleri (Produced molasse gel candies sugar components)

| Bileşenler | Miktar (g) | Saf Su Miktarı (g) |
|---|------------|--------------------|
| Pekmez çeşitleri (üzüm, dut ve keçiyoynuzu) | 65 | 35 |
| Agar agar | 3 | 85 |
| C vitamini | 1 | - |
| Çözünür kahve | 1 | - |

Pekmezlerin viskozitesi yüksek olduğu için pekmez/su 65:35 (w:w) oranında saf su ile seyreltilmiş ve 50°C'de 30 dakika boyunca su banyosunda karıştırılarak bekletilmiştir. Su banyosundan alınan örneklere vitamin katkısı olarak 1 g toz askorbik asit ile aroma kazandırmak amacıyla 1 g kahve ilave edilmiştir. Daha sonra 3 g agar agar 70 °C sıcaklığa ısıtılan 85 ml su içerisinde çözülerek hazırlanmış ve seyreltilmiş pekmez üzerine eklenmiştir. Pekmez-agar karışımları gıdaya uygun çeşitli silikon kalıplara aktarılarak oda sıcaklığında soğuyana kadar bekletilmiştir.

2.2. Asitlik ve pH değeri tayini (Determination of acidity and pH amount)

Üretilen jeli şeker örneklerinde (%) asitlik değeri tartarik asit eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Örnek hazırlama aşaması sonrasında pH değerleri potansiyometrik olarak pH metre (HI 2211, Hanna, Almanya) ile ölçülmüştür.

2.3. Su aktivitesi (Water activity)

Üretilen jeli şeker örneklerinin su aktiviteleri (a_w) su aktivitesi tayin cihazı (Thermoconstanter TH 200, Novasina, Axair Ltd., İsviçre) kullanılarak oda sıcaklığında ölçülmüştür.

2.4. Çözünür kuru madde tayini (Determination of soluble dry matter)

Tüm örneklerde suda çözünür kuru madde miktarı, refraktometre cihazı (N-1E, ATACO) ile oda sıcaklığında belirlenmiştir. Sonuçlar briks derecesi (°Bx) cinsinden ifade edilmiştir.

2.5. Nem ve toplam kuru madde tayini (Determination of moisture and total dry matter)

Nem tayini için standart gravimetrik yöntem kullanılmıştır. Bu amaçla örnekler hassas terazi ile 1/1000 g hassasiyette tartılmış ve önceden sabit tartıma getirilmiş ve soğutulmuş kurutma kaplarına konulmuştur. Kaplar kurutma fırınına yerleştirilerek, sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Örneklerin nem miktarları kuru madde üzerinden verilmiştir (Anonim, 2005).

2.6. Kolorimetrik renk tayini (Determination of color measurement)

Üretilen jeli şeker örneklerinin yüzey rengini belirlemek amacıyla renk ölçüm cihazı (NH-310 Kolorimetre, 3nh technology Co., LTD. Çin) kullanılmıştır. Ölçümler CIE renk skalası (L^* , a^* , b^*) ile yapılmıştır.

2.7. Su tutma kapasitesi (Water holding capacity)

Jeli şekerlerin su tutma kapasitesi (STK) Nunez-Mancilla vd. (2014) tarafından önerilen yöntemle yapılmıştır. Bu amaçla üründe bulunan suyun sızarak tüpün alt kısmında toplanmasına olanak sağlayan plastik bir süzgeç lif santrifüj tüpüne yerleştirilmiştir ve yaklaşık 5 g örnek tartıldıktan sonra 3500 g'de, 20 °C sıcaklıkta, 15 dk santrifüj edilmiştir. Aşağıda verilen eşitlik (1) kullanılarak ürünün su tutma kapasitesi hesaplanmış ve sonuçlar 'tutulan su/100 g su' (% su) cinsinden ifade edilmiştir.

$$STK = \frac{W_i \times X_i - W_{ii} \times X_{ii}}{W_i \times X_i} \times 100 \quad (1)$$

Wi: Santrifüj öncesi kütle (g), Xi: Santrifüj öncesi nem içeriği (%), Wii: Santrifüj sonrası kütle (g), Xii: Santrifüj sonrası nem içeriği (%).

2.8. Tekstür analizi (Texture analysis)

Tekstür analiz cihazı (Texture Stable Micro Systems, TA-XT Plus, İngiltere) ile örneklerin tekstürel özelliklerin belirlenmesinde delme (puncture) testi ve kesme testi uygulanmıştır. Denemeler iki paralel halinde yapılmıştır.

2.9. Toplam fenolik madde miktarının belirlenmesi (Determination of total phenolic content)

Toplam fenolik madde miktarının belirlenmesinde Spanos ve Wrolstad (1990) ve Toor ve Savage (2006) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Absorbans değeri spektrofotometrede 765 nm dalga boyunda şahit çözeltiliye karşı okunmuştur. Örnekte ölçülen absorbans değeri ile hazırlanan standart kurvenin denklemi kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Örnekteki toplam fenolik madde miktarı 'µg gallik asit eşdeğeri (GAE)/100 g kuru madde' cinsinden ifade edilmiştir.

2.10. Serbest radikalleri yakalama aktivitesi tayini (DPPH) (Determination of free radical scavenging activity (DPPH))

Üretilen jeli şekerlerin hidrojen bağlama yeteneği 2,2-difenil-1-pikril-hidrazil (DPPH) serbest radikal yakalama aktivitesi tayini kullanılarak hesaplanmıştır (Dorman vd., 2003). Jeli şekerlerden metanol : su (80:20; v/v) karışımı ile elde edilen fenolik ekstraktlardan 50 µl alınarak tüplere pipetlenip üzerine 450 µl Tris-HCl tamponu (50 mM, pH: 7.4) ilave edilmiştir. Daha sonra bu karışıma 1.00 mL DPPH (0.10 mM, metanol içerisinde) çözeltisinden eklenerek oda sıcaklığında 30 dk karanlıkta bekletilmiştir. Reaksiyon süresinin bitiminde çözeltinin absorbansı 517 nm'de spektrofotometrede (T70+UV/VIS spectrophotometer, PG Instruments, İngiltere) okunmuştur. Kontrol olarak fenolik ekstraktı yerine saf su kullanılmıştır. DPPH (2,2-Difenil-1-pikril-hidrazil) serbest radikalleri yakalama aktivitesi sonuçları trolox eşdeğeri (TE) olarak verilmiştir. Analizler üç paralel halinde yapılmıştır.

2.11. Toplam flavonoit tayini (Determination of total flavonoid content)

Toplam flavonoit tayininde Zhishen vd. (1999) tarafından önerilen ve Toor ve Savage (2006) tarafından modifiye edilen kolorimetrik yöntem kullanılmıştır. Jeli şekerden yaklaşık 5 g alınarak Soxhlet ekstraktöründe 1 saat ekstrakte edilmiştir. Filtre edilen ekstraktlar veya 'Rutin' standart çözeltisinden 1 mL alınarak saf su ile 5 mL'ye tamamlanmıştır. Ardından 0.3 mL % 5 (w/v) sodyum nitrit (NaNO₂) ilave edilmiştir. Örnekler oda sıcaklığında 5 dk inkübasyona bırakıldıktan sonra 0.6 mL %10 (w/v) AlCl₃ eklenerek 6 dakika daha inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyonu takiben 2 mL 1 M NaOH çözeltisi ve 2.1 mL saf su eklenerek toplam hacim 10 mL'ye tamamlanmıştır. 510 nm dalga boyunda absorbans değerleri saf suya karşı okuma yapılmış ve sonuçlar 'mg rutin/100 g kuru madde' cinsinden ifade edilmiştir.

2.12. Askorbik asit içeriğinin belirlenmesi (Determination of ascorbic acid content)

Askorbik asit ekstraksiyonunda, jeli şekerlemeler küçük parçalara ayrılıp % 4.5'lik meta-fosforik asit ile 1:12.5 (g/mL) oranında karıştırılmış ve homojenize edilmiştir. Devamında 4000×g 4°C'de 20 dk santrifüj edilmiştir. Supernatant 0.45 µm Millipore filtreden geçirilerek 20 µL hacminde HPLC'ye (Agilent 1260 infinity, Amerika) enjekte edilmiştir. Çalışmada; C18 kolon (ACE, 250*4,6 mm, ID: 5 µm) ve diode array dedektör (DAD, Agilent 1260 MWD VL, Amerika) kullanılmıştır. Mobil faz ultra saf su: fosforik asit (pH 2.2), kolon fırın sıcaklığı 35°C, akış hızı 0.8 mL/dk, akış süresi 30dk'dır (Demiray vd. 2013).

2.13. Hidroksimetilfurfural (HMF) tayini (Determination of hydroxymethylfurfural (HMF))

HMF ekstraksiyonu için 20 mL HPLC grade su ile ±0,001 g duyarlılıkla 10 g numune 15 dk homojenize edilmiştir. Numuneler 5 dk vortekslenmiştir. Müteakiben 25 dk 2574 g 'de santrifüj edilen örnekler Whatman 1 nolu filtre kağıdından geçirilmiştir. Daha sonra filtre edilen örnekler 0.45 µm Millipore filtreden geçirilerek 20 µL hacminde HPLC'ye (Agilent 1260 infinity, Amerika) enjekte edilmiştir. Çalışmada; C18 kolon (İnertsil ODS-3, 250*4,6 mm, 5 µm ID) ve diode array dedektör (DAD, Agilent 1260 MWD VL, Amerika) kullanılmıştır. Mobil faz A: %5 asetonitril, B: %95 grade su (w/v), kolon fırın sıcaklığı 40°C, akış hızı 1 mL/dk, akış süresi 10 dk'dır.

Bileşenlerin tanımlanması için HMF standardından yararlanılmıştır. HMF standardından stok çözelti (1000 ppm) hazırlanmıştır. Ardından uygun oranlarda metanol ile seyreltme yapılarak 5, 10, 50 ve 100 ppm'lik standartlar hazırlanmıştır. Elde edilen bu standartlar kullanılarak kalibrasyon eğrisi çizilmiş ve bu eğri hesaplamalarda kullanılmıştır. Tüm analizler 2 paralel halinde yapılmıştır.

2.14. Şeker tayini (Determination of sugar content)

Veberic ve Stampar (2005) tarafından kullanılan yöntem modifiye edilerek kullanılmıştır. 10 g tartılan jeli şeker örnekleri 50 mL saf su içerisinde homojenize edilmiş ve 30 dk manyetik karıştırıcıda bekletilmiştir. Süre sonunda ekstrakt 2574 g 'de 7 dk santrifüjlenerek, supernatant kısmı 0.45 µm Millipore filtreden geçirilerek 20 µL hacminde HPLC'ye (Shimadzu, Japonya) enjekte edilmiştir. Çalışmada; karbohidrat kolon (Aminex HPX-87C,

300*7.8mm) ve refraktif indeks dedektör (Shimadzu RID 10A, Japonya) kullanılmıştır. Mobil faz Ultra saf su, kolon fırın sıcaklığı 80°C, akış hızı 0.6 mL/dk'dır.

2.15. Mikrobiyolojik analiz (Microbiological analysis)

Jeli şekerlerin mikrobiyolojik yükünü belirlemek amacıyla; toplam mezofilik aerobik bakteri (TAMB), maya ve küf sayımı AOAC (1998)'de belirtilen yöntemlere göre yapılmıştır. 10 gram jeli şeker örneği, stomacher torbası içerisinde 90 ml steril peptonlu tuzlu su (% 0.1 pepton ve %0.85 NaCl, w/v) çözeltisi ile karıştırılmış ve stomacherde 230 rpm'de 2.5 dk homojenize edilmiştir. Homejenattan steril peptonlu tuzlu su çözeltisi kullanılarak ardışık seyreltiler hazırlanıp her bir tekerrürde iki paralel yapılmıştır. Plate Count Agar (PCA) besiyerinde toplam aerobik mezofilik bakteri (TAMB) sayısı dökme usulü ekim yöntemiyle iki tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve 30 °C'de 48 saat inkübe edilmiştir. Maya ve küf sayısı Patato Dextrose Agar (PDA) ortamında dökme usulü ekim yöntemiyle iki tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve 25 °C'de 48 saat inkübe edilmiştir.

2.16. Duyusal analiz (Sensory analysis)

Örneklerin duyusal analizleri yarı-egitimli 20 panelist tarafından gerçekleştirilmiştir. Panelistler 20-30 yaş grubundan seçilmiştir. Panelistler, duyusal değerlendirme formunda yer alan skala ve terimler hakkında eğitilmişlerdir. Kabul edilebilirlik testi 5-nokta puanlama skalasına (hedonik skala, hiç beğenmedim: 1, aşırı beğendim: 5) göre oluşturulmuştur. (Demirkesen vd., 2010). Analizler Süleyman Demirel Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümünde laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, farklı örneklerin değerlendirilmesine geçmeden önce panelistlere su ve kraker verilmiştir.

2.17. İstatistiksel analizler (Statistical analyzes)

Verilerin istatistiksel değerlendirilmesinde Minitab istatistik paket programı kullanılmıştır. Gruplar arası farkın önemi Tukey çoklu varyans analizi ile belirlenmiştir.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Organik dut, keçi boynuzu ve üzüm pekmezli jeli şekerlerde fizikokimyasal analiz sonuçları (Physicochemical analysis results of organic mulberry, carob and grape molasses of jelly sugar)

Jeli şeker örneklerinde yapılan bazı fizikokimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Üretilen jeli şekerlerin titrasyon asitliği değerleri istatistiksel olarak birbirinden farklı bulunurken, suda çözünür kuru madde değerlerinde önemli bir fark bulunmamıştır. Üzüm ve keçi boynuzu jeli şekerlerinin pH değeri dut pekmezinden istatistiksel olarak ayrılmaktadır.

Tablo 2. Pekmez jeli şekerinde bazı fizikokimyasal analiz sonuçları. (Results of physicochemical analysis in molasse gel candies)

| | Üzüm pekmezi jeli şekerleri | Dut pekmezi jeli şekerleri | Keçi boynuzu pekmezi jeli şekerleri |
|------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Titrasyon asitliği (%) | 1.88±0.02 ^a | 1.48±0.04 ^b | 3.00±0.03 ^c |
| pH | 5.65±0.05 ^a | 6.36±0.04 ^b | 5.52±0.08 ^a |
| % Brix | 32.30±0.34 ^a | 32.10±0.31 ^a | 31.72±0.21 ^a |
| Su aktivitesi | 0.89±0.01 ^a | 0.89±0.01 ^a | 0.89±0.01 ^a |
| Toplam kuru madde (%) | 63.63±0.29 ^a | 61.30±0.38 ^b | 63.52±0.37 ^a |
| Su Tutma Kapasitesi | 70.32±1.37 ^a | 63.45±1.04 ^b | 60.49±2.64 ^b |
| Sıklık | 50.18±2.10 ^a | 45.84±1.41 ^a | 62.69±3.02 ^b |
| Yüzey direnci | 20.66±1.02 ^a | 54.37±2.14 ^b | 11.43±0.67 ^c |
| Elastikiyet | 11.26±0.01 ^a | 12.56±0.40 ^a | 11.96±0.83 ^a |

*Tabloda verilen aynı satırdaki farklı harflendirmeler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p≤0.05).

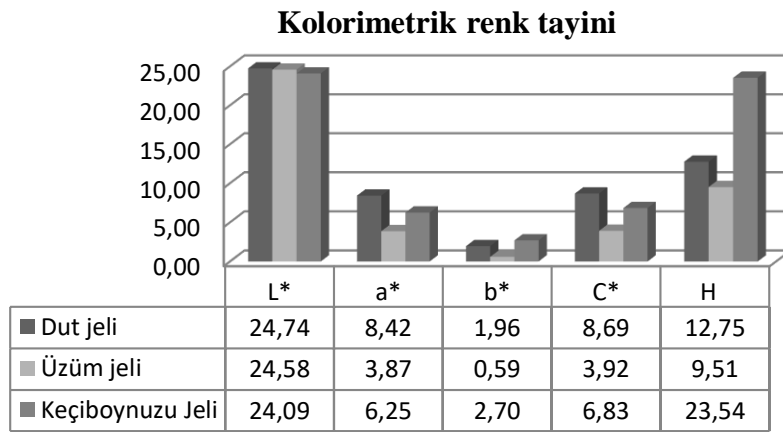
Ürünlerin su aktivitesi ortalama 0.89 değerinde bulunmuş olup kullanılan farklı pekmezlerin istatistiksel olarak su aktivitesi üzerine önemli bir farkı bulunmamıştır. Literatür incelendiğinde pek çok bozulma yapan bakterinin 0.91' in altındaki su aktivitesinde gelişemediği tespit edilmiştir (Uysal Seçkin ve Taşeri, 2015). Bu bağlamda üretilen ürünler bakteriyel bozulmalar açısından güvenli kabul edilebilecek bölgededir.

Jeli şekerlerin toplam kuru madde miktarları incelendiğinde değerler arasında istatistiksel olarak fark tespit edilememiştir. Su tutma kapasitesi sonuçları değerlendirildiğinde ise istatistiksel olarak üzüm jeli şekerinin yapısında daha fazla su tutma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen jeli şekerlerde tekstür analizleri olarak sıklık, yüzey direnci ve elastikiyet değerleri incelenmiştir. Dut jeli şekerleri sıklık ve yüzey direnci değerleri

açısından istatistiksel olarak diğer jeli şekerlerden ayrılmaktadır. Jeli şekerlerin elastikiyet değerlerinde istatistiksel olarak önemli bir fark bulunmamıştır.

3.2. Kolorimetrik renk tayini sonuçları (Results of of color measurement)

Çalışmamızdaki jeli şeker örneklerinin yüzey rengi için “Hunter Lab Renk Skalası (L*, a*, b*)” kullanılarak belirlenmiş, sonuçlar Şekil 1’de sunulmuştur. Ürünlerin L*, a*, b* ile C* (L*: aydınlık değeri, a*: kırmızılık-yeşillik, b*: sarılık-mavilik C*: renk yoğunluğu) değerleri birbirine yakın ve istatistiksel olarak farksız bulunurken H değeri arasında istatistiksel olarak fark vardır. Hue (H) değeri renk uzayında yer alan bir noktanın dikey eksene uzaklığı olarak veya renk uzayında belirli bir renge karşılık gelen renk yoğunluğu olarak ifade edilmektedir. Rengin kırmızı, yeşil, sarı ve mavilikte bulunduğu noktaya göre rengin açısı değişir. Hue değeri 0’a yaklaştıkça renk kırmızı tonlarına 90’dan sonra ise sarı tonlarına, 180 ve sonrası ise yeşil tonlarına, 370 derecede ise mavi renk tonlarına karşılık gelmektedir. Tabloda sunulan Hue değerleri kırmızı renk tonlarına karşılık gelmekte olup değer sayısal olarak arttıkça renk açık kırmızıdan koyu kırmızıya ve kahverengi tonlarına daha da ileride sarıya dönmektedir. Üzüm jeli şekerinde parlaklık ve jeli şekerlerde istenilen saydam canlı renk daha başarılı bulunurken keçi boynuzu ve dut jeli kahverengi renge sahip ve mat renk olmuştur.



Şekil 1. Üretilen jeli şekerlerde kolorimetrik renk tayini (Determination of color parameters in produced gel candies)

3.3. Toplam fenolik madde, askorbik asit miktarı, serbest radikalleri yakalama aktivitesi (DPPH), hidroksimetilfurfural (HMF) tayini ve şeker analizi sonuçları (Results of total phenolic content, ascorbic acid amount, free radical scavenging activity (DPPH), hydroxymethylfurfural (HMF) and sugar analysis)

Üretilen jeli şekerlerin analiz sonuçları $\mu\text{g GAE/g KM}$ cinsinden hesaplanmıştır. Tablo 3’te sunulan veriler incelendiğinde, üretilen keçi boynuzu jeli şekerin sahip olduğu fenolik madde miktarının diğer jeli şekerlerden yüksek olduğu ve bu farkın istatistiksel olarak önemli olduğu görülmektedir. Askorbik asit kaybını önlemek amacıyla C vitamini üretim sırasında sıcaklık işlemine maruz bırakılmadan %1 oranında ilave edilmiştir. En yüksek askorbik asit içeriği keçi boynuzu jelinde tespit edilmiş olup ürünler arasındaki fark istatistiksel olarak önemli çıkmıştır.

Tablo 3. Üretilen jeli şekerlerde Toplam fenolik madde, askorbik asit miktarı, serbest radikalleri yakalama aktivitesi (DPPH), hidroksimetilfurfural (HMF) tayini ve şeker analizi sonuçları (Total phenolic substance, ascorbic acid amount, free radical capture efficiency (DPPH), hydroxymethylfurfural (HMF) determination and sugar analysis in produced gel candies)

| | Üzüm pekmezi jeli şekerleri | Dut pekmezi jeli şekerleri | Keçi boynuzu pekmezi jeli şekerleri |
|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Toplam fenolik madde miktarı ($\mu\text{g GAE/g KM}$) | 886.37 \pm 0.2 ^a | 1065.81 \pm 0.3 ^b | 3171.29 \pm 0.3 ^c |
| Askorbik asit içeriği (mg AA/g KM) | 11.44 \pm 0.06 ^a | 12.80 \pm 0.3 ^b | 16.74 \pm 0.3 ^c |
| Serbest radikalleri yakalama aktivitesi (DPPH ; mg TE/100 g KM) | 132.29 \pm 0.27 ^a | 157.61 \pm 0.36 ^b | 331.45 \pm 0.67 ^c |
| Toplam flavonoit (mg Rutin/100 g KM) | 37,07 \pm 0.37 ^a | 67.70 \pm 0.76 ^b | 67.73 \pm 0.76 ^b |
| HMF (mg HMF/100g KM) | 3.61 \pm 0.01 ^a | 4.20 \pm 0.03 ^b | 2.54 \pm 0.01 ^c |
| Şeker içeriği (ppm) | | | |
| Sukroz | 5.80 ^a | 11.10 ^a | 110.10 ^b |
| Glukoz | 116.40 ^a | 105.30 ^a | 59.50 ^b |
| Fruktoz | 118.60 ^a | 104.20 ^a | 60.00 ^b |

*Tabloda verilen aynı satırdaki farklı harflendirmeler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p < 0.05$).

En yüksek serbest radikal yakalama aktivitesine sahip ürünün keçi boynuzu pekmezi jeli şekeri olduğu tespit edilmiştir. Üzüm ve dut pekmezi jeli şekerlerinin ise serbest radikal yakalama aktivite değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Toplam fenolik madde miktarı keçi boynuzu pekmezinden üretilen jeli şekerde diğerlerden yaklaşık 3 kat daha fazla değere sahiptir ve dolayısıyla serbest radikalleri yakalama aktivitesi de bu duruma bağlı olarak diğer jeli şekerlerden daha yüksek bulunmuştur. Toplam flavonoid miktarları ise mg rutin cinsinden hesaplanmış olup en yüksek flavonoid miktarı keçi boynuzu ve dut jelinde tespit edilmiş ve üzüm pekmez jelinin flavonoid değeri istatistiksel olarak diğerlerinden farklı bulunmuştur.

Türk Gıda Kodeksi pekmez tebliğinde kabul edilebilir HMF miktarının maksimum 75 mg/kg olması gerektiği belirtilmiştir (Anonim, 2021). Bu bilgiler ışığında ürünlerimizde oluşan HMF miktarının düşük değerlerde olduğu ve gıda kodeksine uygun olduğu tespit edilmiştir.

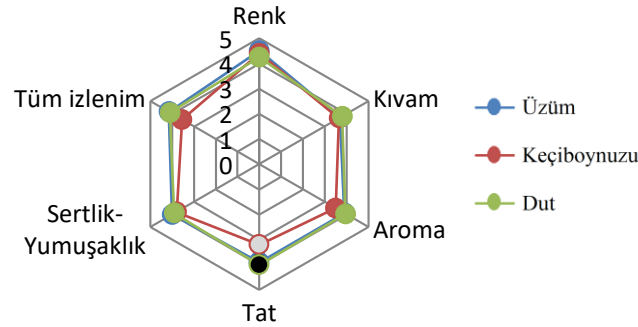
İstatistiksel olarak keçi boynuzu pekmezi jelindeki şeker içeriği, üzüm ve dut jeli şekerlerinden önemli derecede farklı bulunmuştur ($p < 0.05$). Şeker analizi sonuçlarına göre, keçi boynuzu pekmezi jeli şekerinde sukroz miktarı diğer jeli şekerler ile kıyaslandığında en yüksek değere sahipken, glukoz ve fruktoz miktarlarının en düşük değere sahip olduğu belirlenmiştir. Keçi boynuzu jeli şekerinde sukroz başlıca bileşenken, dut ve üzüm pekmezleri jellerinde glukoz ve fruktoz başlıca bileşenler olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçların keçi boynuzu jeli şekerin duyuşal özelliklerini etkilediği ve daha az tercih edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

3.4. Mikrobiyolojik analiz sonuçları (Results of microbiological analysis)

Üzüm, dut ve keçi boynuzu jelinde toplam mezofilik aerob bakteri (TMAB) ve küf tespit edilememiştir. Ancak sadece üzüm örneklerinde maya sayısı 1.4×10^2 KOB/g olarak bulunmuştur.

3.5. Duyusal analiz sonuçları (Results of sensory analysis)

Duyusal analizde, panelistler dut, keçi boynuzu ve üzüm pekmezli jeli şekerlerin renk, kıvam, tat, aroma, sertlik-yumuşaklık ve tüm izlenim verilerinden elde edilen sonuçlar varyans analizi ile değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Duyusal analiz sonuçları (Results of sensory evaluation.)

Şekil 2'de verilen duyuşal değerlendirmede sertlik-yumuşaklık ve kıvam değerleri üç örnekte de birbirine çok yakın bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonucunda; kıvam, tat, aroma, renk, sertlik-yumuşaklık ve tüm izlenim parametrelerinde önemli ölçüde farklılık görülmüştür ($p \leq 0.05$). Keçi boynuzu jelinin şeker analizi sonucunda, glukoz ve fruktoz oranı diğer pekmez jeli şekerlerinin yarı değerinde, sukroz oranı ise yaklaşık iki katı bulunmuştur. Bu sonuç duyuşal analize yansımış ve keçi boynuzu jeli şekerinin tat bakımından diğerlerine göre daha az beğenilmesine sebep olmuştur. Tüm izlenim sonucunda ise duyuşal olarak üzüm pekmezi jeli en beğenilen özelliklere sahip olurken bunu sırasıyla dut ve keçi boynuzu pekmez jeli şekerleri takip etmiştir.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Günlük diyetinde, bal, pekmez ve meyve gibi doğal ürünlerden alınan serbest fruktozun yüksek fruktozlu mısır şurubundan (YFMŞ) alınan fruktoz ile aynı olumsuz metabolik etkiye sahip olmadığı yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Kimyasal olarak aynı yapıya sahip olsalar da YFMŞ'undaki fruktoz ile meyve ve balda doğal olarak bulunan fruktoz aynı değildir (Tappy vd., 2010). Yapılan araştırmalarda enerjinin %13'ünün fruktozla tatlandırılmış içeceklerden veya %50 glukoz + %50 fruktoz ile tatlandırılmış içeceklerden oluşan bir beslenme programını üç hafta boyunca tüketen sağlıklı genç erkeklerde, bel/kalça oranının arttığı gözlenmiştir (Aeberli, vd., 2011).

Agar-agar jelleştirici, yoğunlaştırıcı, süspansiyon haline getirici özellikleriyle reçel, marmelat, krema, jöle yapımında, dondurmacılıkta kristal oluşumunu engelleyici olarak kullanılmaktadır (Soeder, 1976). Tekstür analizi sonuçlarına göre; sığır jelatini ilaveli şekerlemelerin daha sıkı ve sert bir yapıya sahip olduğu, agar ile hazırlanan örneklerin ise elastikiyetinin daha zayıf ve deforme olabilen bir yapı aldığı görülmüştür. (Haug ve Draget, 2009). Ancak agar- agarın jelleştirici ajan olarak kullanılması vejetaryanlar ve müslümanlar gibi spesifik kesimlere de hitap etmesinden dolayı sığır jelatinine önemli bir alternatiftir.

Çalışmamızda organik pekmez (üzüm, dut, keçiyoynuzu) ve bitkisel kökenli bazı kırmızı deniz yosunlarından (Gelidiaceae, Sphaerococcaceae ve Rhodophyceae) elde edilen özüt olan agar-agar kullanılmıştır. Bu bağlamda pekmez jeli şekerleri ticari olarak üretilen şekerlemelerden içerik bakımından daha avantajlıdır ve iyi bir doğal ürün alternatifi olacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla elde edilen pekmez jeli şekerlerinin diğer jeli şeker ürünlerinden ayrı olarak daha sağlıklı bir atıştırılabilir şekerleme kategorisinde değerlendirilebilir. Formülasyonda belirtilen pekmez örneklerinin şeker içeriği ve jelleştirici (agar-agar) çeşidinin jeli şekerde tekstür, aroma salınımı ve duyuşsal algı üzerine farklı etkilerinin olduğu görülmüştür. Üzüm, dut ve keçiyoynuzu pekmez çeşitlerinin ve pekmez içerisine ilave edilen saf suyun (%35) üretimde kullanılması, son ürünün şeker içeriği ve su aktivitesi özelliklerini etkilemiştir. Üzüm, dut ve keçiyoynuzu pekmezli jeli-şekerlerin vitamin ve antioksidan açısından zenginleştirilmesiyle besleyici bir nitelik kazandığı görülmüştür. Yapılan kimyasal analizler (fenolik madde miktarı, DPPH, askorbik asit ve HMF miktarı) ve tekstür analizi sonuçları bakımından keçiyoynuzu jeli şekerine öne çıkmaktadır. Aynı zamanda yapılan duyuşsal analiz sonuçlarına dayanarak ürün albenisinin ve tüketici tercihinin de yüksek olacağı öngörülmektedir. Ancak keçiyoynuzu jeli şekerinin şeker içeriğinin farklı olmasına bağlı olarak üzüm ve dut pekmezi jeli şekerleri kadar tercih edilmemiştir.

Sonuç olarak; bu çalışmada elde edilen veriler, üretilen ürünlerin endüstriyel uygulanabilirliği olduğunu ortaya koymaktadır. Şeker ilave edilmeden üretilen, doğal şeker içeriğine sahip organik pekmezler kullanılarak jeli şeker üretimi üzerine daha fazla araştırma yapılması, geliştirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada; 1139B411900214 numaralı TÜBİTAK 2209-B. Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Aeberli, I., Gerber, P. A., Hochuli, M., Kohler, S., Haile, S. R., GouniBerthold, I. 2011., Low to moderate sugar-sweetened beverage consumption impairs glucose and lipid metabolism and promotes inflammation in healthy young men: a randomized controlled trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 94(2), 479-485.
- Anonim, 2005. *Official Methods of Analysis of AOAC*. Gaithersburg, Md.: AOAC International.
- Anonim, 2021. (Türk Gıda Kodeksi Üzüm Pekmezi Tebliği, Tebliğ no. 2007/27. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/06/20070615-6.htm>. Erişim Tarihi: 20.01.2020.
- Boran, G., 2011. Bir Gıda Katkısı Olarak Jelatin: Yapısı, Özellikleri, Üretimi, Kullanımı ve Kalitesi. *Gıda*, 36, 2: 97-104.
- Çipil, H., Demircioğlu, S., 2016. Demir Eksikliği Anemisi. *Türkiye Klinikleri J Fam Med-Special Topics*. 7. 34-37.
- Demiray, E., Y. Tulek, Y. Yılmaz, 2013. Degradation Kinetics of Lycopene, β -Carotene and Ascorbic Acid in Tomatoes During Hot Air Drying, *LWT- Food Science and Technology*, 50,1: 172-176.
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., Sahin, S., 2010. Rheological Properties of Gluten-Free Bread Formulations, *J. of Food Engineering*, 96, 2: 295-303.
- Dorman, H. J. D., Peltoketo, A., Hiltunen, R. and Tikkanen, M. J., 2003. Characterization of the Antioxidant Properties of De-Odourised Aqueous Extracts from Selected Lamiaceae Herbs. *Food Chemistry*, 83, 255-262.
- Dorn, G.A., Savenkova, T.V., Sidorova, O.S., Golub, O.V., 2015. Confectionery goods for healthy diet. *Foods Rsu aktivitesi Mater*, 3(1): 70-76.
- Doymaz, İ., Özdemir, Ö., 2014. Effect of Air Temperature, Slice Thickness and Pretreatment on Drying and Rehydration of Tomato, *International Journal of Food Science & Technology*, 49, 2: 558-564.
- Godhwani, T., Chhajed, M., Chhajed, A., Tiwari, D., 2012. Formulation Development and Evaluation of Unit Moulded Semisolid Jelly for Oral Administration as a Calcium Supplement, *World Journal of Pharmaceutical Research*, Vol 1: 626-634.
- Güneş, R., Palabıyık, İ., Kurultay, Ş., 2018. Şekerleme Teknolojisinde Fonksiyonel Ürün Üretimi, *Gıda Teknolojisi Dergisi*, 43, 6: 984-1001.
- Haug, I.J., Draget, K.I., 2009. *Handbook of Hydrocolloids* (Second edition, Edited by G.O Phillips and PA Williams), UK. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, No. 173, 948.

- US 5626896 A, 1997. Method for making liquid centered jelly candies, owned by A.E. Staley Manufacturing Co., invented by Carl O. Moore, James R. Dial.
- Uysal Seçkin, G., Taşeri, L. 2015. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 21(9), 414-420, (Pamukkale Gıda Sempozyumu III Özel Sayısı)
- Nunez-Mancilla, Y., A. Vega-Galvez, M. Perez-Won, L. Zura, P. Garcia-Segovia K. Di Scala., 2014. Effect of Osmotic Dehydration under High Hydrostatic Pressure on Microstructure, Functional Properties and Bioactive Compounds of Strsu aktivitesiberry (*Fragaria Vesca*), *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2: 516-524.
- Parnell, W., Wilson, N., Alexander, D., Wohlers, M., Williden, M., Mann, J., Gray, A., 2007. Exploring the Relationship Between Sugars and Obesity, *Public Health Nutr.*, 11: 860-866.
- Soeder, C. J., 1976. Zur verwendung von mikroalgen fur ernahrungszwocke. *Natur- wissenschaften*, (63): 131-138.
- Son Tuncay, Y.S., Bulut, M., 2016. Yaşam Tarzı Olarak Vegan ve Vejetaryenlik, *International Journal of Human Sciences*, 13, 1: 830-843.
- Spanos, G., A.R.E, Wrolstad., 1990. Influence of Processing and Storage on the Phenolic Composition of Thompson Seedless Grape Juice, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38, 7: 1565-1571.
- Şimşek, A., Artık, N. (2002), Değişik meyvelerden üretilen pekmezlerin bileşim unsurları üzerine bir araştırma, *Gıda*, 27(5), 1-11.
- Tappy, L., Le, K.A., Tran, C., Paquot, N., 2010. Fructose and metabolic diseases: New findings, new questions. *Nutrition* 26: 1044-1049.
- Yeşilot, Ş., 2017. Tatlı Tehlike Fruktoz, *Göller Bölgesi Aylık Hakemli Ekonomi ve Kültür Dergisi Ayrıntı*, Cilt 5, Sayı 56.
- Toor, R.K., Savage, G.P., 2006. Effect of Semi-Drying on the Antioxidant Components of Tomatoes, *Food Chemistry*, 94, 1: 90-97.
- Veberic, R.F., Stampar, F., 2005. Quality of Apple Fruits (*Malus domestica*) from Organic Versus Integrated Production, *Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production*, *Frutic*, 5: 12-16.
- Yurdakök, K., İnce, T.O., 2009. Çocuklarda Demir Eksikliği Anemisini Önleme Yaklaşımları, *Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi*, 52: 224-231.
- Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W., 1999. The Determination of Flavonoit Contents in Mulberry and Their Scavenging Effects on Superoxide Radicals, *Food Chemistry*, 64, 4: 555-559.



TAVŞANLI (KÜTAHYA) OVASI YÜZEY SULARININ HİDROJEOKİMYASI VE SU KALİTE İNDEKS (WQI) YÖNTEMİ İLE SU KALİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şehnaz ŞENER^{1*}, Erhan ŞENER²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Uzaktan Algılama Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Hidrojeokimya,
Su Kalitesi,
YüzeY Suyu,
Tavşanlı.*

Öz

Bu çalışmada, Tavşanlı Ovası genelinde yer alan yüzeY sularının hidrojeokimyasal özelliklerini ve su kalitesini belirlemek amacıyla Ekim (2018) döneminde 13 farklı lokasyondan su örnekleri alınmış ve fizikokimyasal parametreler (pH, °C, EC ve TDS) yerinde ölçülmüştür. YüzeY sularının hidrojeokimyasal özelliklerinin tanımlanmasında, öncelikle suların iyon içerikleri ile fizikokimyasal özellikleri incelenmiştir. Bunların yanı sıra suların kökenlerinin belirlenmesi amacı ile Schoeller ve Piper (1944) diyagramları kullanılarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Çalışma alanında yer alan suların içme suyu olarak kullanım özelliklerinin ve kalitesinin değerlendirilmesinde ise ulusal ve uluslararası standartların yanı sıra Su Kalite İndeksi (WQI) yönteminden yararlanılmıştır. Çalışma alanındaki yüzeY suları iyon bollukları ile ilişkili olarak Ca-CO₃ ve Ca-Mg-HCO₃'lü sular fasiyesinde yer almaktadır. Su örneklerinin analiz sonuçları TSE-266 ve WHO (2008) ile belirlenmiş sınır değerler ile kıyaslandığında Sekiören Göletinden alınan örnek hariç diğer tüm su örneklerinin yüksek arsenik konsantrasyonuna (0,0082 - 0,7391 mg/l) sahip olduğu ve bu sebeple içme suyu olarak kullanıma uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlara göre bölgede yüzeYsularının içme suyu olarak kullanılmasının önlenmesi ve alternatif içme suyu kaynaklarının araştırılması gerekmektedir.

HYDROGEOCHEMISTRY OF TAVŞANLI (KÜTAHYA) PLAIN SURFACE WATERS AND EVALUATION OF WATER QUALITY BY WATER QUALITY INDEX (WQI) METHOD

Keywords

*Hydrogeochemistry,
Water Quality,
Surface Water,
Tavşanlı.*

Abstract

In this study, water samples were taken from 13 different locations and physicochemical parameters (pH, °C, EC and TDS) were measured in situ in October (2018) to determine the hydrogeochemical properties and water quality of the surface waters in the Tavşanlı Plain. In describing the hydrogeochemical properties of surface waters, first of all, the ion contents and physicochemical properties of the waters were examined. Also, evaluations were made using Schoeller and Piper (1944) diagrams in order to determine the origins of the waters. In addition to national and international standards, the Water Quality Index (WQI) method was used to evaluate the usage characteristics and quality of the waters in the study area as drinking water. The surface waters in the study area are located in water facies with Ca-CO₃ and Ca-Mg-HCO₃ in relation to their ion abundances. When the analysis results of the water samples were compared with the limit values determined by TSE-266 and WHO (2008), it was concluded that all water samples, except the sample taken from Sekiören Pond, had high arsenic concentration (0,0082 - 0,7391 mg/l) and therefore were not suitable for use as drinking water. According to these results, it is necessary to prevent the use of surface water as drinking water in the region and to investigate alternative drinking water sources.

Alıntı / Cite

Şener, Ş., Şener, E., (2022). Tavşanlı (Kütahya) Ovası YüzeY Sularının Hidrojeokimyası ve Su Kalite İndeksi (WQI) Yöntemi ile Su Kalitesinin Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 380-391.

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| Ş. Şener, 0000-0003-3191-2291 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 31.10.2021 |
| E. Şener, 0000-0001-6263-8366 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 11.12.2021 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 12.12.2021 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Ülkelerin sürdürülebilir kalkınmasını zorlaştıran en önemli engellerden birisi olan çevre kirliliği tüm dünyada doğal kaynakların kalite açısından kirlenmesine ve yok olmasına sebep olmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de su; son derece değerli, ekonomik ve stratejik bir doğal kaynaktır (Gümrükçüoğlu ve Baştürk, 2007). Küresel iklim değişikliğinin de etkileriyle daha da önem kazanan su kaynaklarının korunması öncelikle çevresel kirliliğin önlenmesi ile mümkündür. Az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde evsel atık suların %95'i ve endüstriyel atık suların %70'i arıtmadan alıcı ortamlara deşarj edilmektedir. Ayrıca, madencilik faaliyetlerinin bulunduğu bölgelerde arıtmadan yüzey ve yeraltısularına karışan proses suyu ciddi ve telafisi mümkün olmayan su kirliliğine sebep olmaktadır (Boateng vd., 2016).

Yüzey suları kullanıma kazandırılmaları bakımından tercih edilirken, yeraltısularına göre kirletici faktörlerden daha kolay etkilenmektedir. Bu nedenle de yüzey suyu kalitesi birçok ülkede çok hassas ve kritik bir konudur. Doğal süreçlerin yanı sıra antropojenik etkiler yüzey sularının kalitesini olumsuz etkileyerek içme, sanayi, tarım, rekreasyon ve diğer amaçlar için kullanımlarını sınırlamaktadır (Carpenter vd., 1998; Jarvie vd., 1998; Simeonov vd., 2003; Sánchez vd., 2007; Kazi vd., 2009). Yeraltısu kimyası ve kalite özellikleri ise gözeneklerinde yer aldığı jeolojik birimlerle su-kayaç etkileşimine, ortamın geçirimsizliğine, kalış süresine bağlı olarak değişim göstermektedir (Subramani vd., 2009). Bu şekilde ortaya çıkan jeojenik etkiler ve evsel, tarımsal ve endüstriyel atıkların sebep olduğu antropojenik etkiler hem yeraltısuları hem de yüzey suyu kaynakları için risk faktörleridir. Suyun hidrojeokimyasal özellikleri de suyun evsel, sulama ve endüstriyel amaçlarla kullanımını belirleyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, özellikle tatlı su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir su yönetiminin gerçekleştirilebilmesi için bir su kimyası ve kalitesi izleme programı yürütülmelidir (Pesce ve Wunderlin 2000).

Çalışma alanı olan Tavşanlı Ovası (Kütahya) tarım ve hayvancılığın yoğun olduğu bölgelerden birisidir. Ayrıca, bölgede madencilik faaliyetleri oldukça yaygındır. Ülkemizin en zengin linyit yatakları bu bölgede yer almaktadır. Bununla birlikte, özel kömür ve manezit ocakları işletilmekte ve ekonomik olarak bölgeye katkı sağlanmaktadır. Bu çalışmada, bölgedeki söz konusu çevresel kirleticilerin yüzey suları üzerindeki etkilerini belirlemek ve suların hidrojeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal incelemeler yapılmıştır. Yüzey suyu kaynaklarının kalitesini ortaya koyabilmek için ise ilgili yönetmelikler ile birlikte Su Kalite İndeks (WQI) yönteminden faydalanılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Çalışma alanı olarak seçilen Tavşanlı (Kütahya) ilçesi ve çevresi maden potansiyeli bakımından zengin olması sebebiyle özellikle jeolojik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. İlk olarak 1960'lı yıllarda Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından ayrıntılı incelemeler yapılarak raporlanmıştır. Bunlardan en önemlileri Tavşanlı'nın batı ve kuzeyindeki linyit içeren Neojen sahaları litolojik olarak incelemiş olan Nebert (1960) ile bölgede mostra veren taban metamorfik serilerden güncel sedimanlara kadar tüm litolojik birimleri ayrıntılı incelemiş olan Kalafatçioğlu (1962) ve Akkuş (1962)'dir. Bölgede bulunan barit cevheri Akyol (1975) tarafından incelenmiştir.

Bölgede yapılan ilk hidrojeolojik çalışma DSİ (1978) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Tavşanlı ovasının hidrojeolojik özellikleri ve yeraltısu potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Bölgede bulunan sıcak su kaynakları ise Güneş (2006) tarafından yapılan tez çalışması ile incelenmiştir. Bu çalışmada, Ilıca (31,2°C-77°C) ve Muratdağı (20,3°C-43°C) bölgelerinde önemli sıcaklıklarda termal sular ve bu suların hidrojeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Karakuş (2016) tarafından yapılan tez çalışmasında ise yine Tavşanlı bölgesinin hidrojeolojik özellikleri ve yeraltısu kimyası incelenmiştir.

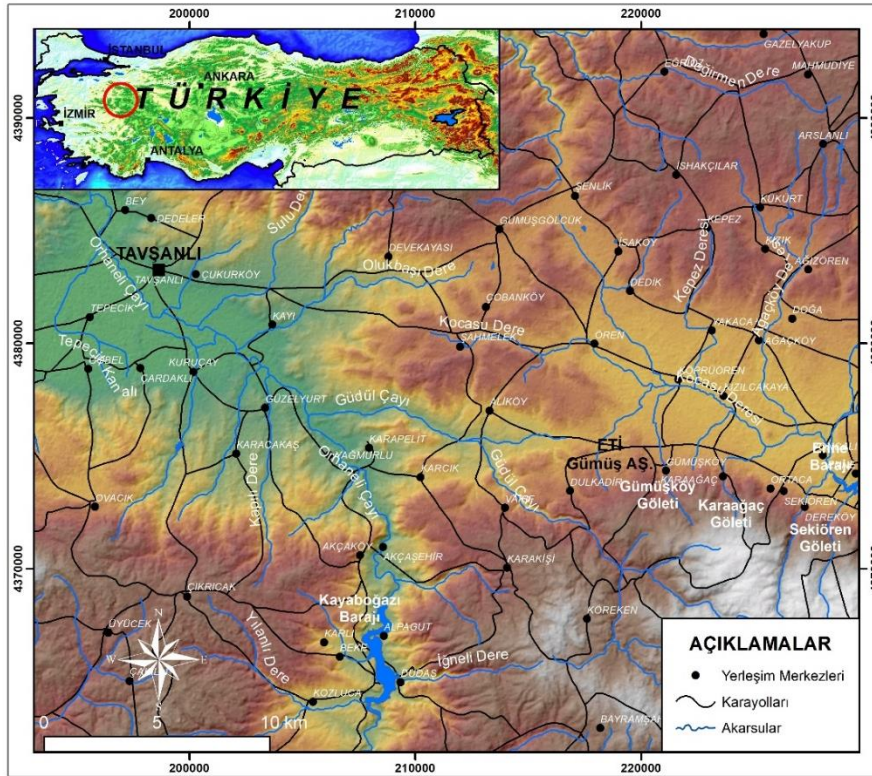
Yapılan literatür araştırmalarına göre Tavşanlı bölgesindeki yüzey sularının kimyasal özellikleri ve özellikle içmesuyu olarak kullanılan baraj gölünün su kalitesini ortaya koyan güncel bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, çalışmada su kalitesi ile ilgili yönetmeliklere ait standartlar ile birlikte indeks yöntemler uygulanarak farklı bir değerlendirmeye ait bulgular da sunulmaktadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (The study area)

Çalışma alanı olarak seçilen Tavşanlı ovasında Tavşanlı ilçesi ve çok sayıda köy yerleşimi bulunmaktadır. Tavşanlı ilçesi ülkemizin İç Ege bölgesinde bulunan Kütahya iline bağlıdır (Şekil 1). Tavşanlı ovasında akış gösteren en önemli yüzeysuyu Orhaneli Çayı'dır. Çay suları Kızıldağ'dan doğarak kuzey yönlü akışını sürdürürken gerek sürekli gerekse mevsimlik akış gösteren birçok yan kolları da yatağına katar. Tavşanlı ovasından geçerken kuzeybatı yönünde akış süren Orhaneli çayı sonrasında Emet çayına karışarak Ulubat Gölü'ne dökülmektedir. Yaklaşık 200 km. akış yoluna sahip olan Orhaneli çayı yöre halkı tarafından sulama suyu ve içme suyu olarak kullanılmaktadır. Bölgedeki asıl içmesuyu kaynağı ise Kayaboğazi baraj gölüdür. Şeki 1'de görüldüğü gibi bu baraj gölü İğneli dere, Yılanlı dere ve Orhaneli çayı ile beslenmekte ve bu şekilde birçok yüzey suyunun kimyasal özelliklerinden etkilenmektedir. Ovanın doğusunda akış süren Gündül Çayı ise bölgedeki az debiye sahip kaynakların beslemesi ile akış sürdüren ve nihayetinde Orhaneli Çayı'na karışan bir deredir (DSİ, 1978).

Tavşanlı ilçesinde ülkemizin İç Ege bölgesinde bulunması sebebiyle karasal iklim ile ılıman iklim özelliklerini birarada göstermektedir. Genelde, kurak ve sıcak yaz ayları, soğuk ve yağışlı kış ayları yaşanmaktadır ve yağışlar boldur. Kütahya iline 51 km uzaklıktaki Tavşanlı ilçesine ulaşım Kütahya-Tavşanlı karayolundan dört mevsim sağlanmaktadır. Tavşanlı ilçesinin ve çevre köylerin başlıca geçim kaynağı maden ocakları, tarım ve hayvancılıktır. 1941 yılında üretime başlayan Garp Linyitleri İşletmesi ve 1956 yılında hizmete açılan termik santral yöre insanının çalıştığı büyük ölçekli işletmelerdir.



Şekil 1. Çalışma alanının yerbulduru haritası (Location map of the study area)

3.2. Çalışma Yöntemleri (Methods)

Çalışma alanındaki suların hidrojeokimyasal özelliklerini şekillendiren jeolojik yapıyı ortaya koyabilmek için bölgenin jeoloji haritası hazırlanmıştır. Ayrıca, litolojik birimler hidrojeolojik özellikleri dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Bölgedeki yüzey sularının hidrojeokimyasal özelliklerini ve su kalitesini belirlemek için Ekim (2018) döneminde 13 adet su örneği alınmıştır. Su örnekleri Kocasu deresi, Sekiören Göleti, Karaağaç Göleti, Gümüşköy Göleti, Gündül Çayı, Kayaboğazi Baraj Gölü, Orhaneli çayı ve Tepecik kanalından alınmış olup örnek lokasyonları Şekil 1'de verilmiştir. Su örneklerinin numune alma ve korunmasında ASTM (2000, 2017, 2019a, 2019b) ve TS-(1997a, 1997b) standartları dikkate alınmıştır. Anyon ve katyon analizleri için her numune lokasyonundan iki farklı su numunesi alınmıştır. Numunelerden birisi katyon analizi için birkaç damla %0,5 nitrik asit (HNO₃) eklenerek asitlenmiştir. pH, sıcaklık (T; °C), elektriksel iletkenlik (EC; µS/cm) ve toplam çözünmüş

katı madde (TDS; mg/L) parametreleri YSI Professional Plus marka çok parametrelilik cihaz ile yerinde tespit edildi. Örneklerin kimyasal analizleri Bureau Veritas Mineral (Kanada) Laboratuvarı ve SDÜ (Isparta) Jeoloji Mühendisliği Bölümü Jeotermal Enerji, Yeraltısu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yüzeysel sularının hidrojeokimyasal özelliklerinin tanımlanmasında, iyon bollukları dikkate alınarak kimyasal özellikleri incelenmiş ve Schoeller ve Piper (1944) diyagramları kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanında yer alan suların içme suyu kullanım özellikleri ve kalite değerlendirilmesinde ise ulusal ve uluslararası standartların yanı sıra Su Kalite İndeksi (WQI) yöntemi uygulanmıştır.

3.2.1. Su Kalite İndeksi (Water Quality Index-WQI)

WQI, farklı su kalitesi parametrelerinin bileşik etkisini yansıtan bir derecelendirme olarak tanımlanmaktadır (Sahu ve Sikdar 2008). İndeks değerleri belirlenirken öncelikle her bir kimyasal parametre için 1'den 5'e kadar ağırlık değerleri belirlenir. Burada içme suyu kalitesini en az etkileyecek parametrelere 1 ağırlık değeri, içme suyu kalitesini en fazla etkileyecek parametrelere 5 ağırlık değeri verilmiştir (Tablo 1). EC, TDS, SO₄, Cl, NO₃, Ni, As, Pb, Cr ve Mn parametreleri içme suyu kullanımında önemli oldukları için en yüksek ağırlık "5" olarak belirlenmiştir. En düşük ağırlık "1" ise su kalitesi değerlendirmesinde en az öneme sahip olduğu için HCO₃ parametresine atanmıştır. Her parametre için bağıl ağırlık değerleri (Wi) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır;

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i$$

Burada, W_i : Göreceli ağırlık, w_i: Parametre ağırlığı, n: parametre sayısını ifade etmektedir.

Tablo 1. Çalışma alanındaki kimyasal parametrelerin ağırlık değerleri (Weight values of chemical parameters in the study area)

| | TS 266 (2005) | WHO (2008) | Ağırlık (wi) | Göreceli Ağırlık(Wi) |
|------------------|---------------|------------|---------------|----------------------|
| pH | 6,5-8,5 | 6,5-9,5 | 4 | 0,0571 |
| EC | 2500 | | 5 | 0,0714 |
| TDS | | 1000 | 5 | 0,0714 |
| Ca | | 200 | 3 | 0,0428 |
| Mg | | 150 | 3 | 0,0428 |
| Na | 200 | 200 | 4 | 0,0571 |
| K | | 12 | 2 | 0,028 |
| HCO ₃ | 500 | | 1 | 0,0142 |
| SO ₄ | 250 | 250 | 5 | 0,0714 |
| Cl | 250 | 250 | 5 | 0,0714 |
| NO ₃ | 50 | | 5 | 0,0714 |
| Ni | 0,02 | | 5 | 0,0714 |
| FeT | | 0,2 | 3 | 0,0428 |
| AsT | 0,01 | 0,01 | 5 | 0,0714 |
| Pb | 0,01 | 0,01 | 5 | 0,0714 |
| Cr | 0,05 | 0,05 | 5 | 0,0714 |
| Mn | 0,05 | 0,05 | 5 | 0,0714 |
| | | | $\sum w_i=70$ | 1 |

Daha sonra her bir parametrenin içme suyu kalite standartları tarafından belirlenen sınır değerleri kullanılarak parametrelerin kalite derecelendirme ölçeği (qi) değerleri hesaplanır (WHO 2008; TSE 266, 2005). Bunun için kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$q_i = (C_i/S_i) \times 100$$

Burada, q_i: kalite derecesi, C_i: her kimyasal parametrenin konsantrasyonu, S_i: Her kimyasal parametre için içme suyu standardını ifade etmektedir. Alt indeks (SI) değerleri, her bir parametrenin göreceli ağırlık değerleri (W_i) ile kalite derecelendirme (q_i) değerlerinin çarpımı sonucunda her parametre için belirlenir. WQI değeri alt indeks değerlerinin toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$WQI = \sum S_i$$

Hesaplanan WQI değerleri Tablo 2’de görüldüğü gibi beş kategoride sınıflandırılır (Sahu ve Sikdar 2008; Yidana ve Yidana 2010).

Tablo 2. İndeks değerlerine göre su tipleri (Water types according to index values) (Sahu ve Sikdar 2008)

| İndeks Aralığı | Su Tipleri (Sahu & Sikdar 2008) |
|----------------|---------------------------------|
| < 50 | Mükemmel Su |
| 50–100,1 | İyi su |
| 100–200,1 | Zayıf Su |
| 200–300,1 | Çok zayıf Su |
| > 300 | İçmesuyu için uygun değil |

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

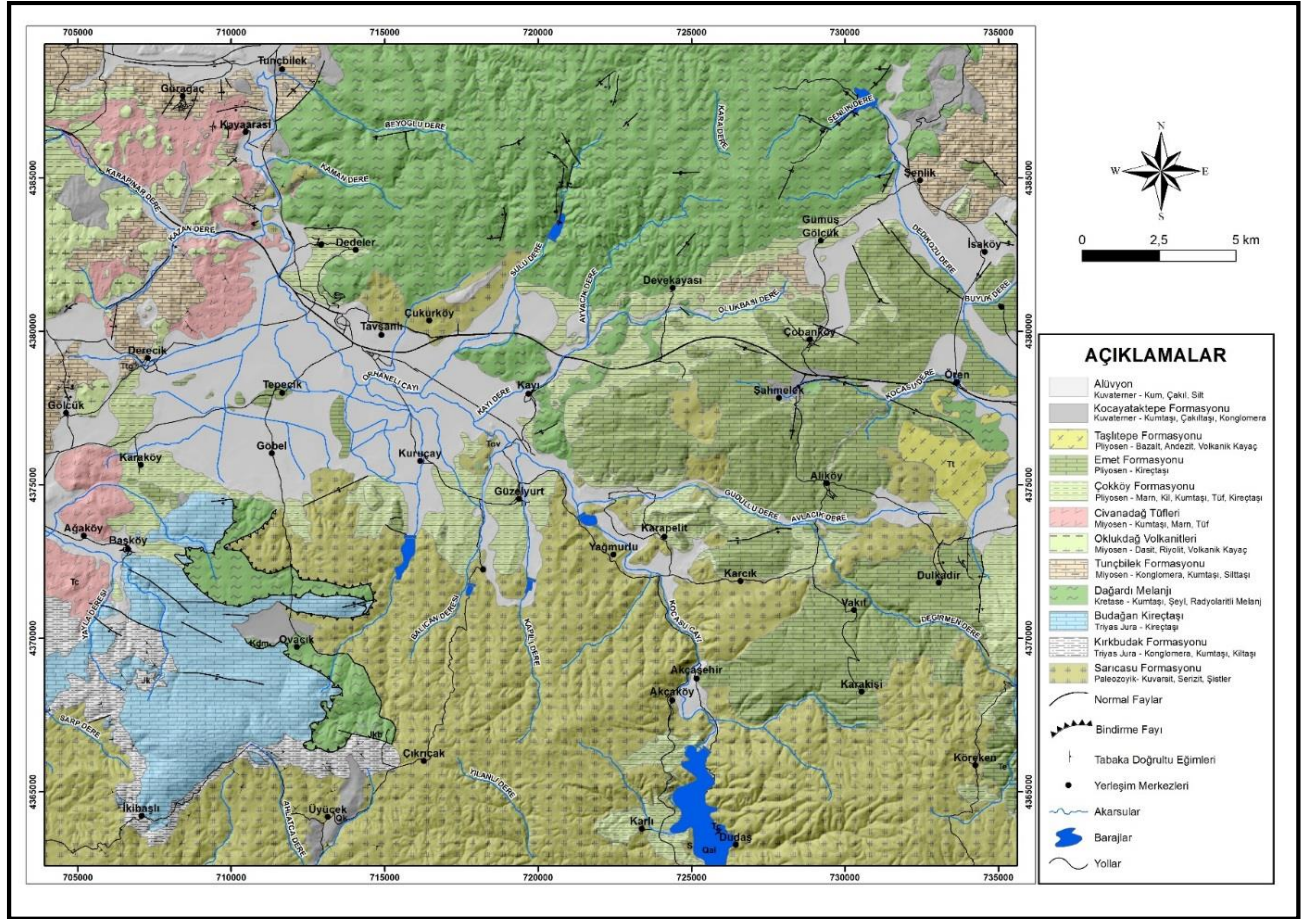
4.1. Jeoloji ve Hidrojeoloji (Geology and Hydrogeology)

Çalışma alanı ve yakın çevresinde mostra vermekte olan litolojik birimler tabandan yüzeye doğru şu şekilde sıralanabilir: Paleozoyik yaşlı Sarıcasu Formasyonu, Mesozoyik yaşlı Kırkbudak Formasyonu, Budağan Kireçtaşları, Dağardı Melanjı, Miyosen yaşlı Tunçbilek Formasyonu, Oklukdağ ve Civanadağı Tüfleri, Pliyosen yaşlı Karaköy Volkanitleri, Çökköy Formasyonu ve Emet Formasyonu, Taşlıtepe Formasyonu, Kuvaterner yaşlı Kocayataktepe Formasyonu, Alüvyon. Şekli 2’de çalışma alanının 1/100 000 ölçek hassasiyetinde jeoloji haritası sunulmuştur. Granat mikaşist, kuvars-şist ve meta-volkanik kayalar gibi metamorfik birimlerden oluşan Paleozoik yaşlı Sarıcasu formasyonu içerisinde beyaz, bej ve yeşil renkli, muskovit-albit-kuvars-şist gözlenmektedir. Trias-Jura yaşlı Kırkbudak formasyonu temel kayaları uyumsuz olarak örter. Başlıca çakıtaşı, kumtaşı, silttaşı ve kiltaşından oluşur (Delibaş vd. 2012). Kırkbudak formasyonu üzerine uyumlu olarak gelen karbonat birimleri Budağan kalkerleri olarak bilinir ve beyaz, gri ve siyah renkli kalker ve dolomitlerden oluşur. Ofiyolitik kompleks, karbonatların tektonik dokanağı olan Dağardı melanjı üzerinde yer alır. Birim başlıca mafik-ultramafikler, yer yer kumtaşı-grovak-şeyl, şistler, radyolarit ve kireçtaşları ile tüfitlerden oluşmaktadır (Akdeniz ve Konak 1979). Miyosen yaşlı Tunçbilek Formasyonu, Dağardı melanjını uyumsuz olarak örter. Formasyon yukarıdan aşağıya doğru silttaşı, kiltası, çamurtaşı, tüfit, karbonat oranı yüksek kiltası, kil, koyu kahverengi linyit, marn ve bitümlü marnlardan oluşmaktadır (Arık 2002).

Tunçbilek formasyonu Oklukdağ volkanitleri ve Civanadağ tüfleri ile derecelendirilir. İnceleme alanının batı kesimlerinde sarımsı, pembe, gri, beyaz renkli Civanadağ tüfleri gözlenmekte olup, riolitik-dasitik kayaç parçalarını içermektedir ve Pre-neojen birimlerine ait konglomeredir (Baş 1987). Birim genel olarak kül ve tüf tane boyutunu oluştururken, yer yer lapilli büyüklüğünde pomza parçaları ve volkanik kaya parçaları gözlenmektedir (Baş 1986). Oklukdağ volkanitleri açık-koyu gri, pembemsi, sarımsı renkli dasit-riyolitik kayalardan oluşur ve birimin ana görünümü kubbe, sahada nadiren dayklardır (Baş 1986). Volkanik birimde biyotit, hornblend, klinopiroksen, nadiren ortopiroksen ve plajiyoklaz, ortoklaz ve kuvars gibi koyu renkli mineraller tanımlanmıştır (Baş 1987). Bu volkanik kayalar üzerinde diskordansla Pliyosen yaşlı Çökköy formasyonu yer alır. Çökköy formasyonu marn, kil, kumtaşı, çakıtaşı, tüf, tüfit ve yer yer kireçtaşı seviyeleri içerir (Arık 2002). Çökköy formasyonu üzerinde kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve Taşlıtepe volkanlarından oluşan Emet formasyonu yer alır. Kireçtaşları beyaz, gri, krem renkli olup, alt kısımlar çok killi, üst kısım silislidir. Geç Pliyosen-Kuvaterner temelli Taşlıtepe formasyonu andezit, bazalt ve volkanitlerden oluşmakta ve yukarıda bahsedilen birimlerin hepsini kesmiştir. Son olarak, Kuvaterner örtü birimleri olarak nitelendirilen Kocayataktepe formasyonu ve alüvyon kendilerinden yaşlı olan tüm birimleri uyumsuzlukla örter (Karakuş 2016; Şener ve Karakuş 2017).

Çalışma alanının hidrojeolojik yapısını ortaya koymak için yukarıda açıklanan her bir litolojik birim bünyelerinde su bulundurulabilme, suyu iletebilme ve istenildiğinde suyu verebilme potansiyelleri göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve beş farklı grup oluşturulmuştur. Bunlar, Akifer-1, Akifer -2, Akifer-3, Akitard ve Akifüj olarak tanımlanmıştır. Bölgedeki en önemli akifer özelliğine sahip formasyonlar alüvyon ve Kocayataktepe Formasyonudur. Bunlar hem gözenekli yapıları hem de geniş yayılımları ile taneli akifer özelliği taşımaktadır. Ovakıdaki en önemli alüvyon kaynağı ise yüksek debisi ve geniş yayılımı ile Orhaneli Çayıdır. Bölgede yüzeyleyen karstik birimler de kırık çatlaklı ve kısmen erime boşluklu yapıları ile su ihtiva etme potansiyeline sahiptir ve bu birimler de Akifer-2 olarak tanımlanmıştır (Karakuş 2016). Bölgede karstik akifer olan birimler ise Budağan Kireçtaşları ve Emet Formasyonu içerisindeki dolomit ve kireçtaşı seviyeleridir. Bölgede tüf seviyelerinden de su

alındığı görülmekte ve bu volkanitlerin de boşluklu yapılarında su bulundurduğu dikkate alınarak Civadağ Tüflerinin Akifer-3 olarak tanımlanması uygun görülmüştür. Dağardı Melanji, Oklukdağ Volkanitleri ve Taşlitepe Formasyonu geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle Akifüj birimleri olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası (Geology map of the study area), (Karakuş, 2016)

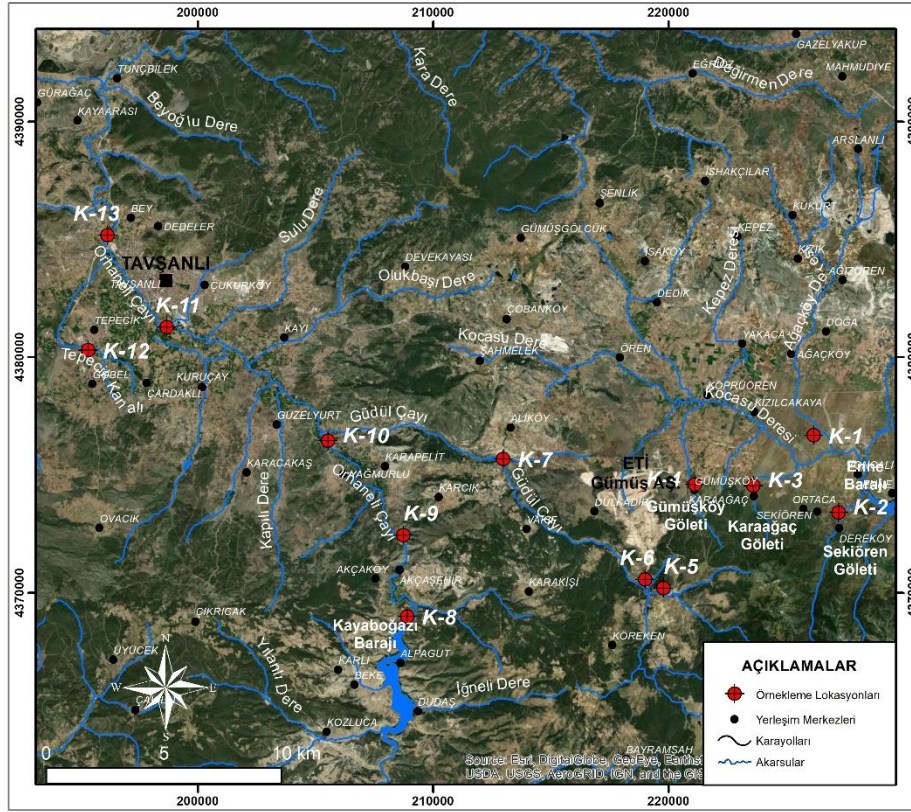
4.2. Hidrojeokimyasal Özellikler (Hydrogeochemical Properties)

Çalışma alanındaki yüzey sularının hidrojeokimyasal özelliklerini ve kalitesini ortaya koymak amacıyla Kocasu deresi, Sekiören Göleti, Karaağaç Göleti, Gümüşköy Göleti, Güdül çayı, Kayaboğazı Gölü, Orhaneli Çayı ve Tepecik-kanal suyundan Ekim (2018) döneminde su örnekleri alınmış ve kimyasal analiz ve ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Örnek lokasyonları Şekil 3'de, örneklerin yerinde ölçüm ve kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 3 ve 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Su örneklerinin yerinde ölçüm sonuçları (In-situ measurement results of water samples)

| İstasyon | No | pH | °C | (µS/cm) |
|-------------------------|-----|-----|-------|---------|
| Yoncalı / Kocasu deresi | K1 | 8 | 21,20 | 817 |
| Sekiören Göleti | K2 | 8,2 | 10,80 | 371 |
| Karaağaç Göleti | K3 | 8,2 | 10,70 | 309 |
| Gümüşköy Göleti | K4 | 8,2 | 10,70 | 441 |
| Güdül Çayı 1 | K5 | 8,3 | 11,20 | 503 |
| Güdül Çayı 2 | K6 | 8,1 | 10,80 | 533 |
| Güdül Çayı 3 | K7 | 8,3 | 11,20 | 434 |
| Kayaboğazı Gölü | K8 | 8,1 | 12,00 | 429 |
| Orhaneli Çayı 1 | K9 | 8,3 | 12,70 | 431 |
| Orhaneli Çayı 2 | K10 | 8,3 | 12,60 | 456 |
| Orhaneli Çayı 3 | K11 | 8,1 | 13,10 | 461 |
| Tepecik / Kanal suyu | K12 | 7,7 | 13,10 | 654 |

| | | | | |
|-----------------|-----|-----|-------|-----|
| Orhaneli Çayı 4 | K13 | 7,6 | 12,90 | 535 |
|-----------------|-----|-----|-------|-----|



Şekil 3. Su örnekleri lokasyon haritası (Location map of the water samples)

Tablo 4. Su örneklerine ait analiz sonuçları (Analysis results of water samples)

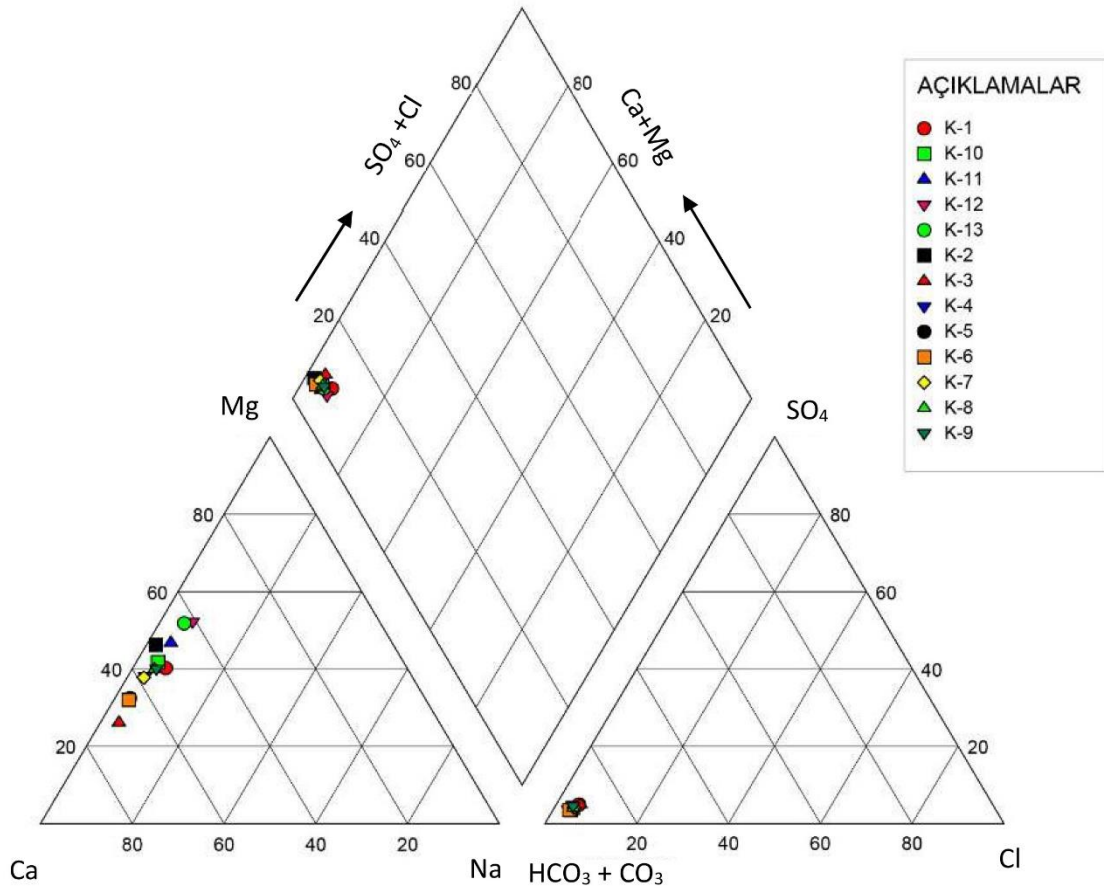
| Parametre | Birim | Örnek sayısı | Minimum | Maksimum | Ortalama | Standart Sapma | TS266 (2005) mg/l | WHO (2008) mg/l |
|------------------|-----------------------------|--------------|---------|----------|----------|----------------|-------------------|-----------------|
| pH | | 13 | 7,6 | 8,3 | 8,10 | 0,22532 | 6,5-9,5 | 6,5-8,5 |
| EC | ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 13 | 309 | 817 | 490 | 128,946 | | |
| TDS | (mg/l) | 13 | 185 | 473 | 291 | 72,9584 | | 1000 |
| Na | (mg/l) | 13 | 2,22 | 16,6 | 6,5 | 3,95 | 200 | 200 |
| K | (mg/l) | 13 | 1 | 5,21 | 2,67 | 1,28 | | |
| Ca | (mg/l) | 13 | 47,54 | 104,74 | 63,58 | 15,41 | | 200 |
| Mg | (mg/l) | 13 | 11,54 | 49,69 | 29,33 | 10,92 | | |
| HCO ₃ | (mg/l) | 13 | 0 | 26 | 11,53 | 7,88 | | |
| CO ₃ | (mg/l) | | 161 | 328 | 224,30 | 47,50 | | |
| Cl | (mg/l) | 13 | 8,52 | 21,3 | 12,18 | 3,43 | 250 | 250 |
| SO ₄ | (mg/l) | 13 | 11,64 | 28,52 | 15,90 | 4,19 | 250 | 250 |
| NO ₃ | (mg/l) | 13 | 0,01 | 13,36 | 2,9 | 3,57 | 50 | 50 |
| Mn | (mg/l) | 13 | 0,00037 | 0,11881 | 0,0236 | 0,0363 | 0,05 | 0,4 |
| Pb | (mg/l) | 13 | 0,0001 | 0,0009 | 0,000292 | 0,00026 | 0,01 | 0,01 |
| As | (mg/l) | 13 | 0,0082 | 0,7391 | 0,1555 | 0,2394 | 0,01 | 0,01 |
| Fe | (mg/l) | 13 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,000 | 0,2 | - |
| Cr | (mg/l) | 13 | 0,0005 | 0,0182 | 0,0022 | 0,00483 | 0,05 | 0,05 |
| Ni | (mg/l) | 13 | 0,0002 | 0,0037 | 0,0008 | 0,001 | 0,02 | 0,07 |

Çalışma kapsamında incelenen yüzey sularının yerinde ölçümler ile belirlenen hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH), özgül elektriksel iletkenlik (EC), Toplam çözünmüş madde (TDS) gibi genel kimyasal özellikleri incelendiğinde su örneklerin pH değerlerinin 7'den büyük olup (7,6 – 8,3 arasında) "Bazik karakterli" sular sınıfını işaret ettiği görülmektedir. Su örneklerinin EC değerleri 309–817 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. Toplam çözünmüş madde değerleri ise 185,4 ile 472,72 mg/l arasında değişmektedir.

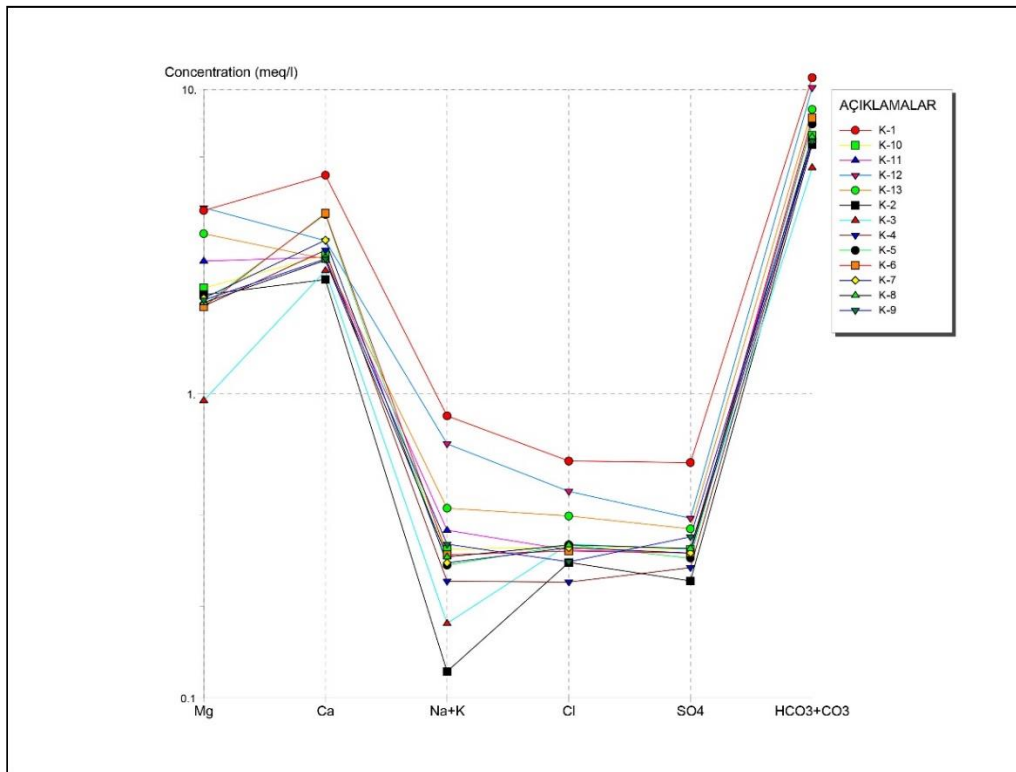
En yüksek EC değeri Yoncalı / Kocasu deresinde ölçülmüş olup özellikle CO_3 bakımından en zengin örnektir. Su örneklerinin Na konsantrasyon değerleri 2,22 ile 16,60 mg/l arasında, Ca konsantrasyon değerleri ise 47,54 ile 104,74 mg/l arasında değişmekte olup yine en yüksek Na ve Ca konsantrasyon değerleri Yoncalı / Kocasu deresinden alınan örnekte tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen yüzey sularının Cl konsantrasyon değerleri 8,52 ile 21,30 mg/l arasında, SO_4 konsantrasyon değerleri ise 11,64 ile 28,52 mg/l arasında değişmektedir. Cl ve SO_4 konsantrasyon değerleri Sekiören Göleti'nden alınan su örneğinde minimum seviyede iken, Yoncalı / Kocasu deresinden ve Tepecik Kanal suyundan alınan örneklerde ise maksimum değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Örneklerin NO_3 konsantrasyon değerleri 0,01 ile 13,36 mg/l arasındadır ve en yüksek nitrat Tepecik Kanal suyunda ölçülmüştür. Ağır metaller açısından örneklerin Mn, Pb, As, Fe, Cr ve Ni içerikleri belirlenmiştir. Su örneklerinin Mn konsantrasyon değerleri 0.00037 ile 0.11881 mg/l arasında; Pb konsantrasyon değerleri 0.0001 ile 0.0009 mg/l arasında; Fe konsantrasyon değerleri en yüksek 0.01 mg/l; Cr konsantrasyon değerleri 0.0005 ile 0.0182 mg/l arasında; Ni konsantrasyon değerleri ise 0.0002 ile 0.0037 mg/l arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre örneklerde arsenik (As) miktarları 0.0082 ile 0.7391 mg/l arasında olup içme suyu limit değerlerine göre (0.01 mg/l) oldukça yüksek değerlerde ölçülmüştür.

Ağır metaller sucul ekosistemlerde genellikle düşük konsantrasyonda bulunmaktadır. Ancak, kentsel ve endüstriyel atık su, madencilik faaliyetleri, fosil yakıtlar, işleme ve imalat endüstrileri ve atık bertarafı gibi antropojenik kaynaklar sulara ağır metal konsantrasyonunu artırabilmektedir (Sprenke vd., 2000, Sarı 2008). Bölgedeki su örneklerinde Mn, Pb, Fe, Cr ve Ni konsantrasyonları oldukça düşük değerlerde ölçülmüştür. Ancak, özellikle Güdül Çayı'ndan alınan su örnekleri oldukça yüksek miktarlarda (> 0.60 mg/l) As içermektedir. Diğer yüzey suyu örneklerinin arsenik konsantrasyonları ise daha düşüktür (< 0.07 mg/l). Bu sonuçlar, Güdül Çayı'na kıyasla bölgedeki diğer yüzey sularının madencilik faaliyetlerinden çok fazla etkilenmediğini göstermektedir. Bu durumda As konsantrasyonu esas olarak jeojenik kökenli olup sulardaki yüksek arsenik düzeylerinin başlıca jeojenik kaynakları sülfat mineralleri, volkanik kayalar, hidrotermal faaliyetler ve özellikle fosil yakıtlardır (Welch vd., 2000). Doğan ve Doğan (2007)'e göre, batı Türkiye'nin bazı bölgelerindeki genel jeojenik arsenik kaynağı, evaporitik mineraller, karbonat, volkanik kayalar ve kömürden kaynaklanmaktadır. Çalışma alanında, Civanadağ tüflerinin riyodasitik ve riyolitik tüflerinde esas olarak damarlar ve kısmen de yayılma ve yarıkların dolguları şeklinde As-Sb-Pb-Zn cevherleşmeleri gelişmiştir (Arık, 2012). Cu-Pb-Zn, Mn ve kömür üreten madenler Tavşanlı bölgesinde en önemli madencilik faaliyetini oluşturmaktadır. Mesozoyik ve Senozoyik karbonat akiferi içerisindeki kırık ve çatlaklar ise realgar ve orpiment şeklinde ikincil epitermal jips içerir. Bu damarlar silisleşmiş-riyolitik tüflerde yüksek konsantrasyonda arsenik içermektedir (Arslan ve Çelik 2015; Şener ve Karakuş, 2017). Şener ve Karakuş (2017) tarafından yapılan çalışmada da bölgedeki yüzey suları yeraltısularına göre daha yüksek miktarlarda arsenik içermektedir. Bu durum sularda gözlenen arsenik kaynağının kayaç-su etkileşimi ile birlikte bölgede yürütülen madencilik faaliyetleri ile ilişkili olarak antropojenik kaynaklı da olduğunu göstermektedir.

İncelenen su örneklerinin iyon analiz sonuçları (% - mek/l) Piper Diyagramı üzerine yerleştirilmiş ve örneklerin hidrojeokimyasal fasiyesleri ortaya konulmuştur (Piper 1944; Şekil 4). Buna göre su örneklerinin tamamının Ca-CO_3 ve Ca-Mg-HCO_3 'lü sular fasiyesinde olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, yüzey suyunda major anyon bolluk oranları sırasıyla $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ şeklindedir. Yüzey suyu örneklerinde katyonların sırası ise $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ şeklindedir. Schoeller (1955)'in karbonat-bikarbonat miktarına göre yapmış olduğu sınıflamadan farklı olarak geliştirdiği yarı logaritmik diyagram ile farklı kimyasal özelliğe sahip suların daha kolay ayırt edilmesi sağlanmıştır. Çalışma alanındaki yüzey sularının analiz sonuçları kullanılarak hazırlanmış olan Schoeller yarı logaritmik diyagram ise Şekil 5'de verilmiştir. Buna göre sulara bulunan baskın iyonların Ca, Mg ve CO_3 , HCO_3 olduğu görülmektedir. Genel olarak su kalitesi ve kimyasal özellikleri, akifer kayalarının özelliklerine ve antropojenik girdilere bağlıdır. İncelenen su örneklerinin kimyasal özellikleri çalışma alanında yer alan kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomit birimleri ile kayaç-su etkileşimine bağlı olarak gelişmektedir. Ca^{2+} ve Mg^{2+} içeriğindeki artış genellikle kireçtaşı ve dolomit ile temasa bağlıdır (Ranjan vd., 2013). Yüksek Na^+ ve SO_4^{2-} iyonları, silikatların kimyasal ayrışmasından kaynaklanmaktadır (He ve Wu, 2019). Farklı su türlerinin gözlemlenmesi, yeraltı suyunun antropojenik kirleticiler ve/veya litolojik birimlerle etkileşim süresi ve bunların maruz kalma dereceleriyle ilgili olabilir (Zhang vd., 2008; Adimalla 2019).



Şekil 4. Piper diyagramı (Piper diagram)



Şekil 5. Su örneklerinin Schoeller yarı logaritmik diyagramı ile sınıflaması (Classification of water samples with Schoeller semi-logarithmic diagram)

Bu nedenle içme suyu, sulama, sanayi vb. farklı alanlarda kullanılabilirliğini belirlemek için hidrojeokimyasal özellikler ve su kalitesi bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Adimalla 2019). Çalışma alanında yaygın olarak karbonatlı kayaçların bulunması ve bu su kaynaklarının gerek yeraltında gerekse yüzeysel akışta sürekli bu kayaçlar ile etkileşimde olması bölgedeki genel su hidrojeokimyasının ve baskın su tiplerinin oluşumuna ana sebeptir.

4.2.1. Suların içme suyu olarak kullanılabilirliği (Availability of water as drinking water)

İçme suyu olarak kullanılacak sulara aranması gereken, diğer bir deyişle standardı sağlaması gereken birçok fiziksel ve kimyasal parametre belirlenmiştir. Bu sınır değerler belirlenirken özellikle insan sağlığı için ihtiyaç duyulan mineral ve iyonlar ve bunların günlük alım dozları dikkate alınmaktadır. Bunun yanısıra sağlığa zararlı olacak her türlü spesifik kirleticileri ve ağır metalleri belirli konsantrasyonların üzerinde içermemelidir. Aksi durumda kirlenmiş suların insanlar tarafından tüketilmesi ciddi sağlık problemlerini beraberinde getirecektir (Şener, 2010). Bu kapsamda, içme suyu kriterleri ve her bir kriterin limit değerlerini bildiren ulusal ve uluslararası birçok standart hazırlanmıştır. "Türk Standartlar Enstitüsü (TSE-266)" tarafından 2005 yılı Nisan ayında yayınlanmış olan içme suyu standardı ülkemizde geçerli olan değerlendirme rehberidir. Uluslararası içme suyu standartları olarak ise Dünya Sağlık Örgütüne (WHO, 2008), ait standartlar bulunmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen su örneklerine ait analiz sonuçları TSE-266 ve WHO (2008) tarafından belirtilen limit değerler ile kıyaslanmıştır (Tablo 2). Yapılan değerlendirmeye göre yüzey sularına ait su örneklerinden Sekiören Göleti'nden alınan K2 numaralı örnek içme suyu olarak kullanıma uygundur. Ancak, bunun dışındaki tüm su örneklerinin arsenik konsantrasyonları 10 µg/l'nin üzerinde olup içme suyu olarak kullanılması uygun değildir. Özellikle K5, K6 ve K7 numaralı su örnekleri çok yüksek miktarlarda As içermektedir.

4.2.2. Suların Kalite Özelliklerinin Değerlendirilmesi (WQI - Evaluation of Quality Characteristics of Waters)

Çalışma alanındaki suların kalitesini belirlemek için Su Kalite İndeksi yönteminden yararlanılmıştır. Su Kalitesi İndeksi (WQI), su kalitesini değerlendirmek için dikkate alınan her bir parametrenin kişisel tüketime bağlı olarak genel su kimyası ile ilişkili genel etkisini derecelendirerek tanımlayan bir uygulama yöntemidir. Bu çalışmada, su örneklerine ait WQI değerleri önceki bölümlerde açıklandığı gibi üç adımda hesaplanmış ve sonuçlar WHO (2008) ve TSE 266 (2005) ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Su kalitesi değerlendirmesinde kullanılan parametreler ve bu parametreler için atanan ağırlık değerleri yine "Materyal ve Metot" başlığı altında verilmiştir. Tablo 4'de her bir örneğin içme suyu limit değerleri ve göreceli ağırlık değerleri kullanılarak hesaplanan "Su Kalite İndeksi" değerleri verilmiştir.

Tablo 4. Su örneklerinin indeks değerleri (Index values of water samples)

| İstasyon | No | İndeks Değeri |
|-------------------------|-----|---------------|
| Yoncalı / Kocası deresi | K1 | 61,83 |
| Sekiören Göleti | K2 | 20,17 |
| Karaağaç Göleti | K3 | 41,28 |
| Gümüşköy Göleti | K4 | 28,66 |
| Güdüllü Çayı 1 | K5 | 455,92 |
| Güdüllü Çayı 2 | K6 | 224,46 |
| Güdüllü Çayı 3 | K7 | 541,92 |
| Kayaboğazı Gölü | K8 | 35,48 |
| Orhaneli Çayı 1 | K9 | 40,73 |
| Orhaneli Çayı 2 | K10 | 54,66 |
| Orhaneli Çayı 3 | K11 | 66,45 |
| Tepecik / Kanal suyu | K12 | 40,16 |
| Orhaneli Çayı 4 | K13 | 70,07 |

WQI, çalışılan suyun kalitesinin farklı sınıflara ayrılarak değerlendirilmesini sağlayan bir derecelendirme tekniğidir (Reza ve Singh 2010). Buna göre K5 ve K7 numaralı örneklerin içme suyu için uygun olmadığı, K6

numaralı örneğin ise çok zayıf su sınıfında olduğu belirlenmiştir. K1, K10, K11 ve K13 numaralı örnekler iyi su sınıfında, diğer örnekler ise mükemmel su sınıfında yer almaktadır.

Yapılan çalışma ile benzer şekilde farklı bölgelerde yapılan indeks yöntemlerle su kalitesi değerlendirmelerinde ulusal ve uluslararası standartlar ve sınır değerler dikkate alınmaktadır (Saeedi vd. 2009; Bordalo vd. 2006; Tsegaye vd. 2006; Sheikhi vd. 2020). İran'ın Hashtroud kırsalındaki içme suyu kalitesi Sheikhi vd., (2021) tarafından araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada TDS, SO₄, Cl, NO₃, NO₂, Na, K, sertlik ve pH gibi parametreler kullanılarak GWQI (yeraltı suyu kalite indeksi) hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Kumar vd., (2015), NO₃, TDS, pH, EC, SO₄, HCO₃, Cl, Ca, Na, K ve Mg gibi birkaç temel parametreye dayalı olarak doğal ve antropojenik aktivitelerin etkisini değerlendirmek için su kalite indeksi değeri hesaplamışlardır. Brindha vd., (2020) tarafından WQI yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, pH, TDS, ana katyonlar ve anyonlar, nitrat, florür, eser metaller ve koliform parametreleri dikkate alınmıştır. Benzer ana parametreler değerlendirilerek yapılan su kalitesi çalışmalarında aynı akiferdeki suların farklı su kalitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Akşehir ve çevresinde yeraltı suları içme amaçlı kullanıldığı için Varol (2021) tarafından sağlık risk değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlara göre, yeraltı sularındaki arsenik seviyeleri hem yetişkinler hem de çocuklar için kabul edilemez kanserojen ve kanserojen olmayan sağlık riski oluşturmaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada Tavşanlı (Kütahya) ovası içerisinde jeoloji, hidroloji, hidrojeoloji ve hidrojeokimyasal incelemeler yapılarak çalışma alanındaki kirletici kaynakların ova içerisindeki yüzey suları üzerindeki etkileri belirlenmiş ve su kaynaklarının kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışma alanı içerisindeki en önemli su noktası Orhaneli Çayı'dır. Sulama amacı ile inşa edilmiş olan Kayaboğazı Barajı ise çalışma alanındaki önemli su yapısıdır. Ekim (2018) döneminde alınan 13 adet su örneği üzerinde yapılan incelemeler sonucunda suların hidrojeokimyasal özellikleri ve su kalitesi ortaya konulmuştur.

Çalışma alanındaki yüzey sularının hidrojeokimyasal özellikleri incelendiğinde suların genel olarak Ca-CO₃ ve Ca-Mg-HCO₃'lü sular fasiyesinde olduğu görülmektedir. Çalışma alanındaki su kaynakları genel olarak kireçtaşı ve dolomit gibi kalkerli kayalar ile etkileşim halindedir ve baskın su tiplerinin söz konusu kayac-su etkileşimi sonucunda geliştiği görülmektedir. Su örneklerine ait analiz sonuçları TSE-266 ve WHO (2008) tarafından belirtilen limit değerler ile karşılaştırıldığında Sekiören Göletinden alınan K2 numaralı örneğin tüm parametreler açısından içme suyu olarak kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir. Diğer tüm su örneklerinin arsenik konsantrasyonları 10 µg/l'nin üzerinde olup içme suyu olarak kullanılması uygun değildir. Bölgede yüzey sularının kalitesini tehdit eden en önemli faktör madencilik faaliyetleri sırasında oluşan atık suların kontrolsüz bir şekilde çevreye bırakılmasıdır. Gözeçukuru madeni (As-Sb-Pb-Zn madeni), Tavşanlı ovasının doğusunda yer almakta olup maden atık havuzlarının yanından Güdül Deresi akmaktadır. Bu atık havuzlarındaki maden atıkları genel olarak arsenik, kurşun ve antimondur ve bölgede özellikle yüzey suları için ana kirlilik kaynağıdır.

Çalışma alanındaki suların kalitesini belirlemek için Su Kalite İndeksi yöntemi kullanılarak suların "Su Kalite İndeksi" değerleri hesaplanmıştır. Buna göre K5 ve K7 numaralı örneklerin İçme suyu için uygun olmadığı, K6 numaralı örneğin ise çok zayıf su sınıfında olduğu belirlenmiştir. K1, K10, K11 ve K13 numaralı örnekler iyi su sınıfında, diğer örnekler ise mükemmel su sınıfında yer almaktadır. Ancak, limit değerlere göre yüksek miktarlarda arsenik içermekte olan su örneklerinin WQI yöntemine göre iyi - mükemmel su sınıfında yer alması bu yöntemin özellikle içme suyu kullanılacak örneklerin değerlendirmesinde çok sağlıklı olmadığını göstermektedir. Çalışma sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, özellikle içme suyu kalitesi değerlendirilirken indeks değerlerin yanı sıra mutlaka limit değerler ile karşılaştırmaların yapılması gerekmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 4141-YL1-14 numaralı (Proje ID: 3966) münferit araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, çalışmayı finansal olarak destekleyen SDÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Akkuş, M.F., 1962. Kütahya-Gediz arasındaki sahanın jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 58, 21 – 30.
- Arık, F. 2002. Geochemical modelling of Gümüşköy (Kütahya) silver deposit, Ph.D. Thesis, Selcuk University, Konya, Turkey
- Arık, F. 2012. Genetic Characteristics of the Gozecukuru As-Sb Deposits near Kutahya, Turkey, Journal of the Geological Society of India 80(6): 855-868
- Arslan Ş, Çelik M. 2015. Assessment of the Pollutants in Soils and Surface Waters Around Gümüşköy Silver Mine (Kütahya, Turkey). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 95(4), 499-506
- Boateng, T. K., Opoku, F., Acquaaah, S. O., Akoto, O. 2016. Groundwater quality assessment using statistical approach and water quality index in Ejisu-Juaben Municipality, Ghana. Environmental Earth Sciences, 75(6), 1-14.
- Carpenter, S. R.; Caraco, N. F.; Correll, D. L.; Howarth, R. W.; Sharpley, A. N.; Smith, V. H. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecol Appl.,8,559-568.
- Dogan M, Dogan A.U. 2007. Arsenic mineralization, source, distribution, and abundance in the Kütahya region of the Western Anatolia, Turkey. Environmental Geochemical Health, 29:119-129.
- DSİ, 1978. Tavşanlı Ovası Hidrojeolojik Etüd Raporu, Devlet Su İşleri Devlet Su Gen. Müd. Jeotek. Hiz. ve Yeral. Su. Dai. Bşk., 107 s.
- Güneş, C., 2006. Gediz Kaplıcaları'nın (KÜTAHYA) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Değerlendirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 170 s.
- Jarvie, H. P.; Whitton, B. A.; Neal, C. 1998. Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: speciation, sources and biological significance. Sci. Total Environ.,210/211, 79-109.
- Kalafatçoğlu, A., 1962, Tavşanlı – Dağardı Arasındaki bölgenin jeolojisi ve serpantin ve kalkerlerin yaşı hakkında not; Maden Tetkik ve Arama Enst. Derg., 58, 76 - 89.
- Karakuş, M. 2016. Tavşanlı (Kütahya) çevresinin hidrojeolojik-hidrojeokimyasal özelliklerinin incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Tez No:442726
- Kazi, T.; Arain, M. B.; Jamali, M. K.; Jalbani, N.; Afridi, H. I.; Sarfraz, R. A.; Baig, J. A.; Shah, A. Q. 2009. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. Ecotox EnvironSafe.,72,301- 309.
- Nebert, K., 1960, Tavşanlı'nın batı ve kuzeyinde linyit ihtiva eden Neojen sahasının mukayeseli stratigrafisi ve tektoniği; Maden Tetkik ve Arama Enst. Derg., 54, 7 - 35.
- Pesce, S. F.; Wunderlin, D. A. 2000. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba city (Argentina) on Suquia river. Water Res.,34(11), 2915-2926.
- Piper, A.M., 1944. A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses, American Geophysical Union Transactions 25, 914-923.
- Sahu, P., Sikdar, P.K., 2008. Hydrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata wetlands, West Bengal, India. Environ Geol. 55, 823-835.
- Sánchez, E.; Colmenarejo, M. F.; Vicente, J.; Rubio, A.; García, M. G.; Travieso, L.; Borja, R. 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of basins pollution. Ecol Indic.,7, 315-328.
- Sarı ,E. 2008. Sources and Distribution of heavy metals in river sediments from the southern drainage basin of the sea of Marmara, Turkey. Fresenius Environmental Bulletin, 17:2007-2019.
- Schoeller, H., 1955. GechemieDesEauxSouterranes. ReviewInstutieFranc. Petrole, Paris, 3-4.
- Simeonov, V.; Stratis, J. A.; Samara, C.; Zachariadis, G.; Voutsas, D.; Anthemidis, A.; Sofoniou, M.; Kouimtzi, T. 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece. Water Res.,37, 4119-4124.
- Subramani, T.; Rajmohan, N.; Elango, L. 2009. Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. Environ Monit Assess.,162(1-4), 123-137.
- Sprenke, K.F., Rember, W.C., Bender, S.F., Hoffmann, M.L., Rabbi, F., Chamberlain, V.E. 2000. Toxic metal contamination in the lateral lakes of the Coeur d'Alene River valley, Idaho. Environmental Geology, 39(6): 575-586.
- Şener, Ş., Karakuş, M. 2017. Investigating water quality and arsenic contamination in drinking water resources in the Tavşanlı District (Kütahya, Western Turkey). Environmental Earth Sciences, 76(21), 1-17.
- Şener, Ş., 2010. Eğirdir Göl Suyu ve Dip Sedimanlarının Hidrojeokimyasal İncelemesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği ABD, Kasım, 2010.
- TS-266, 2005. Sular - İnsani tüketim amaçlı sular, TS-266, Türk Standartları Enstitüsü, 25 s, Ankara.
- Welch, A.H., Westjohn, D.B., Helsel, D.R., Wanty, R.B. 2000. Arsenic in ground water of the United States: occurrence and geochemistry. Ground Water 38(4):589-604
- WHO 2008. World Health Organisation Guidelines for Drinking-water Quality, Third Edition Incorporating The First and Second Addenda, WHO Publication, Geneva, 668 p. 2008.
- Yidana, S.M., Yidana, A., 2010. Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. Environ Earth Sci. 59, 1461-1573.



YÜKSEK HIZ VE BASINÇ ŞARTLARINDA ÇALIŞAN YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETERETERKETON TERMOPLASTİK POLİMERİNİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Hüseyin ÜNAL^{1*}, Salih Hakan YETGİN²

^{1*}Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Peek,
Aşınma,
Sürtünme,
Basınç,
Kayma Hızı.

Öz

Bu deneysel çalışmada, yüksek performanslı mühendislik plastikleri arasında yer alan poli-eter-eter-keton (PEEK) polimerinin AISI304 paslanmaz çelik diske karşı kuru kayma şartları altındaki tribolojik performansları incelenmiştir. Aşınma deneyleri, 1.77, 3.54, 5.30 ve 8.84MPa gibi yüksek basınçlarda, 0.5, 1.0, 2.0 ve 4.0m/s gibi yüksek kayma hızlarında pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre, artan kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri artmıştır. Düşük yük ve kayma hızlarında düşük P.V değerleri elde edilirken artan yük ve kayma hızı ile birlikte P.V faktörünün arttığı belirlenmiştir. Genel olarak deneylerde kullanılan basınç ve kayma hızı aralıklarında sürtünme katsayısının 0.17 ile 0.39 aralığında elde edilirken, aşınma oranının ise 5.2×10^{-15} ile 21.4×10^{-15} m²/N arasında değiştiği tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan PEEK malzemenin yüksek P.V değerlerinde abrazyif aşınma mekanizması gözlenirken düşük P.V değerlerinde adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

EVALUATION OF FRICTION AND WEAR BEHAVIORS OF HIGH PERFORMANCE POLYETHERETHERKETONE THERMOPLASTIC POLYMER UNDER HIGH PRESSURE AND SLIDING SPEED CONDITIONS

Keywords

Peek,
Wear,
Friction,
Pressure,
Sliding Speed.

Abstract

This experimental study examines the tribological performance of poly-ether-ether-ketone (PEEK) polymer, which is one of the high performance engineering plastics, against AISI 304 stainless steel disc under dry sliding conditions. Tribological tests were carried out on a pin-on-disc wear test machine under high applied pressures of 1.77, 3.54, 5.30 and 8.84MPa and at high sliding speeds of 0.5, 1.0, 2.0 and 4.0m/s. According to the wear test results, the friction coefficient and wear rate values increased with the increase in sliding speed values. While low P.V values were obtained at low load and sliding speeds, it was determined that the P.V factor increased with increasing load and sliding speed. In general, in the pressure and sliding speed ranges used in the experiments, the friction coefficient was obtained between 0.17 and 0.39, while the wear rate varied between 5.2×10^{-15} and 21.4×10^{-15} m²/N. While abrasive wear mechanism observed in PEEK polymer at high P.V values, adhesive wear mechanism observed at low P.V values.

Alıntı / Cite

Ünal, H., Yetgin, S. H., (2022). Yüksek Hız ve Basınç Şartlarında Çalışan Yüksek Performanslı Polietereterketon Termoplastik Polimerinin Aşınma ve Sürtünme Davranışlarının Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 392-401.

* İlgili yazar / Corresponding author: unal@subu.edu.tr, +90-264-616-0282

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| H. Ünal, 0000-0003-0521-6647 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 13.12.2020 |
| S. H. Yetgin, 0000-0002-6068-9204 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 29.09.2021 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 26.10.2021 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Polimer malzemeler, metal, seramik, cam ve demir dışı malzemeler gibi geleneksel malzemelerle kıyaslandığında mikroyapıları ve performans/yoğunluk oranının yüksek olması sebebiyle özellikle havacılık, uzay, otomotiv, makine, gıda ve petrol endüstrisi gibi alanlarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Soncu ve Akkoyun, 2020; Kumar vd., 2018). Polietereeterketon (PEEK) polimeri, yüksek mekanik performans ve elastiklik modülü, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek tokluk, kimyasal direnç, aşınma direnci, yanmayı geciktiricilik, boyutsal kararlılık ve kolay işlenebilirlik gibi özellikleri ile yüksek performanslı yarı-kristal yapılu bir polimer çeşididir (Placette vd., 2020). Ayrıca, PEEK polimeri 220°C sıcaklığın üzerinde uzun süre çalışırken yüksek aşınma direnci özelliğini koruyabilmektedir. PEEK polimeri, hafiflik ve daha yüksek aşınma performansından dolayı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde metalik malzemelerin yerine tercih edilmektedir (Zalaznik vd., 2016).

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Polietereeterketon (PEEK) polimeri, tribolojik uygulamalar için oldukça fazla tercih edilen yüksek performanslı mühendislik polimerlerinden birisidir (Juanjuan vd., 2020a). Pahalı bir polimer türü olmasına rağmen zorlu çalışma koşullarında yüksek tokluk ve mukavemet özellikleri ile triboloji alanında kullanılan diğer polimerlere göre öne çıkmaktadır. Saf PEEK polimerinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır (Marcela vd., 2016; Zsidaı ve Kataı, 2016; Schroeder vd., 2013; Avanzini vd., 2013). Genel olarak literatürde yapılan çalışmalarda, tribolojik deneylerin farklı ortam şartlarında ve düşük yük ve kayma hızlarında gerçekleştirildiği gözlenmiştir (Laux ve Schwartz, 2013; Juanjuan vd., 2020a; Felipe vd., 2015; Schroeder vd., 2013). Marcela ve arkadaşları (2016) PEEK polimeri ile çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimerlerinin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada PEEK polimerinin sürtünme katsayısının ÇYMAPE polimerine göre 3 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Felipe ve arkadaşları (2015) sıcaklık ve çalışma ortamının PEEK kompozitin tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, artan sıcaklığa bağlı olarak aşınma oranı değerlerinin artarken sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Geraldine ve Thomas (2016) PEEK esaslı polimer malzemelerin çelik diske karşı hava, vakum ve hidrojen ortamlarındaki aşınma performanslarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PEEK polimerinin tribolojik özelliklerinin ortam şartlarına bağlı olarak önemli oranda değiştiğini belirtmişlerdir. Vakum altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde gazın çalışma ortamına salınması ile polimerin zayıfladığı ve bunun sonucu olarak ise yüksek aşınma oranının elde edildiği raporlanmıştır. Geraldine ve Thomas (2021) yaptıkları başka bir çalışmada ise poliimit (PI), PEEK ve Politetrafloretillen (PTFE) polimerlerinin sertleştirilmiş 52100 martenzitik yatak çeliği ve 304 östenitik paslanmaz çelik disklerine karşı tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PI ve PEEK malzemelerinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin karşı disk malzemesine bağlı olduğu belirtilmiştir. PI polimerinin hidrojen ortamında 52100 diske karşı en iyi tribolojik özellikleri gösterdiği, PEEK polimerinin ise özellikle yüksek hızlarda 304 östenitik paslanmaz çelik diske karşı aşınma özelliklerinin geliştiği belirtilmiştir. Rodriguez ve arkadaşları (2016a) katkısız PEEK ve katı yağlayıcı katkılı PEEK polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerine kayma hızı ve temas basıncının etkisini incelemişlerdir. Aşınma ve sürtünme deneylerini 20 ve 50mm/s kayma hızlarında ve 4, 8 ve 10MPa temas basınçları altında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada basınç ve hızın artması ile sürtünme ısısının arttığı ve bunun sonucu olarak polimer malzemelerin sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, PEEK polimerine ilave edilen %10 Politetrafloretillen (PTFE) ve %10 grafit katkılarının da aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı belirtilmiştir. Qiufeng ve arkadaşları (2018) nano ve mikro-boyutlu karbon fiber (KF) ve PTFE katkılı PEEK kompozitlerin özelliklerini inceledikleri çalışmada mikro-boyutlu karbon fiberin nano-boyutlu olandan daha iyi tribolojik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Kabul edilebilir sürtünme katsayısı ve aşınma oranı için %4 nano-KF, %20mikro-KF, %2 nano-PTFE ve %10mikro-PTFE katkılı PEEK kompozitlerin uygun olduğu belirtilmiştir. Abrasif ve adhesif aşınmanın temas yüzeylerinde aşınma kalıntıları oluşturduğu ve transfer film tabakasının oluşumunda önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Regis ve arkadaşları (2018) ise katkısız PEEK polimeri ile %30 karbon fiber katkılı PEEK kompozitlerinin kuru ve bovine serum şartları altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Sulu ortam şartları altında aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Juanjuan ve arkadaşları (2020a) katkısız PEEK polimeri ile %10 karbon fiber ve %10 grafit/%10 PTFE katkılı PEEK kompozitlerin kuru ortam şartlarındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyleri 50-200N yük aralığında ve 5-40mm/s kayma hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, artan kayma hızı ile PEEK polimerinin sürtünme katsayısı değerleri değişmezken uygulanan yük ile birlikte katkısız PEEK ve %10 karbon fiber katkılı PEEK kompozitin sürtünme katsayısı değerleri artmıştır. PEEK polimerine ilave edilen katı yağlayıcıların sürtünme katsayısı üzerine

etkisinin olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Tatsumi ve arkadaşları (2019) ise çelik diske karşı PEEK polimerinin hem kuru hem de poli- α -olefin (PAO) ortamındaki sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Çelik disk yüzeyinde oluşan PEEK transfer film tabakası kalınlığına bağlı olarak hem kuru hem de PAO ortamında tribolojik özelliklerin değiştiği belirtilmiştir. Kurdi ve arkadaşları (2018) sulu ortam şartları altında PEEK/çelik temasının sürtünmeyi azalttığı fakat kuru ortam şartlarına göre aşınmayı artırdığı belirtilmiştir. Sulu ortam şartları altında karşı disk üzerinde PEEK transfer film tabakasının oluşmadığı sulu ortamda kararlı transfer film tabakasının oluşumunun engellendiği belirtilmiştir. Laux ve arkadaşları (2016) ise PEEK polimerinin sürtünme katsayısının artan yük ile birlikte azaldığını, kayma hızının artması ile arttığını belirtmişlerdir. Literatürde PEEK polimeri üzerine yapılan triboloji çalışmalarında, yüksek basınç ve kayma hızlarında yapılan çalışmaya az rastlanmıştır. Bu sebeple, bu çalışma pahalı olmasına rağmen endüstriyel olarak yüksek performans istenen triboloji alanlarına (rulmanlı yataklar, burçlar vb. gibi) ışık tutması ve geleneksel polimer malzemeler olan poliamit, poliasetal, kestamit ve çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen gibi aşınma dirençli polimer malzemelere alternatif olması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, yüksek basınç ve yüksek kayma hızlarında PEEK polimerinin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri pim-disk aşınma test sistemi kullanılarak kuru ortam şartları altında AISI 304 paslanmaz çelik diske karşı 0.5, 1.0, 2.0 ve 4.0m/s kayma hızları ile 1.77, 3.54, 5.30 ve 8.84MPa basınç altında yapılmıştır. Çalışmada uygulanan basıncın, kayma hızının ve her ikisinin (P.V faktör) aşınma oranı ve sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Buna ilaveten optik mikroskop kullanılarak aşınma mekanizması belirlenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Malzemeler (Materials)

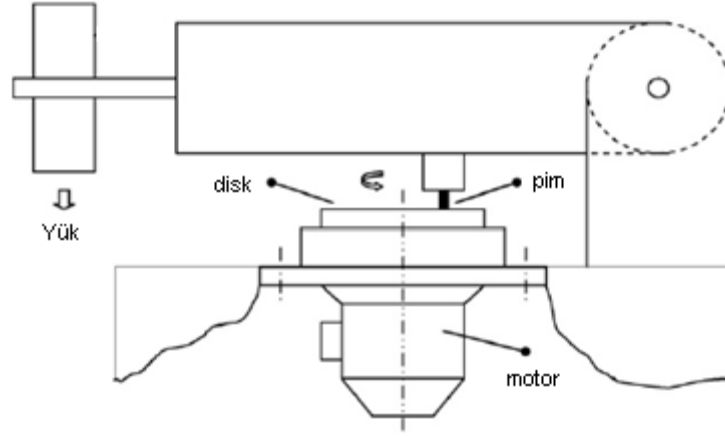
Aşınma deneylerinde kullanılan poli-eter-eter-keton polimeri, Ketron 1000 ticari koduyla ekstrüzyonla çubuk formunda üretilmiş olup 10mm çapında ve 1000mm uzunluğunda elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan PEEK polimerinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneyde kullanılan PEEK polimerinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri (Physical, mechanical and thermal properties of PEEK polymer used in the experiment)

| Malzeme | Birim | ISO standartları | PEEK |
|---|---|------------------|------------|
| Yoğunluk | g/cm ³ | ISO 1183-1 | 1.31 |
| Su emme (23 °C) | % | | 0.20 |
| Çekme mukavemeti | MPa | ISO 527 | 115 |
| Çekmedeki elastiklik modülü | MPa | ISO 527 | 4300 |
| Kopmadaki uzama | % | ISO 527 | 17 |
| Sertlik | Rockwell M | ISO 2039-2 | 105 |
| Ergime sıcaklığı | °C | ISO 11357-1/-3 | 340 |
| Camsı geçiş sıcaklığı, | °C | ISO 11357-1/-2 | 150 |
| Isıl sapma sıcaklığı (1.8MPa) | °C | ISO 75-1/-2 | 160 |
| Maksimum çalışma sıcaklığı; - Kısa süreli, - Uzun süreli (Min. 20.000 saat) | °C | | 310 250 |
| Üretici firma/Ürün ticari kodu | Quadrand Engineering Polymers/ Ketron 1000 PEEK | | |

3.2. Aşınma Testleri (Wear tests)

Aşınma testleri, kuru ortam şartlarında, oda sıcaklığında ve Şekil 1'de şematik resmi verilen pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10x1000mm boyutlarında çubuk formunda temin edilen PEEK polimerini tribolojik deneylerde pim numunesi olarak kullanabilmek için revolver tornada 6mm çapında ve 50mm uzunluğunda olacak şekilde hassas olarak üretilmiştir. AISI 304 paslanmaz çelik disk malzeme ise 90mm çapında ve 5mm kalınlığında olacak şekilde geleneksel tornada tornalanmış sonrasında ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Çelik diskin yüzey pürüzlülüğü ortalama 0.36-0.44 μ m aralığında ölçülmüştür. Her aşınma testi öncesi disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 1. Aşınma test cihazının şematik gösterimi (Schematic figure of the wear machine)

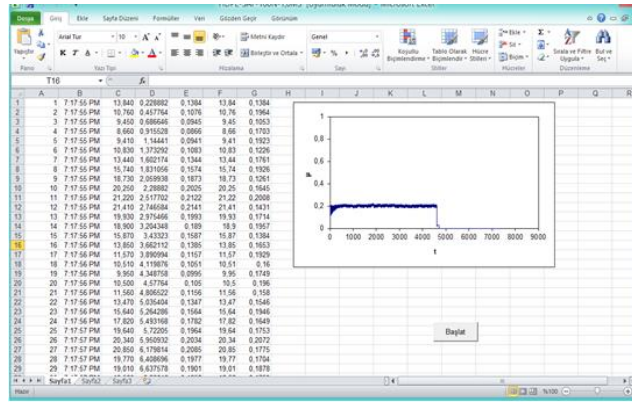
Tablo 2’de çalışmada kullanılan malzemeler için aşınma test parametreleri verilmiştir. Her aşınma testi öncesi numune pim ağırlığı (m_1) ve aşınma testi sonrası pim ağırlığı (m_2) ölçülmüş ve ağırlık kaybı Δm yani ($m_1 - m_2$) tespit edilmiştir. Aşınma oranları (K_o) ise Eşitlik (1)’de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde, L ; kayma mesafesi (m), ρ ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve F ; uygulanan yük (N)’tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (1)$$

Tablo 2. Aşınma testi parametreleri (Wear test parameters)

| Malzeme | Test Sıcaklığı (°C) | Kayma mesafesi (m) | Nem (%) | Uygulanan basınç (MPa) | Kayma hızı (m/) |
|---------|------------------------|-----------------------|------------|---------------------------|--------------------|
| PEEK | 23±1 | 2000 | 55±3 | 1.77 | 0.5 |
| | | | | 3.54 | 1.0 |
| | | | | 5.30 | 2.0 |
| | | | | 8.84 | 4.0 |

Deney numunelerinin sürtünme katsayısı ölçümleri disk üzerinde pim olacak şekilde dizayn edilmiş aşınma deney düzeneğinde ölçülmüştür. Cihazın ana gövdesi üzerine monte edilmiş elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi ve verilerin gönderildiği bilgisayar kısımlardan meydana gelmiştir. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk aşınma cihazına bağlı olan 2kW gücünde bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerine deneyde kullanılan paslanmaz çelik disk malzeme bir vida yardımıyla bağlanır. Deneylerde kullanılacak PEEK pim numunesi 6mm çapında olup aşınma düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırıldıktan sonra kola bağlanan PEEK polimer pim numunesi diskin üzerine yavaşça bırakılır. Pim numunesinin hareket halindeki diske temas etmesi sonucu oluşan sürtünmeyle birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu harekete yanal kuvvet olarak adlandırılır. Bu yanal kuvvet aşınma cihazına bağlı olan bir yük hücresi ile ölçülüp bilgisayara aktarılarak excell programında kaydedilir. Aşınma cihazı, aşınma yapılacak olan deneyler için dakikada 1000 veri alınabilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi boyunca yanal yükü ölçen yaklaşık 65.000 veri elde edilmiştir. Bu yanal yük verileri Excel programında bir sütuna kaydedilmiş sonrasında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Excell programında sürtünme katsayısı-zaman ilişkisi grafikleri Şekil 2’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. Aşınma deneyinde excell formatında elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafiği (Friction coefficient-sliding time graph obtained in excell format in the wear test)

Deneylerde kullanılan PEEK polimer pim malzemesi ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı (μ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. Formülde μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini (N) ve F_n ise normal kuvveti (N) göstermektedir.

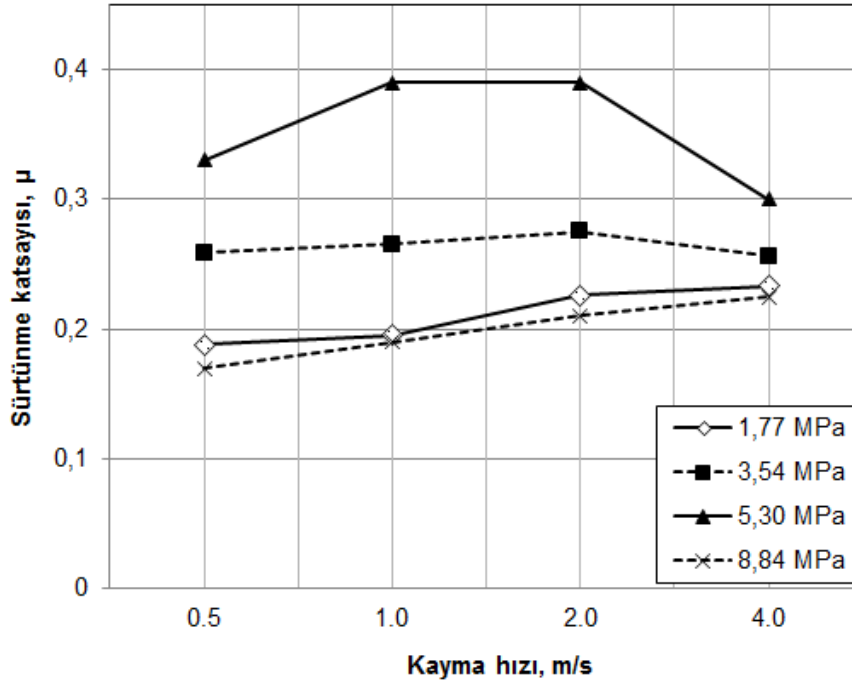
$$\mu: F_s / F_n \quad (2)$$

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Tablo 3'te PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 3'te ise PEEK polimerinin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 2.0m/s kayma hızına kadar uygulanan basınç altında sürtünme katsayısı artarken 4.0m/s kayma hızında 3.54 ve 5.30MPa basınç altında sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir. 1.77MPa basınç altında elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin, 3.54MPa ve 8.84MPa basınç altında elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, PEEK polimeri ile çelik disk arasındaki temas sıcaklığının PEEK polimerinin camısı geçiş sıcaklığından (143°C) düşük olması, PEEK polimerinin yumuşamayıp rijit kalması ve plastik deformasyonun oluşmaması ile açıklanabilir. Artan kayma hızı ve basınç ile birlikte PEEK polimeri ve çelik disk arasındaki temas sıcaklığının artması ile pim malzeme elastik hale gelmekte ve çelik disk üzerinde ince bir film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağlamaktadır. Zsidi ve arkadaşları (2016) yaptığı çalışmada da uygulanan yükün 11.5N'dan 23N'a artırılması ile sürtünme katsayısının azaldığını belirtmiştir. Laux ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada da uygulanan basıncın artması ile sürtünme katsayısının azaldığı fakat kayma hızının artması ile de sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Düşük kayma hızlarında, pim ile disk arasındaki sürtünme ısısının önemli olmadığı ancak artan kayma hızı ve yüzey pürüzlülüklerinin plastik deformasyonu oluşturduğu belirlenmiştir. Oluşan plastik deformasyon sonucu polimer ile disk arasındaki temas alanının değişerek kısmı temas yerine tam temasın meydana gelmesi neticesinde sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir. Rodriguez ve arkadaşları (2016b) uygulanan basıncın 4MPa'dan 8MPa'a artırılması ile dinamik sürtünme katsayısının 0.44'den 0.49'a arttığını, ancak basıncın 10MPa'a artırılması ile de sürtünme katsayısının 0.43 değerine düştüğünü belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3. PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri. (Friction coefficient values of PEEK polymer depending on the applied pressure and sliding speed.)

| Malzeme | Basınç, MPa | Kayma hızı, m/s | | | |
|---------------------------|-------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 4.0 |
| Sürtünme katsayısı, μ | | | | | |
| PEEK | 1.77 | 0.188 | 0.195 | 0.226 | 0.233 |
| | 3.54 | 0.259 | 0.265 | 0.275 | 0.256 |
| | 5.30 | 0.330 | 0.390 | 0.390 | 0.300 |
| | 8.84 | 0.170 | 0.190 | 0.210 | 0.225 |

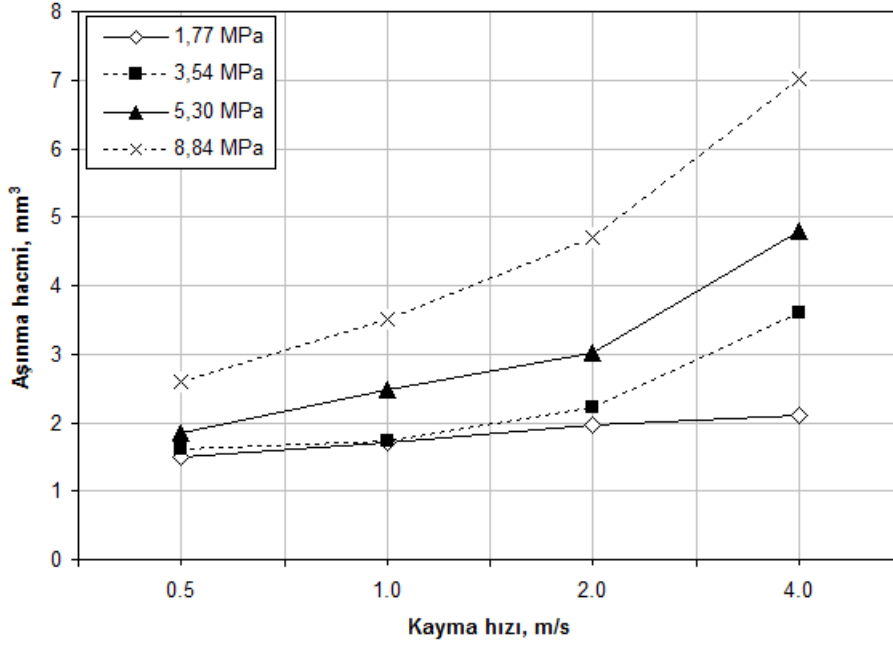


Şekil 3. Kuru kayma şartları altında PEEK polimerinin farklı hızlardaki sürtünme katsayısının değişimi (The variation of coefficient of friction values of the PEEK polymer at different sliding speeds and under dry sliding conditions)

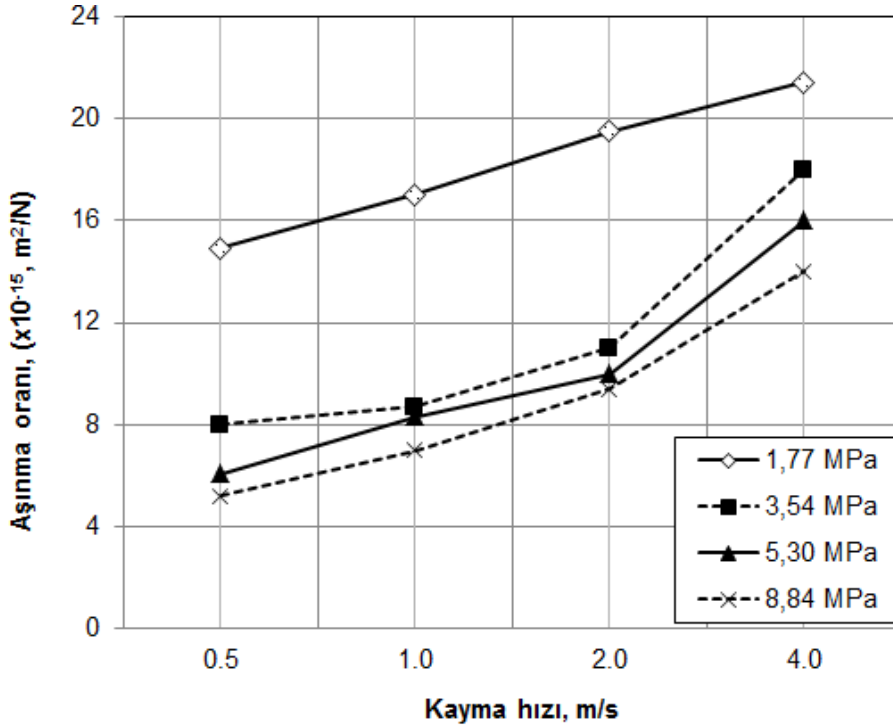
Tablo 4. PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı değerleri. (Wear rate values of the PEEK polymer depending on the applied pressure and sliding speed.)

| Malzeme | Basınç, MPa | Kayma hızı, m/s | | | |
|---------|-------------|---|-----|------|------|
| | | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 4.0 |
| | | Aşınma oranı, ($\times 10^{-15}$, m^2/N) | | | |
| PEEK | 1.77 | 14.9 | 17 | 19.5 | 21.4 |
| | 3.54 | 8.0 | 8.7 | 11.0 | 18.0 |
| | 5.30 | 6.1 | 8.3 | 10.0 | 16.0 |
| | 8.84 | 5.2 | 7.0 | 9.4 | 14.0 |

Tablo 4'te PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı değerleri verilirken, Şekil 4'te ise farklı basınçlar altındaki PEEK polimerinin kayma hızına bağlı olarak aşınma hacmi grafiği verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, artan kayma hızı ve uygulanan basınçla birlikte aşınma hacminin arttığı belirlenmiştir. Zsidai ve arkadaşları (2016) da yaptıkları çalışmada artan basınç ile birlikte PEEK polimerinin yapışma aşınma mekanizmasının azalarak aşınmanın arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 4. Kuru kayma şartları altında PEEK polimerinin farklı hızlardaki aşınma hacmi ilişkisi (The relationship between wear volume and sliding speed of PEEK polymer under dry sliding conditions)



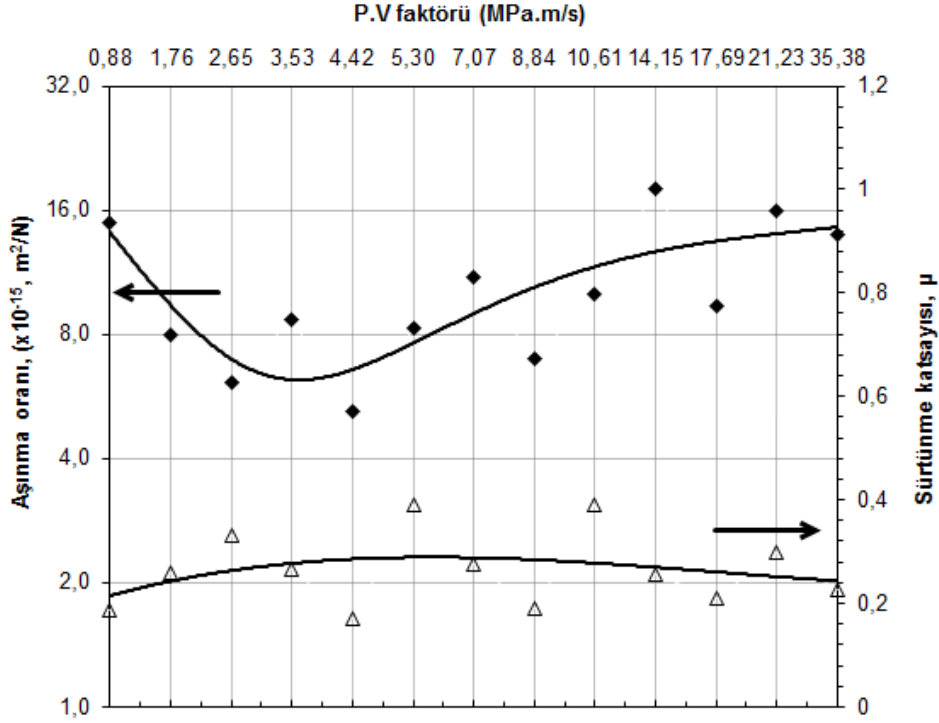
Şekil 5. Kuru kayma şartları altında PEEK polimerinin farklı hızlardaki aşınma oranı ilişkisi (The relationship between wear rate and sliding speed values of PEEK polymer under dry sliding conditions)

Şekil 5'te ise deneylerde kullanılan kayma hızları aralığında uygulanan basınca bağlı olarak aşınma oranı değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde, genel olarak kayma hızının 0.5m/s'den 4.0m/s'ye artırılması ile aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. 1.77MPa basınç altında aşınma oranındaki artış %43.6 oranında elde edilmiştir. 3.54, 5.30 ve 8.84MPa basınç altında 2.0m/s kayma hızına kadar lineer bir artış gözlenirken 4.0m/s kayma hızında aşınma oranında belirgin bir artış tespit edilmiştir. Aşınma oranındaki ortalama artış 3.54, 5.30 ve 8.84MPa basınçlar için sırasıyla %125, %162 ve %169 olarak elde edilmiştir. Uygulanan basıncın etkisi incelendiğinde ise uygulanan basıncın artması ile aşınma oranı azalmıştır. 4.0m/s sabit kayma hızında, uygulanan basıncın etkisi incelendiğinde ise artan basınca bağlı olarak aşınma oranları yaklaşık olarak %18.8, %33.7 ve %52.8 oranlarında azalmıştır. Bu sonuç, uygulanan basıncın artması ile birlikte PEEK polimerinin aşınma oranı değerlerinin azaldığını göstermektedir. Juanjuan ve arkadaşları (2020b) yaptıkları çalışmada, düşük yükler altında düşük aşınma oranı, yüksek yüklerde ise yüksek aşınma oranı değerleri elde etmişlerdir. Çalışmalarında uygulanan kayma hızı ve

uygulanan basınç değerleri arasında aşınma oranını etkileyen en önemli parametrenin kayma hızı olduğunu belirtmişlerdir.

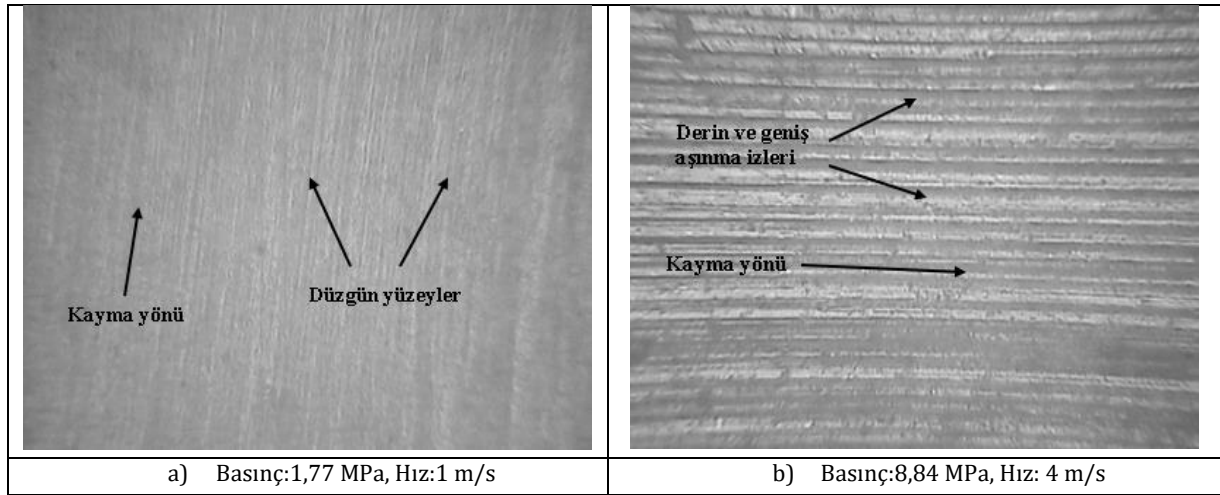
Şekil 6'da PEEK polimerinin uygulanan yük ve kayma hızının etkisini gösteren P.V faktörüne bağlı olarak aşınma oranı ve sürtünme katsayısının değişimi gösterilmiştir. P.V faktörü, Eşitlik (3)'te verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$P.V \text{ faktörü} = \frac{\text{yük} * \text{kayma hızı}}{\text{pim alanı}} \quad (3)$$



Şekil 6. PEEK polimerinin P.V faktörüne bağlı olarak aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değişimi (Wear rate and friction coefficient variation depending on the P.V factor of the PEEK polymer)

Şekilde görüldüğü gibi sürtünme katsayısı uygulanan basınç ve kayma hızından fazla etkilenmezken aşınma oranında belirgin bir etkilenme gözlenmiştir. Düşük yüklerde ve kayma hızlarında düşük P.V değerleri elde edilirken artan yük ve kayma hızı değerlerinde ise P.V faktörünün arttığı belirlenmiştir. Genel olarak deneylerde kullanılan basınç ve kayma hızı aralıklarında sürtünme katsayısının 0.17 ile 0.39 arasında değiştiği, aşınma oranının ise 5.2×10^{-15} ve 21.4×10^{-15} m²/N arasında değiştiği belirlenmiştir. Düşük basınç ve düşük kayma hızlarında yapışma aşınma mekanizması oluşurken artan basınç ve kayma hızlarında ise abrazif aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Bu durum Şekil 7'de PEEK polimerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntülerinde de görülmektedir. 1.0m/s kayma hızı ve 1.77MPa basınç altındaki pim yüzeyinin daha düzgün olduğu gözlenirken (bakınız Şekil 7a) 4.0m/s kayma hızı ve 8.84MPa basınç altında pim yüzeyinde pulluk sistemine benzer bir şekilde geniş ve derin oyukların olduğu (bakınız Şekil 7b) belirlenmiştir. Genel olarak kabul edilen sürtünme modellerine göre, polimer ile çelik disk arasındaki sürtünme kuvveti iki mekanizma ile açıklanabilir. Bunlardan ilki temas bölgesindeki yapışma, ikincisi ise polimerin deformasyonudur. Bu iki mekanizmanın oluşması tribolojik deneylerde uygulanan yük ve kayma hızının etkileri yanında polimerin kimyasal, mekanik ve geometrik etkilerine de bağlıdır (Zsidai vd., 2016). Bilindiği gibi, sürtünme süresince, aşınma sonucu polimer matristen kopan parçacıklar karşı disk yüzeyinde transfer film tabakasının oluşmasına sebep olmaktadır. Deney başlangıcında oluşacak ince bir transfer film tabakasının aşınma oranının azalmasına sebep olacağı belirtilirken artan transfer film tabakası ile oluşan kalın ve süreksiz transfer film tabakasının ise aşınma oranını artıracakı belirtilmiştir (Friedrich vd, 2005).



Şekil 7. PEEK polimerinin optik mikroskop görüntüleri (Optical microscope images of PEEK polymer)
a) Basınç:1,77 MPa, Hız:1 m/s, b) Basınç:8,84 MPa, Hız: 4 m/s

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

PEEK polimerinin farklı kayma hızları ve basınçlar altında yapılan kuru kayma şartları yapılan aşınma deneyleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Deneylerdeki kayma hızının 0.5m/s den 4.0m/s'ye artırılması ile deneylerde kullanılan farklı basınçlar altında PEEK polimerinin sürtünme katsayısı 1.77MPa ve 8.84MPa basınçlar altında sürekli artış gösterirken 3.54 ve 5.3MPa basınçlarda 2m/s kayma hızına kadar artış göstermiş ancak bu hız değerinden sonra azalmıştır.
- Tribolojik deneyler sonucunda 0.5m/s den 4.0m/s kayma hızı ve 1.77MPa ve 8.84MPa basınç aralığında PEEK polimerinin sürtünme katsayısı 0.17 ile 0.39 aralığında elde edilmiştir.
- Tribolojik deneylerdeki kayma hızının 0.5m/s den 4.0m/s kayma hızına artırılması ile deneylerde kullanılan farklı basınçlar altında PEEK polimerinin aşınma oranı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artış, 1.77MPa basınç altında yaklaşık olarak % 43 oranında ilen 8.84MPa basınç altında %169 oranında olmuştur.
- Tribolojik deneyler sonucunda 0.5m/s den 4.0m/s kayma hızı ve 1.77MPa ve 8.84MPa basınç aralığında PEEK polimerinin aşınma oranı 5.2×10^{-15} ile $21.4 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ aralığında elde edilmiştir.
- P.V faktörde 4.42MPa.m/s değeri PEEK malzemenin aşınma oranı ve sürtünme katsayısında kritik önem oluşturmuştur. Aşınma oranı bu değere kadar azalma gösterirken bu değerin üstünde ise artış göstermiştir. Ancak sürtünme katsayısı ise aşınma oranının tersine 4.42MPa.m/s değerine kadar artış göstermiş bu değerden sonra ise azalma göstermiştir.
- Yüksek basınç ve yüksek kayma hızı şartları altında PEEK polimeri abrazif aşınma mekanizması gösterirken, düşük kayma hızı ve düşük basınçlarda yapışma aşınma mekanizması gözlenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Avanzini, A., Donzellan, G., Mazzu, A., Petrogalli, C., 2013. Wear and Rolling contact fatigue of PEEK and PEEK composites. Tribology International, 57, 22–30.
- Felipe, D. R., Diego Vinicius Dalevedo, B., Renan Muller, S., Guilherme Mariz De Oliveira, B., Cristiano, B., Aloisio Nelmo, K., De Mello, J.D.B., 2015. Effect of temperature and atmosphere on the tribological behavior of a polyether ether ketone composite. Friction, 3(4), 259–265.
- Friedrich, K., Zhang, Z., Schlarb, A.K., 2005. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. Composites Science and Technology, 65, 2329–2343.
- Geraldine, T., Thomas, G., 2016. Environmental effects on the sliding behavior of PEEK composites. Wear. 368-369, 278-286.

- Juanjuan, Z., Fang, X., Dwyer-Joyce, R.S., 2020a. PEEK Composites as Self-Lubricating Bush Materials for Articulating Revolute Pin Joints. *Polymers*, 12(3), 665.
- Juanjuan, Z., Le, M., Dwyer-Joyce, R., 2020b. Friction and wear behaviors of self-lubricating peek composites for articulating pin joints. *Tribology International*, 149, 105741.
- Kumar, D., Rajmohan, T., Venkatachalapathi, S., 2018. Wear Behavior of PEEK Matrix Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5, 14583-14589.
- Kurdi, A., Wang, H., Chang, L., 2018. Effect of nano-sized TiO₂ addition on tribological behavior of Poly Ether Ether Ketone Composite. *Tribology International*, 117, 225-235.
- Laux, K.A., Schwartz, C.J., 2013. Influence of linear reciprocating and multi-directional sliding on PEEK wear performance and transfer film formation. *Wear*, 301, 727-734.
- Laux, K.A., Jean-Fulcrand, A., Sue, H.J., Bremner, T., Wong, J.S.S., 2016. The influence of surface properties on sliding contact temperature and friction for polyetheretherketone (PEEK). *Polymer*, 103, 397-404.
- Marcela, P., Bernadette, D., Thomas, K., Archodoulaki, V.M., 2016. Studies on Tribological Behavior of PEEK and PE-UHM. AIP Conference Proceedings 1779, 070001.
- Placette, M.D., Roy, S., White, D., Sundararajan, S., Schwartz, C.J., 2019. The effect of surface roughness orientation on PEEK (polyetheretherketone) transfer film volume in multi-directional and linear sliding. *Wear*, 426-427, 1345-1353.
- Regis, M. Alex, L., Pierangiola, B., Lorenzo, F., 2018. Wear behavior of medical grade PEEK and CFR PEEK under dry and bovine serum conditions. *Wear*, 408-409, 86-95.
- Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A. K., Baets, P. D., 2016 a. Influence of Solid Lubricants on Tribological Properties of Polyetheretherketone (PEEK). *Tribology International*, 103, 45-47.
- Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A.K., De Baets, P., 2016 b. Reciprocating sliding wear behavior of PEEK-based hybrid composites, *Wear*, 362-363, 161-169.
- Schroeder, R., Torres, F.W., Binder, C., A. N.Klein, deMello, J.D.B., 2013. Failure mode in sliding wear of PEEK based composites. *Wear*, 301, 717-726.
- Soncu, S., Akkoyun, M., 2020. Surface free energy and flexural properties of wollastonite filled Polypropylene composites. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 9(2), 389-395.
- Tatsumi, G., Monica, R., Yuji, S., Kiyomi, S., Brain, G.M., 2019. Effect of lubrication on friction and wear properties of PEEK with steel counterparts. *Tribology Online*, 14(5), 345-352.
- Wang, Q., Wang, Y., Wang, H., Na, F., Wang, M., Hao, L., Yan, F., 2018. Comparative study of the effects of nano-sized and micro-sized CF and PTFE on the thermal and tribological properties of PEEK composites. *Polymer Advanced Technologies*, 29, 896-905.
- Zalaznik, M., Kalin, M., Novak, S., 2016. Influence of the processing temperature on the tribological and mechanical properties of polyether-ether-ketone (PEEK) polymer. *Tribology International*, 94, 92-97.
- Zsidai, L., Katai, L., 2016. Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*, 1-20.



ISPARTA İL MERKEZİNDE MEYDANA GELEN ÇEŞİTLİ İŞ KAZALARININ ANALİZİ

Özgür Devrim TAN*¹, Hakan CEYLAN²

¹* Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

İş Sağlığı ve Güvenliği,
Isparta İş Kazaları,
Kaza Olabilirlik Oranı,
İş Güvenliği Kültürü.

Öz

Yıllardır meydana gelen iş kazaları sonucunda yaşanan ölüm ve yaralanmaların hedefte sifira indirilmesi, pratikte ise en az seviyede tutulması gerektiği dünyada genel bir kabul görmüştür. Her yaşanan iş kazası, maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır. Yaşanan her can, mal ve işgünü kaybı; birey, aile, toplum ve devletin zarar görmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu kayıpların sifira veya en az seviyeye düşürülmesi ise öncelikle devlet tarafından bağımsız denetlemenin sağlanması, işyerlerinde sürekliliğin etkin şekilde uygulanmasıyla mümkündür. Bu çalışmada, Isparta il merkezinde 2015-2020 yılları arasında iş kazası meydana gelen işletmelerden 26'sı incelenerek kaza nedenlerinin analizi yapılmıştır. Çalışmada, işletmelerin iş güvenliği hizmeti almalarına rağmen kaza oranlarının azalmadığı, çalışanların ise iş güvenliği eğitimi almalarına rağmen kazaya uğrama oranlarında azalmanın olmadığı görülmüştür. Çalışmada Isparta il merkezinde çalışma yapılan işyerleri için kaza olabilirlik oranı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca Isparta ili ve Türkiye genelinde kaza olabilirlik oranlarında artan bir eğilimin olduğu dikkat çekmektedir.

ANALYSIS OF VARIOUS WORK ACCIDENTS IN ISPARTA PROVINCIAL CENTER

Keywords

Occupational Health And
Safety,
Isparta Occupational
Accidents,
Accident Likelihood Ratio,
Occupational Safety Culture.

Abstract

It has been generally accepted in the world that deaths and injures as a result of work accidents that have occurred for many years should be reduced to zero in the target and kept to a minimum in practice. Every accident at work causes material and moral losses. Every loss of life, property and working day result in damage to the individual family, society and the state. Reducing these losses to zero or to a minimum is possible primarily by ensuring independent audit by the state and effectively implementing continuity in the workplace. In this study, an analysis of the causes of accidents occurred in Isparta provincial center. In the study, it was found that accident rates did not decrease in accident rates despite the fact that employees received occupational safety training. In the study, accident likelihood ratio values calculated for the workplaces working in Isparta city center. In addition, it is noted that there is an increasing trend in accident likelihood rates in the province of Isparta and throughout Turkey.

Alıntı / Cite

Tan, Ö.D., Ceylan H., (2022). Isparta İl Merkezinde Meydana Gelen Çeşitli İş Kazalarının Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 402-411.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. D. Tan, 0000-0003-4990-6009
H. Ceylan, 0000-0001-8099-9819

Makale Süreci / Article Process

| | |
|----------------------------------|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 14.04.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 04.11.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 08.02.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Çalışma hayatının vazgeçilmez unsuru olan işgücü, özünde insanı taşıyan bir olgudur. İnsanlık tarihi ilk dönemlerinden itibaren sürekli bir uğraş içerisinde. Yeni aletlerin keşfi, barınma yerlerinin yapılması, savaş

* İlgili yazar / Corresponding author: kimyager32@hotmail.com, +90-545-905-11-64

aletlerinin yapılması, sanayileşme ile birlikte makine imalatları ve günümüzdeki teknolojik gelişmeler buna örnek verilebilir. Tüm bu uğraşların baş unsuru ise “insan”dır. Yapılan her uğraş, kendi içinde farklı tehlikeleri de bünyesinde barındırmaktadır. Bu tehlikeler karşısında alınmayan her tedbir, öngörülme ya da umursanmayan her eylem, iş kazası ya da meslek hastalığı olarak karşımıza çıkmaktadır.

20. yy ile birlikte yaşanan can kayıplarının, çocuk işçiliğinin önüne geçilmesinin ilk adımları olarak çeşitli tedbir ve güvenlik önlemlerinin alınması gündeme gelmeye başlamıştır. Sendika faaliyetleri, çalışanların bilinçlenmeye başlaması bazı kavramları gündeme getirmiştir. Çalışanların fiziksel, sosyal ve mental olarak tam iyilik hallerinin işyerlerinde uygulanmasıyla “iş sağlığı”, çalışanları işyerine özgü tehlikelerden korumak için “iş güvenliği” kavramları geliştirilmiştir (Horozoglu, 2017). Genel anlamda iş sağlığı ve güvenliği; işyerinden veya dışından gelebilecek tehlikelere karşı çalışanın sağlığını ve fiziksel güvenliğini koruyacak birçok disiplinin bir araya geldiği bir bilimdir (Öçal ve Çiçek, 2017). İş güvenliği ile birlikte alınan her önlem, zararları minimuma indirerek, görünmese dahi işyerine artı değer katmaktadır. Değer verildiğini hisseden çalışan ise üretime katkı sağlayacaktır (Arpa ve Çakı, 2018).

Meydana gelen iş kazaları gerçekte sadece bir ülke için değil, tüm dünya açısından bir sorun teşkil etmektedir (Dursun, 2013). Özellikle az gelişmiş ülkelerde ciddi derecede hissedilen bu sorunun maliyeti, ILO kaynaklarına göre gayri safi milli hasılanın %1-3’üne denk gelmekte ve bu da ciddi bir kayıp olarak ülke ekonomilerine yansımaktadır (Ceylan, 2011; Dursun, 2013). Dünya genelinde uluslararası kuruluşlar bu sorunların önüne geçilmesi için gerekli kaynakları kullansalar da iş kazalarının görülme sıklığı ile yaşanan can ve mal kayıpları halen devam etmektedir (Öçal ve Çiçek, 2017). İş kazaları yalnızca çalışanlara değil; kaybedilen zaman ve işgücüne bağlı olarak işletme ve devlet ekonomisine de zarar vermektedir (Pişkin ve Dalyan, 2020; Eraslan ve Cansaran, 2020). Yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler yeni makine ve ekipmanların, ara ürünlerin, yeni iş kollarının oluşmasına imkân sağlarken, iş güvenliği kavramı da aynı derecede önemli hale gelmektedir (Nişancı ve Demirören Kaymak, 2020). Çünkü her bir yenilik yeni tehlikeleri de beraberinde getirmektedir. Her ne kadar teknolojik gelişmelerle elde edilen ürünler güvenlik önlemleri dikkate alınarak yapılsa da, bu yeniliklerin maliyetini, her işletme karşılamakta zorluk yaşayabilmektedir. Olay sonunda yapılan harcamaların, olaydan önce yapılan harcamalara göre daha maliyetli olduğu da bilinmektedir (Güney ve Özger İlhan, 2019).

Türkiye’de de aynı şekilde yıllardır küçük büyük binlerce iş kazası yaşanmış, binlerce can kayıpları verilmiş, binlerce işletme zarar görmüştür. Bu zararların önüne geçilmesi amacıyla, AB adaylık süreci ile birlikte (Öçal ve Çiçek, 2017) 30.06.2012 tarihinde, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili ilk kanun olan 6331 sayılı “İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu yürürlüğe konulmuştur. Kanunun amacında, “...işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve mevcut sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için işveren ve çalışanların görev, yetki, sorumluluk, hak ve yükümlülüklerini düzenlemektir” (www.mevzuat.gov.tr, 6331) denilmektedir. Diğer taraftan kanun, çalışan ve işverenlere sorumluluk yüklese de, bireylerde oluşmayan bir güvenlik kültürü (Dursun, 2013; Aytaç vd., 2017) uygulamada zorluklara neden olmakta, meydana gelen kazalarda ciddi derecede azalma eğilimi gösteren verilere ulaşılmasını zorlaştırmaktadır.

İş kollarının ve tehlike düzeylerinin farklı olması nedeniyle çalışanlar ve işletme, içeriden ve dışarıdan gelebilecek farklı tehlikelere açıktır. Bu tehlikelerin doğrudan veya dolaylı olarak çalışanı ve/veya işyerini zarara uğratma potansiyeli her zaman vardır. Bunun derecesi ya da şiddeti ise gelen etkiye, çalışana, işyerine göre çeşitlilik gösterir. Kaza sonucunda hiçbir ekipman zarar görmeyebilir, çalışan küçük bir müdahale ile işine devam edebilir ya da ekipmanlar ciddi zarara uğrar, çalışana acil tıbbi müdahale yapılması gerekebilir. Dolayısıyla kaza sonuçlarını önceden tahmin etmek mümkün değildir.

İş kazalarının ortaya çıkış nedenleri sıralandığında birbirinden farklı birçok neden ortaya çıkmaktadır. Genel olarak sınıflandırma, güvensiz hareketler ve güvensiz ortamlar (durumlar) olarak yapılmaktadır (Kaplan ve Kaplan Çallı, 2019). Kazaların %88’inin güvenli olmayan davranışlardan dolayı meydana geldiği bilinmektedir (Güney ve Özger İlhan, 2019). Genel bir kabul ile kazaların; %88 güvenli olmayan davranış, %10 güvensiz ortamlar (durum), %2 kaçınılmaz nedenlere bağlı olduğu belirtilmektedir. İster çalışan olsun ister işveren olsun güvensiz hareketlerin kaynağı ise “insan”dır. Makine, teçhizat veya ortamdan kaynaklanabilecek tehlikeler anında giderilebilse de insandan kaynaklı problemler hemen çözüme ulaştırılamamaktadır. İnsanın da şartlara uyum sağlaması güvenlik kültürünün oluşturulmasıyla mümkün olmaktadır (Kaplan ve Kaplan Çallı, 2019; Dursun, 2013). Bir yaşam sürecinin büyük bölümünün işyerlerinde geçirilmesi nedeniyle, sağlıklı ve güvenli bir çalışma hayatının sürdürülebilir hale getirilmesi, işletme çalışanından en üst düzey yöneticisine kadar tüm paydaşların İSG kurallarına olan duyarlılığına bağlıdır (Engür, 2017).

Türkiye’de iş kazası ve meslek hastalıkları ile ilgili kayıt ve istatistikler SGK tarafından hazırlanmakta ve kullanıcılara sunulmaktadır. Türkiye genelinde meydana gelen her iş kazasının bildirimini yapılmadığı düşünülmektedir. Ayrıca Türkiye’de kayıt dışı istihdamın da var olduğu bilinmektedir. Türkiye’de kayıt dışı

istihdam ve yaşanan iş kazalarının bildirim dışı olmasına bağlı olarak güncel veriler ile gerçek veriler arasında tutarsızlıklar söz konusudur. 1990'lı yıllardan itibaren alınan önlemlerle birlikte olumlu yönde gelişme kaydedilmesine rağmen kayıt dışı istihdam sorunu, günümüzde de ciddi anlamda ele alınması gereken sorunlar arasında yer almaktadır (Mahiroğulları, 2017). Kayıt dışı istihdam 2019 yılı için %34.52; Antalya, Isparta, Burdur bölge olarak %29.06'dır (www.sgk.gov.tr). Böylelikle kayıt dışı istihdam ve iş kazalarının tamamının bildirilmemesi sonucunda da elde edilen verilerin doğruluğu tartışmaya açık hale gelmekte (Ceylan, 2011; Erginel ve Toptancı, 2017), Türkiye genelinde iş güvenliği açısından gelinen son nokta tam olarak anlaşılmamaktadır.

Bu çalışmada amaç, Isparta il merkezi özelinde meydana gelen çeşitli iş kazalarının neden ve sonuçlarının araştırılması, Kanunun (6331, 2012) yürürlüğe girdiği 2012 yılından 2020 yılı sonunda kadar geçen dönemde, iş güvenliği açısından kat edilen mesafenin tespit edilmesidir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışma kapsamında Isparta il merkezinde bulunan işyerlerinden, Ocak 2015-Aralık 2020 tarihleri arasında bir veya birden fazla iş kazası meydana gelmiş 26 işyeri üzerinde bir inceleme yapılmıştır. İnceleme, SGK'ya yapılan iş kazası bildirimleri ve işyeri kaza kayıtları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen 26 işyerinde meydana gelen 58 iş kazasında, iş kazası yaşayan 62 kişi dikkate alınmıştır. İşyerleri içerisinde ikamet amaçlı bina inşaatı gibi geçici sektörlerin bulunması veya kapatılan işletmelerin olması gibi nedenlerden dolayı, her bir yıl içerisinde çalışma yapılan işyeri sayısı ile çalışan sayıları değişkenlik göstermiştir. Üzerinde çalışma yapılan işyerleri dikkate alınarak işyeri tehlike sınıfları, işletmelerdeki çalışan sayıları, SGK istatistiklerinde yer alan faaliyet kolları, meydana gelen kaza türleri, kaza nedenleri, yıllara göre iş kazası sayılarının dağılımı, tehlikeli hareket ve ortamlardan kaynaklanan kazaların nedenleri, kaza sonuçları, yaralanma türü, kaza çeşitlerinin dağılımı, bir ve birden fazla kaza meydana gelen işyerlerinin dağılımı, çalışanların iş güvenliği eğitimi durumları ile kazazedelerin; yaş dağılımı, iş deneyimi, cinsiyet dağılımı, eğitim seviyeleri ayrı ayrı ele alınarak analiz edilmiştir.

Ayrıca işyerlerine göre "...takvim yılı içerisindeki ölümlü ve/veya ölümlü olmayan mesleki yaralanmaların toplam sayısının, aynı yıl içerisinde referans grupta yer alan işçilerin toplam sayısına bölünmesiyle elde edilen değer 100 000 katsayısı ile çarpılmasıyla" (Anonim, 2020e) hesaplanan "kaza olabilirlik oranı (KOO)" değerleri, yıllara göre işyerleri için denklem (1) yardımıyla ayrı ayrı hesaplanıp ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Daha sonra Türkiye geneli ile Isparta ili geneli KOO değerleri hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Hesaplamalarda, 5510 sayılı kanunun 4a maddesinde belirtilen "...hizmet akdi ile bir veya birden fazla işveren tarafından çalıştırılanlar (www.mevzuat.gov.tr, 5510) dikkate alınmıştır. 2020 yılı SGK istatistikleri araştırma çalışmasının gerçekleştirildiği takvimde yayınlanmadığı için hesaplamalara dahil edilmemiştir.

$$KOO = \frac{İKS \cdot 100\ 000}{İS} \quad (1)$$

Burada KOO, kaza olabilirlik oranı, İKS, iş kazası sayısı, İS, referans gruptaki işçi sayısıdır. Elde edilen sonuçlar irdelendikten sonra, çalışmaya konu olan işyerlerinde yaşanan iş kazaları ve bunlara bağlı olarak iş sağlığı ve güvenliği durumu tespit edilerek değerlendirmelerde bulunulmuş ve çözüm önerileri sunulmuştur.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Çalışma yapılan 26 işyeri için tehlike sınıfları incelendiğinde %65,38 oranında 17 işyeri çok tehlikeli, %23,08 oranında 6 işyeri tehlikeli ve %11,54 oranında 3 işyerinin ise az tehlikeli işyerleri oldukları belirlenmiştir.

Çalışma yapılan işyerlerindeki çalışan sayıları incelendiğinde %42,31 oranında (11 işyeri) 10-25 arasında, %26,92 oranında (7 işyeri) 5-10 arasında, %11,54 oranında (3 işyeri) 50-100 arasında, %7,69 oranında (2 işyeri) 1-5 ve 25-50 arasında, %3,85 oranında (1 işyeri) ise 200-300 arasında çalışanın bulunduğu belirlenmiştir.

SGK istatistik yıllıklarından (Anonim, 2020a; Anonim, 2020b; Anonim, 2020c; Anonim, 2020ç; Anonim, 2020d) alınan verilere göre işletmelerin faaliyet kolları Tablo 1'de gösterilmiştir. Buna göre bina inşaatının %38,44'lük bir oranla (10 işyeri) ilk sırada yer aldığı görülmektedir.

Tablo 1. SGK verilerine göre işletmelerin faaliyet kolları (According to SSI data, the activity lines of the enterprises)

| FAALİYET | ORAN (%) |
|--|----------|
| Bina inşaatı | 38,44 |
| Özel inşaat faaliyetleri | 11,53 |
| Diğer madencilik ve taşocakçılığı | 7,68 |
| Gıda ürünlerinin imalatı | 3,85 |
| Ağaç ve ağaç ürünleri imalatı | 3,85 |
| Kimyasal ve kimyasal ürünleri imalatı | 3,85 |
| Başka yerde sınıflandırılmamış makine ve ekipman imalatı | 3,85 |
| Mobilya imalatı | 3,85 |
| Makine ve ekipmanların kurulumu ve onarımı | 3,85 |
| Akaryakıt toptan ve perakende ticareti | 3,85 |
| Perakende ticaret | 3,85 |
| Kara taşımacılığı | 3,85 |
| Konaklama | 3,85 |
| İnsan sağlığı hizmetleri | 3,85 |

İşletmelerde meydana gelen kaza türleri incelendiği zaman %20,69'luk oranla (12 kaza) yüksekten düşme en fazla görülen kaza çeşidi olurken, %17,23'lük oranla (10 kaza) el-kol sıkışmaları ikinci sırada yer almaktadır. Ayrıca %1,72'lik oranla (1 kaza) çalışanın üçüncü şahıslar tarafından saldırıya uğraması, iş makinesinin enerji hatları ile temas ettirilmesi ve yemek yeme sırasında boğaza cisim kaçması gibi değişik kaza türleri de meydana gelmiştir. Tablo 2'de kaza türlerinin dağılımı görülmektedir.

Tablo 2. İşletmelerde yaşanan kaza türleri (Types of accidents in businesses)

| KAZA TÜRÜ | ORAN (%) |
|-----------------------------------|----------|
| Yüksekten düşme | 20,69 |
| El, kol sıkışması | 17,23 |
| Vücuda malzeme çarpması | 12,10 |
| Göze cisim kaçması | 10,34 |
| Keskin cisimlerle temas | 5,17 |
| Üzerine yüksekten malzeme düşmesi | 5,17 |
| Kayma, takılma, düşme | 5,17 |
| Hareketli kısımlarla temas | 5,17 |
| Ayak ezilmesi | 5,17 |
| Üzerine malzeme devrilmesi | 5,17 |
| Cisim batması | 3,45 |
| Üçüncü şahısların saldırısı | 1,72 |
| Enerji hatları ile temas | 1,72 |
| Boğaza cisim kaçması | 1,72 |

Meydana gelen kazaların nedenleri incelendiğinde kazaların %87,93'lük oranla (51 kaza) tehlikeli hareketlerden, %12,07'lik oranla (7 kaza) ise tehlikeli ortamlardan (durumlar) kaynaklandığı tespit edilmiştir. Tehlikeli hareketlerden dolayı meydana gelen iş kazaları incelendiğinde %54,90 (28 kaza) ile dikkatsizlik ilk sırada yer

almaktadır. Kişisel koruyucuların kullanılmaması ise %29,41'lik oranla (15 kaza) ikinci sıradadır. Tablo 3'te iş kazası ile sonuçlanan tehlikeli hareketlerin dağılımı gösterilmiştir.

Tablo 3. İş kazası ile sonuçlanan tehlikeli hareketlerin dağılımı (Distribution of unsafe act resulting in work accidents)

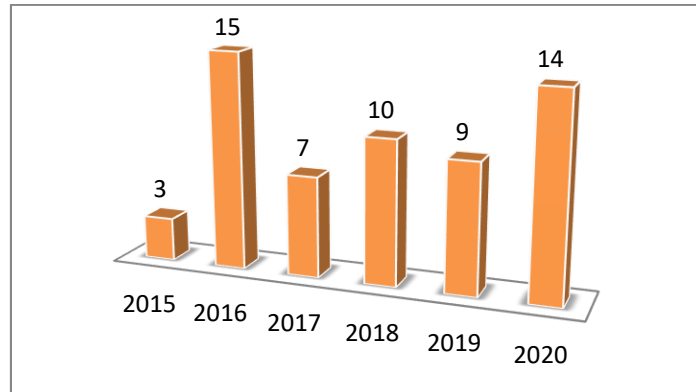
| TEHLİKELİ HAREKET | ORAN (%) |
|--|----------|
| Dikkatsizlik | 54,90 |
| Kişisel koruyucu malzemelerin kullanılmaması | 29,41 |
| Güvensiz çalışma/pozisyon | 11,76 |
| Güvenlik donanımını güvensiz hale getirmek | 1,96 |
| Uyarı levhalarına uyulmaması | 1,96 |

İş kazası yaşanmasına neden olan tehlikeli ortamlar ise Tablo 4'te görülmektedir. Yaşanan 58 iş kazasının, 4 farklı tehlikeli ortamdan kaynaklandığı gözlenmiştir. Buna göre yüksekte düşmeye neden olan iş iskeleleri %42,86 (3 kaza) ve zemin süreksizlikleri ise %28,57'lik (2 kaza) oranlarla ilk sırada yer almaktadırlar.

Tablo 4. İş kazası yaşanmasına neden olan tehlikeli ortamların dağılımı (Distribution of unsafe condition that cause work accidents)

| TEHLİKELİ ORTAM | ORAN (%) |
|-------------------------------|----------|
| Uygun olmayan iş iskeleleri | 42,86 |
| Zemin süreksizlikleri | 28,57 |
| Makine koruyucusunun olmaması | 14,29 |
| Gece çalışması | 14,29 |

2015-2020 yılları arasında incelenen kazaların yıllara göre dağılımı Şekil 1'de görülmektedir. Çalışma yapılan 26 işyeri incelendiğinde toplamda 58 iş kazasının yaşandığı tespit edilmiştir. Buna göre en fazla iş kazası yaşanan yılların 2016 (58 kazada 15 kaza) ve 2020 (58 kazada 14 kaza) yılları olduğu görülmektedir.

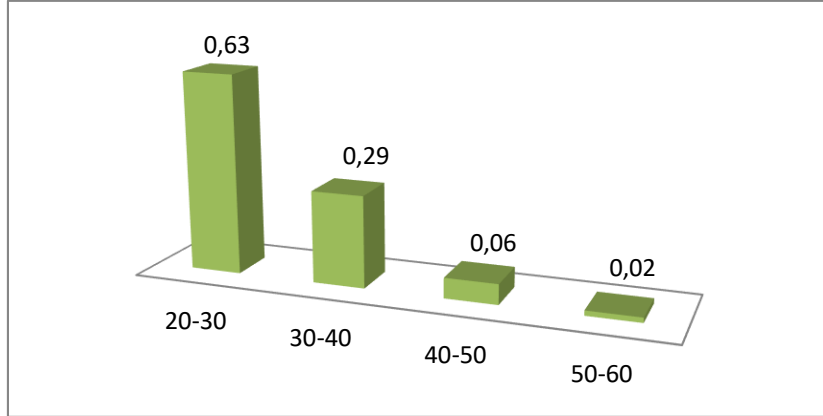


Şekil 1. Çalışma yapılan işyerlerinde meydana gelen kazaların yıllara göre dağılımı (Distribution of accidents that occur in workplaces by years)

Kazazedelerin yaş dağılımı Şekil 2'de görülmektedir. Toplamda 58 iş kazasında iş kazası yaşamış olan 62 çalışanın %63,00'ünü 20-30 yaş arası çalışanlar (38 kişi) oluşturmaktadır. En az kaza yapan yaş grubu ise 1 kişi ile 50-60 yaş aralığında bulunmaktadır. Buna göre çalışanların yaş aralığı ilerledikçe meydana gelen kaza sayısında bir azalmanın olduğu görülmektedir. Böylece kaza yaşanması ihtimalinin, çalışanların yaşı ile ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Çalışanın yaşı ilerledikçe kazanılan deneyimlerin, iş kazası olma olasılığını azalttığı öne sürülebilir.

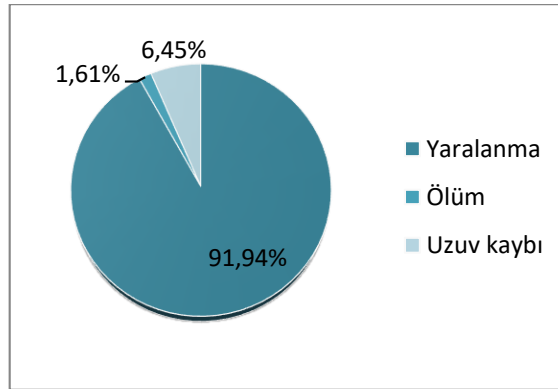
Kazazedeler cinsiyetlerine göre incelendiğinde 62 kazazededen 1 kişinin kadın, 61 kişinin erkek olduğu görülmektedir. Erkeklerin kadınlara göre daha fazla iş kazası yaptığı görülmektedir. Bu durum, kazaların çoğunun çok tehlikeli işyerlerinde yaşanmasından ve genel olarak kadın çalışan istihdamının erkek çalışanlara oranla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Kazazedelerin eğitim seviyeleri incelendiğinde %61,29 oranında ilköğretim (38 kişi), %35,48 oranında ortaöğretim (22 kişi) ve %3,23 (2 kişi) oranında ise lisans mezunu oldukları tespit edilmiştir. Eğitim düzeylerine bakıldığında ilköğretim mezunları daha fazla kaza yaşarken, lisans mezunu

kazazedelerin de olması dikkat çekmektedir. Kazazedelerin iş deneyimleri ile kaza oranları incelendiğinde %46,77 oranla (29 kişi) 1-5 yıl arası deneyimli çalışanlarda en fazla kaza oranı görülürken 5-10 yıl arası ile 15 yıl üzeri deneyimli çalışanlar %17,74'lük oranla (11 kişi) ikinci sırada yer almaktadırlar. Buna göre iş deneyiminin artmasıyla kaza meydana gelme oranında bir azalmanın olduğu gözle çarpılmaktadır.



Şekil 2. Kazazedelerin yaş aralıklarının dağılımı (Distribution of the age ranges of the victims)

Meydana gelen iş kazalarının sonuçları Şekil 3'te görülmektedir. Yaşanan 58 iş kazasında etkilenen 62 çalışandan %91,94'ünün yaralandığı (57 kişi), %6,45'inde uzuv kayıplarının yaşandığı (4 kişi) ve %1,61'ini oluşturan bir kişinin ise yaşamını yitirdiği belirlenmiştir. Buna göre en fazla yaralanma meydana gelirken, uzuv kayıplarının da yaşandığı tespit edilmiştir. Meydana gelen ölümlü kaza, 40-50 yaş aralığındaki çalışanda meydana gelirken, uzuv kayıplarının 30-40 yaş aralığında yaşandığı belirlenmiştir. Bu durum, her ne kadar deneyimsiz ya da daha az deneyimli çalışanlarda meydana gelen kaza sonuçlarının büyük oranda yaralanmayla sonuçlandığını gösterirken, deneyimin artmasıyla birlikte yaşanan kazaların ölüm ya da kalıcı yaralanmalarla sonuçlandığını göstermektedir. Bu analize göre, yılların tecrübesini kazanan çalışanda oluşan "bana bir şey olmaz", "yıllardır bu işi yapıyorum" şeklindeki "aşırı güven" olgusunun kaza sonucuna en ciddi şekilde yansıdığı sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 3. İş kazalarının sonuçları (The consequences of work accidents)

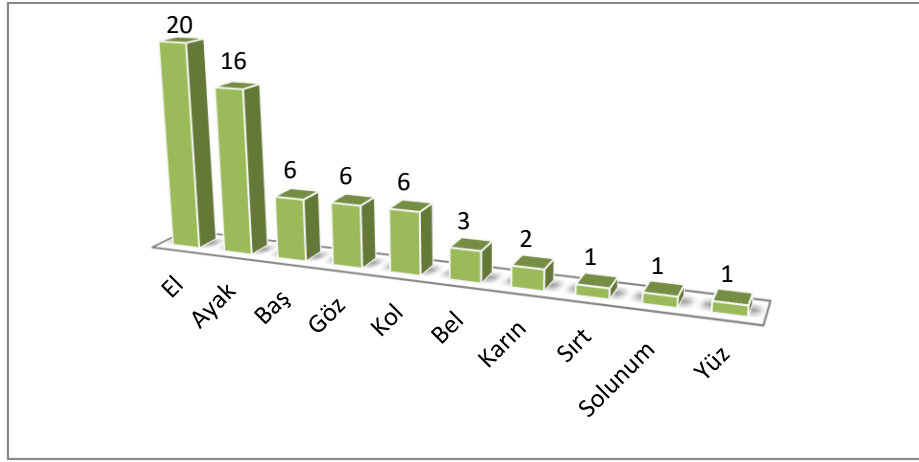
İş kazalarının sonucunda %80,33 oranında (49 kişi) iş göremezlik raporu verilirken, %19,67 oranında (12 kişi) iş göremezlik raporu verilmemiştir. Bu durum ise meydana gelen bir iş kazasının görünen maliyetlerde hem işletme hem de devlet açısından ciddi bir yük ve ekonomik kayba neden olduğunu gösterirken; iş gücü, zaman, olayın diğer çalışanlara ve dolayısıyla üretime yansması gibi görünmeyen maliyetlerde de ciddi bir kaybın olduğunu ortaya koymaktadır.

Yaşanan kaza sonuçlarına göre meydana gelen yaralanma türleri Tablo 5'te görülmektedir. Buna göre %43,55'lik (27 kişi) oranla yüzeysel yaralanmalar ilk sırayı alırken, %17,74'lük (11 kişi) oranla kesik ve ezilme türü yaralanmalar ikinci sırada yer almaktadır.

Yaralanmanın meydana geldiği yer ile ilgili olarak elde edilen veriler Şekil 4'te görülmektedir. Buna göre en fazla yaralanmanın el ve ayaklarda meydana geldiği tespit edilmiştir.

Tablo 5. Yaralanma türleri (Types of injury)

| YARALANMANIN TÜRÜ | ORAN (%) |
|-----------------------|----------|
| Yüzeysel yaralanmalar | 43,55 |
| Ezilme | 17,74 |
| Kesik | 17,74 |
| Kırık | 11,29 |
| Travma | 4,84 |
| Boğaza cisim kaçması | 1,61 |
| Fonksiyon kaybı | 1,61 |
| Yanık | 1,61 |

**Şekil 4.** Yaralanmaların yeri ve sayısı (Location and number of injured body part)

Çalışma yapılan işyerleri incelendiğinde aynı işyerinde birden fazla iş kazası meydana geldiği de tespit edilmiştir. İşyerlerinin %30,77'sinde (8 işyeri) birden fazla iş kazası meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, işyerlerinin iş sağlığı ve güvenliği hizmeti almalarına rağmen, iş sağlığı ve güvenliği kavramına ve uygulamalarına verilen önem ve ilginin yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır.

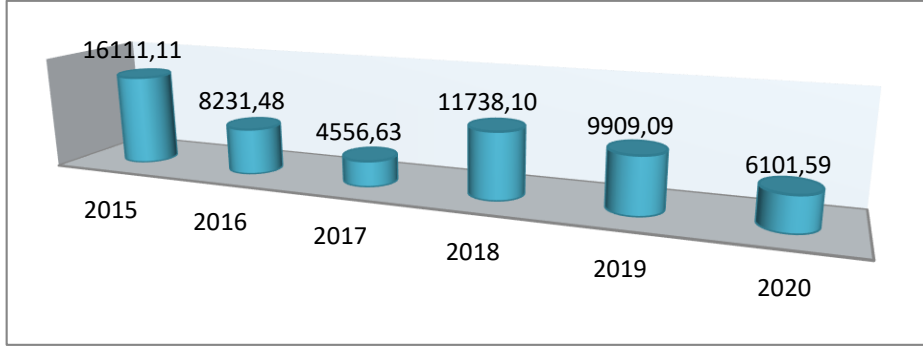
İş kazası yaşayan 62 çalışan incelendiği zaman %82,26'sının (51 kişi) iş sağlığı ve güvenliği eğitimi aldığı, %17,74'ünün (11 kişi) ise iş sağlığı ve güvenliği eğitimi almadığı tespit edilmiştir. Eğitim alan çalışanların daha fazla kaza yapmaları, bir eğitim sorununun olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde KOO değerleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada ilk olarak 2015-2020 yılları arasında Isparta il merkezinde çalışma yapılan 26 işyerindeki KOO değerleri belirlenerek yıl bazında ortalamaları alınmıştır. Çalışmada, 2015-2020 yılları arasında yıl bazlı bir inceleme gerçekleştirildiğinden dolayı, yıl içinde meydana gelen iş kazası sayısı ile çalışan sayılarındaki değişiklik sebebiyle yıllık ortalama çalışan sayıları dikkate alınmış ve KOO değerleri elde edilmiştir. İkinci kısımda sözü edilen yıllar arasında Isparta il genelinde ve Türkiye genelinde meydana gelen iş kazaları dikkate alınarak KOO değerleri, SGK istatistikleri verilerine dayanılarak yıl içinde meydana gelen toplam iş kazası sayısı ve kayıtlı toplam çalışan sayıları dikkate alınarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

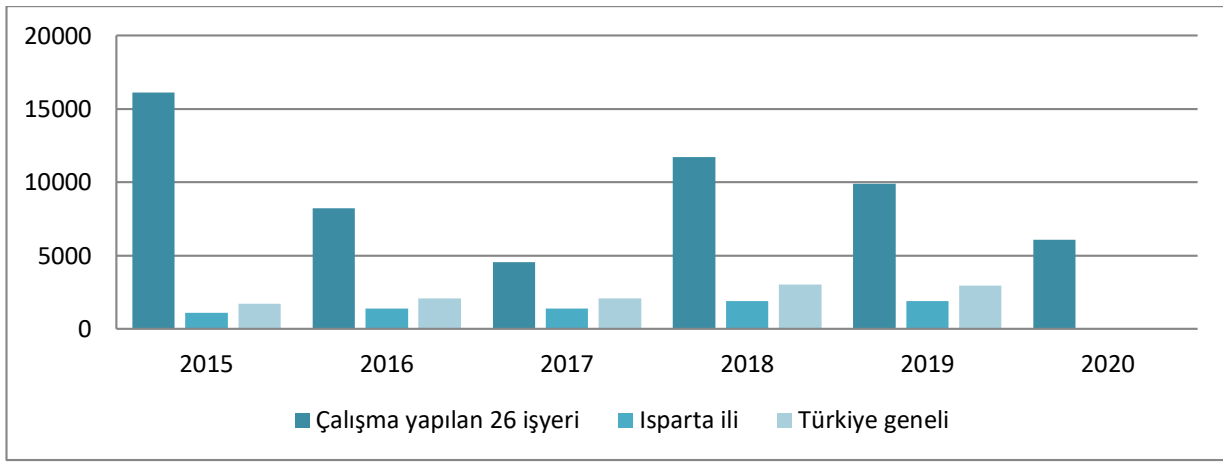
Şekil 5'te çalışma yapılan işyerlerindeki yıllık ortalama KOO değerleri görülmektedir. Buna göre 2015 yılında en yüksek KOO değeri hesaplanırken 2017 yılında en düşük seviyeye ulaşıldığı görülmektedir. Ancak 2018 yılında bir yükselme ve daha sonra da düşüş göze çarpmaktadır. 2020 yılında daha fazla iş kazası meydana gelmesine rağmen bir düşüşün gözlenmesi, iş güvenliğine olan ilginin artmasından çok, pandemi döneminde yoğun çalışma yapan işyerlerindeki ortalama çalışan sayılarındaki artıştan kaynaklanmaktadır.

2015-2020 yılları arasında çalışma yapılan 26 işyeri için hesaplanan KOO değerleri; 2015-2020 yılları arasında Isparta il geneli ve Türkiye genelinde meydana gelen toplam kaza sayısı ile toplam kayıtlı çalışan sayılarının SGK istatistik yıllıklarından (Anonim, 2020a; Anonim, 2020b; Anonim, 2020c; Anonim, 2020ç; Anonim, 2020d) elde edilen verilerine bağlı olarak hesaplanan KOO değerleriyle Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Bu verilere göre Isparta ili ve Türkiye genelinde ortalama çalışan sayısında azalma görülürken yaşanan iş kazalarındaki artış, KOO değerlerinin artan bir eğilim göstermesine neden olmuştur. Üzerinde çalışma yapılan 26 işyerinde KOO değerlerinin yüksek çıkması, çalışma yapılan işyeri ve çalışan sayısının sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

2020 yılı SGK istatistikleri araştırma çalışması sürecinde yayımlanmadığı için grafikte yer almamaktadır. Hem çalışılan işyerleri, hem Isparta il geneli hem de Türkiye genelinde yaşanan iş kazası sayılarının artması, iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ile ilgili olarak bir problemin var olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Çalışma yapılan işyerlerindeki yıllık ortalama KOO değerleri (Annual average ALR values in the workplaces)



Şekil 6. Çalışılan işyerleri, Isparta ili ve Türkiye geneli KOO değerleri (Working businesses, Isparta city and Turkey general ALR values)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun yürürlüğe girmesi ile birlikte ülke genelinde yaşanan iş kazaların önüne geçilmesi, yaşanan maddi ve manevi kayıplara son verilmesi için ciddi bir adım atılmıştır. Bu yasayla birlikte iş sağlığı ve güvenliği, sektörel anlamda da ele alınmasını gerektiren eleştiri, araştırma ve çalışmalara da konu olmuştur (Akgül ve Doğan, 2018a). Ancak gelinen son nokta itibariyle elde edilen başarının tartışmaya açık hale geldiği görülmektedir. Yaşanan iş kazası sayılarında ciddi bir azalma meydana gelmemiş, iş sağlığı ve güvenliği ise sadece bir kavram olarak akıllarda yer etmiştir.

Çalışma yapılan işyerleri incelendiğinde çalışanın yaşının artması ile iş kazası arasında ters orantı olduğu ancak yaşın artmasıyla meydana gelen kaza sonuçlarının yaşam kalitesini etkileyebilecek şiddette meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan iş güvenliği hizmeti almalarına rağmen işletmelerin çoğunda birden fazla iş kazasının meydana geldiği görülmektedir. İşyerlerinin tamamının herhangi bir danışmanlık firması ya da kişiden iş sağlığı ve güvenliği hizmeti almalarına rağmen iş kazalarının tekrar tekrar yaşandığı görülmektedir. İş kazaları sonuçlarının, kayıp gün ve işgücü maliyetlerinin; işyeri ve devlet ekonomisine ağır yükler getirmeye devam ettiği açıkça görülmektedir. Bu sorun, hizmet verilmesi sürecinde bir aksaklığın yaşandığını açıkça ortaya koymaktadır. Çalışanların iş güvenliği eğitimi almasına rağmen iş kazalarında ciddi bir azalmanın meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu durumda da iş güvenliği eğitimlerinde bir açığın olduğu ortaya çıkmaktadır. Çalışma yapılan işyerlerindeki KOO değerlerinde bir düşüş gözlenmekte fakat bunun çalışan istihdamındaki artıştan kaynaklandığı dikkat çekmektedir. Isparta il geneli ve Türkiye genelinde ise KOO değerlerinde artan bir eğilimin olduğu göze çarpmaktadır. Türkiye genelinde yaşanan bu KOO artışı, yasanın işlerliğinde bir eksikliğin olduğunu göstermekte ve hızlı bir biçimde ele alınarak ciddi düzenlemelerin hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır.

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile yönetmelikleri gereği saha uygulamaları incelendiğinde, iş güvenliği açısından ciddi adımların atıldığını söylemek imkânsızdır. Yasanın uygulama ve denetiminde ciddi problemlerin olduğu tartışılmaz bir gerçektir. Yasanın uygulama sorumlusu olarak yetkilendirilen kişi ve kurumlar (Ortak Sağlık Güvenlik Birimleri, OSGB) birer ticari işletme olarak faaliyetlerine devam etmektedirler. Yasa gereği

gerçekleştirilen denetim ve uygulamalar, denetlenenden ücret alınarak yapılmaktadır. İşyeri sahipleri ile ticari iyi ilişkiler kurmak zorunda olan iş güvenliği profesyonelleri veya OSGB'ler görevlerini yerini getirmekte zorlanmaktadır. Profesyoneller, hem zor koşullarda çalıştırılmakta ya da işlerini yapmakta hem de yasa gereği birincil sorumlu olarak gösterilmektedir. İş kazalarının önüne geçilmesinin birinci adımı, işyeri sahipleri ile olan bu ticari bağın bir an önce koparılmasından ibarettir. Çünkü ücret karşılığı bağımsız denetim ve yaptırım gerçekleştirilememektedir.

İş kazalarının birincil ögesi olan kazazedeler ise, bu bağımlı denetleme sonucunda tedbir ve kurallara uymamakta ciddi özen göstermeye devam etmektedirler. Kişisel koruyucu donanım kullanımı ve iş güvenliği eğitimleri, çalışanların kaçındığı konular arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Denetlenen karşısında zorluk yaşayan profesyoneller ise, işyeri sahibinin iş güvenliğine bakışına paralel olarak çalışanlar karşısında da etkinliklerini tam olarak yerine getirememektedir. Bir işyerinde birden fazla kazanın yaşanması, işyeri sahibi ve çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konularında ne kadar duyarlı olduklarını açıkça ortaya koymaktadır. Çalışanlarda ve işverenlerde oluşmamış bir güvenlik kültürünün kişilerle uyumlaştırılması hem zorluklar içinde gerçekleştirilmeye çalışılmakta hem de zor bir süreç içermektedir. Bu olgunun akıllarda yer etmesi, ana sınıfı eğitiminden başlanılarak lisans eğitimi dâhil olmak üzere eğitici-öğretici bir dil ile çocuk ve gençlere aktarılmasıyla sağlanabilecektir. İş kazalarından korunma ve güvenlik kültürünün oluşturulması; ulusal ve uluslararası düzeyde tüm paydaşlarla etkin bir iletişimin sağlanması, konu ile ilgili olarak kaydedilen ilerlemelerin ve aksamaların belirlenmesine bağlı olarak yeni politikaların geliştirilmesi, özellikle eğitim ve öğretime önem verilerek, kukuki düzenlemelerin yürürlüğe konulması ve takip edilmesi şeklinde çeşitli aşamaları içermektedir. (Akgül ve Doğan, 2020; Akgül ve Doğan, 2018b).

Gelinen son nokta itibariyle hem çalışılan işyerlerinde, hem Isparta il genelinde hem de Türkiye genelinde iş kazaları sayılarında artış devam etmektedir. Yasanın yürürlüğe girdiği 2012 yılından 2021 yılı başına kadar, ciddi anlamda somut verilere ulaşıldığını ve iyi bir noktaya geldiğini bugün itibariyle söylemek mümkün değildir. Yapılan paneller, konferanslar, yayınlar, denetimler ile yayımlanan kanun ve yönetmelikler sahaya yansıtılmamakta, hep sözde kalmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği açısından 2021 yılına kadar değişen tek şey "zaman" olmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Akgül, M. ve Doğan, Y., (2018a). Occupational Health and Safety Awareness Analysis in the Construction Sector of University Students in Eastern Anatolia and Southeast Anatolia. International Conference on Innovative Engineering Applications, 778-784.
- Akgül, M. ve Doğan, Y., (2018b). Awareness Analysis On Occupational Health and Safety in The Construction Sector: Sample Of Mediterranean And Black Sea Regions. International Conference on Innovative Engineering Applications, 763-769.
- Akgül, M. ve Doğan, Y., (2020). İnşaat Sektöründeki İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalık Analizi: İç Anadolu ve Marmara Bölgesi Örnekleme, Engineering Sciences, 15(4), 159-173. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsaeng/issue/57513/738808>.
- Anonim, 2020a. İstatistik Yıllıkları. Sosyal Güvenlik Kurumu. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari/sgk_2019 (18.12.2020).
- Anonim (2020b). İstatistik Yıllıkları. Sosyal Güvenlik Kurumu. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari/sgk_2018 (18.12.2020).
- Anonim (2020c). İstatistik Yıllıkları. Sosyal Güvenlik Kurumu. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari/sgk_2017 (18.12.2020).
- Anonim (2020ç). İstatistik Yıllıkları. Sosyal Güvenlik Kurumu. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari/sgk_2016 (18.12.2020).
- Anonim (2020d). İstatistik Yıllıkları. Sosyal Güvenlik Kurumu. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari/sgk_2015 (18.12.2020).
- Anonim (2020e). İstatistiklerle Türkiye'nin İSG Görünümü, T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. <https://www.detam.com.tr/wp-content/uploads/2020/10/Istatistiklerle-Turkiyenin-ISG-Gorunumu.pdf> (20.12.2020).
- Arpa, M., ve Çakı, C., (2018). "İş Kazası Diye Bir Şey Yoktur": Kanada İş Güvenliği Reklamları Üzerine İnceleme. Çalışma İlişkileri Dergisi (Journal of Labour Relations), 9(2), 75-87.
- Aytaç, S., Özok, A., F., Yamankaradeniz, N., Akalp, G., Çankaya, O., Gökçe, A., Tüfekçi, U., (2017). İSG Kültürü Oluşmasında Metal Sanayinde Çalışan Kadınların Risk Algısı Üzerine Bir Araştırma. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Özel Sayı, 22. Ulusal Ergonomi Kongresi, 59-67. DOI: 10.21923/jesd.77231.
- Ceylan, H., (2011). Türkiye'deki İş Kazalarının Genel Görünümü ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. International Journal of Engineering Research and Development, 3(2), 18-24.

- Dursun, S., (2013). İş Güvenliği Kültürünün Çalışanların Güvenli Davranışları Üzerine Etkisi. Sosyal Güvenlik Dergisi, (3)2, 61-75.
- Eraslan, E. ve Cansaran C., (2020). İş Sağlığı ve Güvenliği Algısının Eğitim Bazında Değerlendirilmesi. Journal of Turkish Operations Management, 1(4), 357-368.
- Erginel, N. ve Toptancı, Ş., (2017). İş Kazası Verilerinin Olasılık Dağılımları İle Modellenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Özel Sayı, 22. Ulusal Ergonomi Kongresi, 201-212. DOI: 10.21923/jesd.10116.
- Engür, M., O., (2017). Mobilya Endüstrisinde İş Sağlığı ve Güvenliği Mevzuatına Uyumun Kontrol Listeleri İle Sağlanması Üzerine Bir Çalışma. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Özel Sayı, 22. Ulusal Ergonomi Kongresi, 283-292. DOI: 10.21923/jesd.45680.
- Güney, M., E., ve Özger, İlhan, S., (2019). İş Kazası Kavramına Yönelik Algılar. Gazi Sağlık Bilimleri Dergisi, 4(2), 31-47.
- Horozoğlu, K. (2017). İş Kazalarının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Analizi. Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 15(1), 265-281.
- <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6331&MEvzuatTur=1&MevzuatTertip=5> (15.12.2020).
- <https://www.mevzuat.gov.tr/Mevzuat?MevzuatNo=5510&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> (01.01.2021).
- http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/calisan/kayitdisi_istihdam_oranlari (20.12.2020).
- Kaplan, M., ve Kaplan, Çallı, M., (2019). Türkiye’de Çalışanların Demografik Özelliklerinin İş Kazalarına Etkilerinin Analizi. Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi (Journal of Management and Economics Research), 17(2), 74-89.
- Mahiroğulları, A., (2017). Türkiye’de Kayıt Dışı İstihdam ve Önlemeye Yönelik Stratejiler. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 22(2), 547-565. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sduibfd/issue/52993/703147>.
- Nişancı, N., Z. ve Demirören, Kaymak, J., (2020). Davranış Odaklı İş Güvenliği Uygulamalarının İş Güvenliği Kültürüne Etkisi. Journal of Yasar University, Special Issue on 3rd International EUREFE Congress, 21-39.
- Öçal, M. ve Çiçek, Ö., (2017). Türkiye ve Avrupa Birliği’nde İş Kazası Verilerinin Karşılaştırmalı Analizi. HAK-İŞ Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi, 6(16), 616-637.
- Pişkin, M. ve Dalyan, O., (2020). İşyerlerinde Ramak Kala Bildirimlerinin İş Kazalarına Etkisi ve İnşaat Sektöründe Uygulama. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Açık Erişim, 6(1), 133-143.



FARKLI ÖRNEKLEME YÖNTEMLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARINDA PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet ULUSLU*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|--|
| YSA, ÇKA, Latin Hiperküp, Monte Carlo, Modelleme. | Optimizasyon modelleme problemlerinde, kullanılacak verinin seçimi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada farklı örnekleme yöntemlerinin Yapay Sinir Ağlarının başarısındaki etkisini, anten tasarımlarında sıkça kullanılan model olan Çok Katmanlı Algılayıcı kullanılarak mikroşerit yama anteni üzerinde performans karşılaştırılması yapılmaktadır. Seçilen Yapay Sinir Ağı kara kutu modeli 5 giriş ve 1 çıkış parametrelerinden oluşmaktadır. Mikroşerit yama anten modellenmesinde kullanılacak veri seçiminde Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleme yönteminin uygulanması incelenmiştir. Öncelikle örnek sayısı (eğitim ve doğrulama veri setleri) giriş parametrelerinin belirlenen değer aralıklarında Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleri kendilerine özgün oluşturulma yöntemine göre temin edilmiştir. Akabinde oluşturulan 2 farklı örnek sayısına sahip problemler kendi içlerinde %50 ve %33 oranında rastgele ayrılarak eğitim ve doğrulama verileri oluşturulmuştur. Performans karşılaştırmasında, 3 algoritma ile 4 farklı mimari yapıya sahip toplamda 12 farklı ağ ile birlikte 4 farklı sayıda eğitim ve doğrulama veri setleri kullanılmaktadır. Çıkan sonuçlar birbirleri ile mukayese edildiğinde, düşük veya yüksek eğitim örnek sayısına sahip modellemede de Monte Carlo örnekleme yönteminin performans olarak daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna karşın kendi içinde Latin Hiperküp örnekleme yönteminin ise eğitim örnek sayısında artışa gidilmesi kısmi iyileşmeye neden olduğu görülmektedir. Fakat yine de daha az örnek sayısına sahip olan diğer Monte Carlo örnekleme yönteminin performans olarak gerisinde kalmıştır. Dolayısı ile Monte Carlo örnekleme yönteminin bu ve benzer problemler için daha uygulanabilir olduğuna kanaat getirilmiştir. |

COMPARISON OF PERFORMANCE OF DIFFERENT SAMPLING METHODS IN ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

| Keywords | Abstract |
|--|--|
| ANN, MLP, Latin Hypercube, Monte Carlo, Modelling. | In optimization modeling problems, the selection of the data to be used is of great importance. In this study, the effect of different sampling methods on the performance of Artificial Neural Networks is compared on the microstrip patch antenna by using the Multilayer Perceptron, which is the model that is frequently used in antenna designs. The selected neural network black box model consists of 5 input and 1 output parameters. The application of Latin Hypercube and Monte Carlo sampling methods was examined in the selection of data to be used in microstrip patch antenna modeling. First of all, Latin Hypercube and Monte Carlo samples were obtained according to their unique creation method in the specified value ranges of the sample number (training and validation data sets) input parameters. Afterwards, the problems with 2 different sample numbers were randomly separated at a rate of 50% and 33%, and training and validation data were created. In the performance comparison, a total of 12 different networks with 3 algorithms and 4 different architectural structures, as well as 4 different training and validation data sets are used. When the results are compared with each other, it is seen that Monte Carlo sampling method gives more successful results in terms of |

* İlgili yazar / Corresponding author: auluslu@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

performance in modeling with low or high educational sample number. On the other hand, it is seen that the Latin Hypercube sampling method, on the other hand, increased the number of training samples and caused a partial improvement. However, it still lags behind the other Monte Carlo sampling method, which has less sample size, in terms of performance. Therefore, it was concluded that the Monte Carlo sampling method is more applicable for this and similar problems.

Alıntı / Cite

Uluslu, A., (2022). Comparison of Performance of Different Sampling Methods in Artificial Neural Networks, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 412-428.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Uluslu, 0000-0002-5580-1687

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 19.10.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 30.01.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 19.02.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Teknolojini ilerlemesine karşın isteklerinde bununla birlikte hızla artmasından dolayı elektromanyetik (EM) simülasyonların uzun süreler aldığından, mikrodalga bileşen modellemesinin hesaplama maliyetini azaltmak için polinom regresyon (Chávez-Hurtado vd., 2016; Rayas-Sánchez vd., 2015; Rayas-Sánchez vd., 2010; Rayas-Sánchez vd., 2010), destek vektör makinesi (Khusro vd., 2018; Güneş vd., 2014; Geng vd., 2014; Jacobs vd., 2013; Tokan vd., 2008) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi çeşitli vekil modeller oluşturulmuştur (Yuan vd., 2020; Xiao vd., 2018; Kapetanakis vd., 2018; Xiao vd., 2021; Mahouti vd., 2017; Uluslu, 2021; Uluslu, 2021). Bunların arasından YSA, karmaşık doğrusal olmayan problemler için doğruluğu ve verimli modelleme yeteneği nedeniyle mikrodalga bileşen vekil modelinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Mikrodalga bileşeni için YSA modellerinin araştırılması esas olarak modelleme yöntemlerine odaklanır ve farklı ağların kıyaslamaları mevcuttur (Uluslu, 2021; Güneş vd., 2017; Mahouti vd., 2014). Örneklem, modellemenin temelidir ve kalitesi, vekil modellemenin ve vekil destekli optimizasyonun verimliliğini ve doğruluğunu direk olarak etkilemektedir. Monte Carlo örneklem yöntemi, güncel bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir örneklem yöntemidir, ancak düşük örneklem verimliliği, büyük miktarda hesaplama gibi çeşitli hataları vardır (Lei, 2003). Bununla birlikte McKay, örneklem verimliliği yüksek ancak örnek büyüklüğü küçük olan Latin Hiperküp örneklem yöntemini geliştirmiştir (McKay vd., 1979). Bu makalede, bu iki yöntemin matematiksel ilkeleri ve çalışma adımları kısaca tanıtılacak ve mikroşerit yama anten modelleme probleminde uygulanacaktır. Bunun yanı sıra, yazarın bildiği kadarıyla bu tür problemde bu iki örneklem yönteminin bu kadar detaylı karşılaştırılmasına rastlanmamıştır. Bu alana hizmet eden daha iyi olanı seçmek için bu iki yöntemin pratik etkileri birbiriyle karşılaştırılacaktır. Çoğunlukla anten tasarım problemlerinde daha yaygın olarak optimizasyon yöntemiyle istenilen özellikler elde edilmeye çalışılır. Ancak bu yöntem anten simülasyon süresi dikkate alındığında oldukça maliyetlidir. Çalışmada, birçok tasarım probleminde öncülük etmiş, 2-3GHz bant aralığında herhangi bir noktada çalışan mikroşerit yama antenin tasarım modelleme probleminin çözümü için, düşük maliyetli, hızlı, verimli, doğru ve güvenilir tabanlı bir vekil model kullanılmıştır. Anten EM simülasyonları için MATLAB 2021a programı kullanılmıştır. Tüm bu işlemler 8. nesil Intel Core i7 CPU, 3.20 GHz işlemcili, 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayar tarafından gerçekleştirilmiştir. Tek/çift bant çalışan bir antenin S_{11} (dB) parametresinin farklı boyutlarda belirlenen frekans bandı boyunca değişimini tahmin etmek için bir YSA modelinde kullanılacak olan veri setinin farklı örneklem yöntemleri ile performansının karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu çalışma, Latin Hiperküp örneklem yani yerel örneklem yöntemi ile Monte Carlo örneklem yöntemi yani küresel örneklem yönteminin performans karşılaştırması üzerine dayandırılmıştır. Yerel örneklem yöntemi, iyi örneklerin kullanımını artırmak için açgözlülük stratejisiyle tasarlanmıştır. Küresel örneklem yöntemi ise, tasarım alanını keşfetmek için örnek tekdüzeliğini güçlendirmek için minimum mesafe reddine sahip yöntemde dayanmaktadır. Doğru örneklem yapılması bütün modelleme problemlerinde daha az hataya sahip sonuçlar bulunmasına neden olmaktadır. Bu nedenle araştırma ihtiyacını karşılamak için sınırları iyi seçmek gerekmektedir. Ayrıca bu çalışma, örneklemenin vekil model oluşturma sürecinde temel ve önemli bir çalışma olduğu anlamına gelebilir. Bu makalenin temel amacı, bilimsel ve makul örneklem yöntemini bulmaktır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Modelleme çalışmalarında veri setini elde etmek için, Latin Hiperküp örneklem (LHÖ) (McKay vd., 1979) ve Monte Carlo örneklem (MCÖ) vekil destekli mikrodalga bileşen modelleme ve optimizasyon problemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Belirtilen bu örneklem yöntemleri, tasarım alanında dağıtılmış örneklerin tek biçimde elde edilmesini geliştirmeye odaklanır. Mikrodalga bileşenleri filtre anten vb. başta olmak üzere genellikle hassas olduklarından, tasarım kriterlerini sağlayan iyi numuneler muhtemelen tasarım uzayının küçük

bölgelerinde bulunur (Uluslu, 2021; Mahouti vd., 2021; Mahouti vd., 2021). Tek tip örnekleme yöntemleri kullanılıyorsa, iyi örnekler (tasarım özelliklerini karşılayan) ve kötü örneklerden (tasarım özelliklerini karşılamayan) oluşur. Bu kötü örneklere dayanan vekil modeller, doğru optimizasyona izin vermeyebilir. Bu nedenle, vekil modelleme ve optimizasyon için hem örnek tekdüzeliğine hem de iyi örneklerle odaklanan yüksek kaliteli bir örnekleme yöntemi istenmektedir. Son yıllarda mikrodalga bileşenlerinin modelleme ve optimizasyon performansını iyileştirmek için çeşitli numune doldurma yöntemleri önerilmiştir (Liu vd., 2018; Güneş vd., 2017). Bir çalışmada, modelleme tekniği olarak interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemi önerilmiştir (Güneş vd., 2017). Bu yöntem genel olarak modelleme doğruluğunu artırır. Ancak eklenen örnekler iyi örneklerle ait olmayabileceğinden, bu tekniğe dayalı vekil model doğru optimizasyona izin vermeyebilir. Ayrıca Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) en temel modelleme yöntemlerinden biridir. Özellikle mikrodalga alanında, filtre ve anten modelleri olmak üzere birçok makalede yer almıştır (Uluslu, 2021; Mahouti, vd., 2020; Mahouti, vd., 2021; Uluslu, 2021). Ayrıca algoritması geliştirilmiş vekil model ile yapılmış çalışmada mevcuttur (Çalık, vd., 2019). Yapılan çalışmada kullanılacak olan katman ve nöron sayısı seçimi daha önceden yapılmış bir çalışmadaki sonuçlara dayanarak belirlenmiştir (Mahouti, P., 2019).

Benzer çalışmalardaki durumlara bakılacak olursa;

Yapılan bir çalışmada standart yapıya sahip bir mikroşerit anten YSA ailesine ait olan Radyal tabanlı fonksiyon (RBF) kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada 9 giriş ve 2 çıkış parametresi kullanılmıştır. Elde edilen en başarılı sonuçtaki hata değeri 0,327 (MSE) olarak belirtilmiştir (Bose, vd., 2012).

Bir diğer çalışmada ise E şekilli bir yama antenin modellenmesi üzerinedir. Çalışmada kullanılan YSA 3 giriş, 2 gizli ve 1 çıkış katmanından oluşmaktadır. Toplamda 144 adet örnek sayısı kullanılmıştır. Bunların 130 tanesi eğitim, kalan 14 tanesi ise doğrulama verisi olarak seçilmiştir. Veri seçimi rastgele olarak yapılmaktadır. Çalışmada en başarılı sonuçtaki hata değeri 0,523 (MSE) olarak elde edildiği belirtilmiştir (Akdağlı, vd., 2013).

Yapılan bir başka çalışmada ise L şekilli yama anten modellemesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada 6 giriş, 3 gizli ve 1 çıkış katmanına sahip mimariden oluşan YSA kullanılmıştır. Toplam örnek sayısı 192 olarak belirtilmiştir. Bu örneklerin 172'si eğitim, kalan 20'si ise doğrulama verisi olarak ayrılmıştır. Verilerin seçimi rastgele olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en başarılı sonuca ait hata değeri ise 0,537 (MSE) olarak belirtilmiştir (Kayabaşı, vd., 2014).

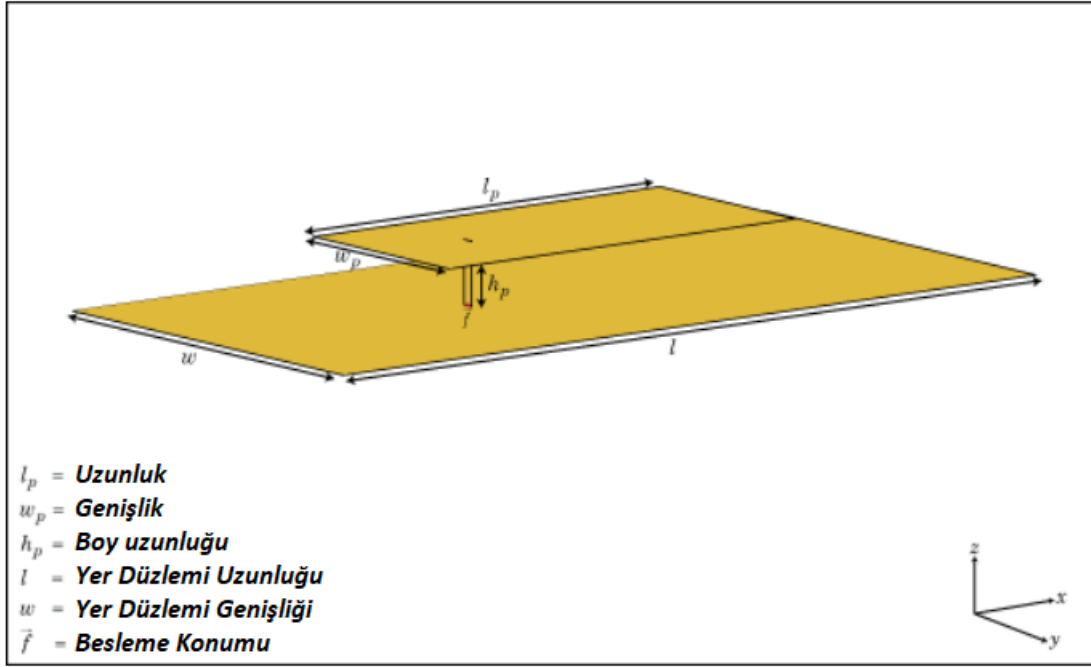
Yine aynı çalışma ekibi bu sefer A şekilli bir yama anteni için bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Bu çalışmada 6 giriş, 4 gizli ve 1 çıkış katmanından oluşan bir YSA modeli tasarlanmıştır. Toplam örnek sayısı boyutu 144 olarak belirtilmiştir. Bunlardan 124 tanesi eğitim, kalan 20 tanesi ise doğrulama verisi olarak seçilmiştir. Veri seçimi rastgele olarak yapılmıştır. Çalışmada en başarılı sonuçtaki hata değeri 0,457 (MSE) olarak elde edildiği belirtilmiştir (Akdağlı, vd., 2015).

Ve son olarak yapılan bir tez çalışmasında YSA ve Destek Vektör Makinası (DVM) yöntemleri kullanılarak modelleme çalışması yapılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak Tansig, Logsig ve Purelin tercih edilmiştir. Çalışmada 4 giriş, 6 gizli ve 1 çıkış katmanından oluşan bir mimari kullanılmıştır. Ayrıca kullanılacak veri setindeki sonuçlarının elde edilmesinde HFSS programından yardım alınmıştır. Çalışmada 210 adet verinin 180 tanesi eğitim, 30 tanesi doğrulama amacıyla kullanılarak bir yama anten modelleme çalışması yapılmıştır. YSA'nın daha hızlı olduğundan bahsedilirken nümerik bir sonuç verilmemiştir. Ayrıca en başarılı sonuçtaki hata değeri 0,271 (MSE) olarak elde edildiği belirtilmiştir (Vuran, 2016).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Yaygın olarak kullanılan mikroşerit yama anten dielektrik zemin üzerine ışıyan metal yama ve altında toprak zeminden yapılmaktadır. Burada metal yama yaygın olarak bakır kullanılmaktadır. Bazı durumlarda bunun yerine iletken malzemelerden olan gümüş veya altında tercih edilmektedir. Yama şekli ise en yaygın olanı kare ve dikdörtgen olmak üzere E harfi U harfi vb. birçok özgün şekillerde görülmektedir (Uluslu, 2021; Uluslu, 2021). Bu çalışmada ise dikdörtgen yama şekli tercih edilmiştir. Yamanın uzunluğu (l_p), genişliği (w_p), yer düzlem uzunluğu (l), yer düzlem genişliği (w) ve boy uzunluğu (w_p) ile sembolize edilmiştir. Burada dielektrik malzeme kalınlığı 0,05- 5,35mm arasında bir değer tercih edilebilmektedir (Balanis vd., 1982). Ayrıca düşük dielektrikli ve kalın malzeme seçilerek antenin performansında artış sağlanabilir (Safran vd., 2006). Bu çalışmada ise 1,6mm olarak tercih edilmiştir. Dikdörtgen şeklinde mikroşerit yama antenler çoğu zaman Şekil 1'de gösterildiği gibi bir taban üzerinde durmaktadır. Mikroşerit yama anten geometrisini tanımlamak için kullanılan parametreler, tanımları ve kullanılan tasarım değerleri ile birlikte Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Mikroşerit yama antenin fiziksel parametreleri (Physical parameters of microstrip patch antenna)

Tablo 1. Mikroşerit yama antenin tasarım parametreleri (Design parameters of microstrip patch antenna)

| Parametre | Değer | Tanım |
|----------------------------|-------|--|
| Uzunluk (mm) | - | x eksenine boyunca yama uzunluğu |
| Genişlik (mm) | - | y eksenine boyunca yama genişliği |
| Yükseklik (mm) | 1,6 | Alt tabakanın yüksekliği |
| Yüzey | Hava | Dielektrik malzeme türü |
| Yer Düzlemi Uzunluğu (mm) | - | x eksenine boyunca yer düzlemi uzunluğu |
| Yer Düzlemi Genişliği (mm) | - | y eksenine boyunca yer düzlemi genişliği |
| İletken | PEC | Metal malzeme türü |

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Bu çalışmada, 2 farklı örnekleme yöntemi önerilmiştir. Bunlar Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleme yöntemidir. Şimdi bunları sırası ile detaylandıralım.

3.2.1. Latin Hiperküp Örnekleme Yöntemi (Latin Hypercube Sampling Method)

Latin Hiperküp örnekleme yöntemi literatürde belirtildiği gibi tabakalı örnekleme sınıfına aittir (Hossain vd., 2005; Wan vd., 2008). Örnekleri, integral dağılımını etkili bir şekilde yansıtabilir. N'nin değişken türlerinin miktarı olduğunu varsayarsak, x_i , i değişkenini temsil eder, x_l^i ve x_u^i , i'nin minimum ve maksimum değeridir.

Çalıştırma adımları sırası ile aşağıdaki gibidir:

- 1) Numune boyutunu (H) belirleyin;
- 2) Nüfusu katmanlaştırın. Bu örneklemede aralığın uzunluğuna göre bölme stili seçilmiştir. Her x_i değişkeninin tanım aralığını $[[x_l^i, x_u^i]]$ ortalama olarak numune boyutunu (H) parçalarına bölün:

$$x_l^i = x_0^i < x_1^i < x_2^i < \dots < x_j^i < x_{j+1}^i < \dots < x_H^i = x_u^i \quad (1)$$

- 3) Sütunu $\{1, 2, \dots, H\}$ dizisinin tümüyle rastgele bir düzenlemesi olan bir $m \times n$ matrisi üretin;

4) Seçilen bir hiperküp bu matrisin her elemanına karşılık gelir, hiperküpde Monte Carlo örneklemesinin yapılacağı gibi rastgele örnek birer birer, numune boyutu (H) örnekleri üretilecektir.

Rastgele sayıların bölünmüş aralığa ait olduğunu garanti etmek için, (j) aralığının rasgele sayısı U_j aşağıdaki gibi bir denklemi sağlamalıdır:

$$U_j = \frac{U}{H} + \frac{j-1}{H} \quad (2)$$

Bu denklemde U , $[0, 1]$ bölgesinde düzgün dağılmış bir rasgele sayıdır; U_j , $j(j=1, 2, \dots, H)$ bölgesine ait rastgele sayıdır.

3.2.2. Monte Carlo Örnekleme Yöntemi (Monte Carlo Sampling Method)

Literatüre göre (Wei vd., 2004; Jin vd., 2005; Zhou vd., 1997) Monte Carlo örnekleme yöntemi, rastgele problemleri rastgele deney yoluyla çözen rastgele simülasyon yöntemi olarak da adlandırılır. Rastgele A_i olayının olasılığının P_i ($i=1, 2, \dots, n$) olduğunu varsayarsak. Örnekleme yapabilmek için öncelikle kümülatif olasılığı oluşturun:

$$P_0 = 0, P^{(l)} = \sum_{i=1}^l P_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

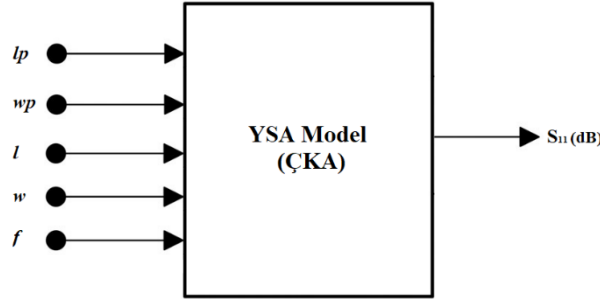
Rastgele bir r sayısı alın, eğer $P^{l-1} < P^l \leq P^l$, ($l = 1, 2, \dots, n$) koşulu sağlanırsa, A_i olayının gerçekleştiği kabul edilir.

Kesikli rastgele değişkenlerden örnekleme adımları sırası ile aşağıdaki gibidir:

- 1) Kesikli rastgele değişkenleri boyutlarına göre sıralayın, görelî sıralama frekanslarını olasılık olarak alın;
- 2) Rastgele bir sayı alın;
- 3) Rastgele sayının değerini karşılık gelen aralıkla karşılaştırın ve örnek oluşturun.

3.3. Çok Katmanlı Algılayıcı ile Modelleme (Multilayer Perceptron Model)

ÇKA başta olmak üzere YSA'lar giriş, çıkış ve gizli katmanlar barındırmaktadırlar. Bu tür ağların yapısı gereği çoklu giriş/çıkış modellemeye imkân sağlamaktadır (Şen, 2004). Mikroşerit yama antenin modellemesi için kullanılacak olan ÇKA iki, üç ve dört gizli katmanlı olacak şekilde 10, 15 ve 20 nörondan oluşan durumlar için tasarlanmıştır. Benzer yapılar yapılan bir çalışmada başarılı sonuçlar vermiştir (Mahouti, 2019). Nöronlar giriş/çıkış katmanları farklı ağırlık katsayılarına sahiptir. Eğitim aşaması, çıkan eğitim hata oranı minimum seviyeye getirilene kadar modelleme çalışmayı sürdürür (Şen, 2004). Bu amaç için katmanlar arasında iki farklı aktivasyon fonksiyonunun kombinasyonu kullanılmıştır. Gizli katmandaki aktivasyon fonksiyonu olarak son nöronda logsis, diğer katmanlar için tansig tercih edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonları yine literatürdeki çalışmalara benzer olarak tercih edilmiştir (Mahouti, 2019; Vuran, 2016). Ağ modeli oluşturulurken antenin 4 boyut parametresi yanı sıra frekans parametresi ile birlikte toplamda 5 giriş parametresi vardır. Önerilen ağ modelinin kara kutu modellemesi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Mikroşerit yama antenin S_{11} (dB) parametresini eğitmek için YSA modeli (ANN model for training S_{11} (dB) parameter of microstrip patch antenna)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Deneysel çalışma kısmı 4 bölümden oluşmaktadır. Tüm bölümlerde ortak olarak kullanılacak ağ modeli Şekil 2'de verilmiştir. Bu ağ modelinde trainbr, trainlm, trainrp ve trainscg algoritmaları kullanılacaktır. Mimari olarak ise 2, 3 ve 4 gizli katmanlı yapılar kullanılacaktır. 2 gizli katmanlı ağ modeli 15 ve 20 nörona sahiptir. 3 gizli katmanlı ağ modeli ise 10, 15 ve 20 nörona sahiptir. 4 gizli katmanlı ağ modeli ise 10, 15, 15 ve 20 nörona sahiptir. Tüm bu seçilen algoritma ve mimaride kullanılan modeller literatür araştırmasında da belirtilen başarılı bir çalışmadan örnek alınarak tasarlanmıştır (Mahouti, P., 2019). Her bölümde değişik örnekleme boyutuna sahip farklı sayıdaki eğitim ve doğrulama verileri için Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleme yöntemlerinin performansları nümerik olarak tablolar halinde verilecektir. Literatür taramasında en düşük örnekleme boyutu olarak 144 olarak tespit edilmiştir (Akdağlı, vd., 2015). Ayrıca eğitim data sayısı 124 olmakla birlikte doğru veri sayısı oranı %7,2 ye denk gelmektedir (Akdağlı, vd., 2015). Yapılacak çalışmada ise tüm literatür örneklerinden daha düşük olacak şekilde örnekleme boyutu 120 ve 100 olarak seçilmiştir. Daha sonra oluşturulan 2 farklı örnek sayısına sahip problemler

kendi içlerinde %50 ve %33 oranında rastgele ayrılarak eğitim ve doğrulama verileri oluşturulmuştur. Doğrulama veri sayısı oranı ise %50 ve %33 tüm literatür örneklerinden daha yüksektir. Böylelikle doğrulama hata gerçekliği daha yüksek olacaktır. Eğitim ve doğrulama verilerinin ayrımı verilen literatür örneklerinde de olduğu gibi rastgele olarak yapılmıştır. Ayrıca YSA modelleri rastgele süreçlerden geçerek eğitimlerini tamamladıklarından dolayı her bir modelleme için kod 10 defa çalıştırılacaktır. Tablolarda modelleme performans değerlendirilmesinde sıkça kullanılan ortalama kare hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve korelasyon katsayısı (R^2) kullanılacaktır. Ayrıca her bölümde bir algoritma için seçilen bazı sonuçlar grafik olarak gösterilecektir. Ek olarak tüm modelleme işlemleri 1 dakikanın altı bir sürede işlemi tamamlamıştır. En kısa optimizasyon süresi 10 saniye ve en uzun optimizasyon süresi ise 58 saniye sürmüştür. 4 bölümde kullanılacak olan eğitim ve doğrulama veri setleri detayları Tablo 2’de nümerik olarak verilmiştir.

Tablo 2. Eğitim ve doğrulama veri setleri (Training and validation datasets)

| Parametre | Değer Aralığı | Örnekleme Yöntemi | Örnek Sayısı (Bölüm 4.1) | Örnek Sayısı (Bölüm 4.2) | Örnek Sayısı (Bölüm 4.3) | Örnek Sayısı (Bölüm 4.4) |
|----------------------------|---------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Uzunluk (mm) | 44 – 74 | Latin Hiperküp veya Monte Carlo | (Eğitim: 60) | (Eğitim: 80) | (Eğitim: 50) | (Eğitim: 67) |
| Genişlik (mm) | 59 – 98 | | Doğrulama: 60) | Doğrulama: 40) | Doğrulama: 50) | Doğrulama: 33) |
| Yer Düzlemi Uzunluğu (mm) | 94 – 156 | Monte Carlo | Toplam:120 | Toplam:120 | Toplam:100 | Toplam:100 |
| Yer Düzlemi Genişliği (mm) | 94 – 156 | | | | | |
| Frekans (GHz) | 1,5 – 3,5 | Lineer | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Toplam Örnek | - | - | 120x100 | 120x100 | 100x100 | 100x100 |

4.1. Latin Hiperküp ve Monte Carlo Örnekleme Yöntemlerinin 60 Eğitim, 60 Doğrulama Verisi için Performans Karşılaştırması (Performance Comparison of Latin Hypercube and Monte Carlo Sampling Methods for 60 Training, 60 Validation Data)

Bu kısımda 60 eğitim ve 60 doğrulama verisi olmak üzere toplamda 120 örnek data kullanılacaktır. Eğitim ve doğrulama veri seti detayları Tablo 2’de nümerik olarak verilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen Latin Hiperküp örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 3 ve Tablo 4’de verilmiştir. Monte Carlo örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 5 ve Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 3. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 60 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 60 validation data from 120 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R^2) | Doğrulama Hata (R^2) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001973 | 1,328474 | 0,024389 | 0,153798 | 0,999525 | 0,598543 |
| | 10 15 20 | 0,000999 | 0,800414 | 0,018296 | 0,188743 | 0,999814 | 0,382493 |
| | 10 15 15 20 | 0,000998 | 0,246361 | 0,016918 | 0,164673 | 0,999887 | 0,653075 |
| trainlm | 15 20 | 0,002368 | 1,018362 | 0,027032 | 0,167077 | 0,996332 | 0,170747 |
| | 10 15 20 | 0,001132 | 0,734225 | 0,018973 | 0,210885 | 0,973320 | 0,011693 |
| | 10 15 15 20 | 0,000999 | 0,975303 | 0,017944 | 0,234827 | 0,983914 | 0,042827 |
| trainrp | 15 20 | 0,153190 | 0,305079 | 0,178794 | 0,241484 | 0,894082 | 0,798523 |
| | 10 15 20 | 0,084395 | 0,186416 | 0,125620 | 0,172891 | 0,934052 | 0,840864 |
| | 10 15 15 20 | 0,044988 | 0,222449 | 0,109446 | 0,184037 | 0,960946 | 0,528671 |
| trainscg | 15 20 | 0,056231 | 0,138097 | 0,103112 | 0,149750 | 0,940850 | 0,903255 |
| | 10 15 20 | 0,037208 | 0,185944 | 0,094866 | 0,141519 | 0,981819 | 0,931293 |
| | 10 15 15 20 | 0,021357 | 0,145068 | 0,072242 | 0,109607 | 0,985782 | 0,886969 |

Tablo 4. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 60 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 60 validation data from 120 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method, and average performances among 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,003189 | 3,389983 | 0,030139 | 0,200252 | 0,999640 | 0,777088 |
| | 10 15 20 | 0,001205 | 5,372497 | 0,019846 | 0,279593 | 0,999864 | 0,718053 |
| | 10 15 15 20 | 0,000999 | 2,914812 | 0,017590 | 0,247307 | 0,999887 | 0,828619 |
| trainlm | 15 20 | 0,008538 | 56,81571 | 0,047729 | 0,691376 | 0,999035 | 0,494523 |
| | 10 15 20 | 0,025142 | 412,8871 | 0,053627 | 1,248521 | 0,997124 | 0,561795 |
| | 10 15 15 20 | 0,028783 | 749,3137 | 0,088201 | 3,924392 | 0,996732 | 0,364469 |
| trainrp | 15 20 | 0,506368 | 0,889192 | 0,349488 | 0,483596 | 0,940766 | 0,898481 |
| | 10 15 20 | 0,209331 | 0,758234 | 0,207459 | 0,340954 | 0,975889 | 0,918561 |
| | 10 15 15 20 | 0,145358 | 1,450832 | 0,180509 | 0,429328 | 0,983419 | 0,850833 |
| trainscg | 15 20 | 0,171518 | 0,398608 | 0,182402 | 0,230311 | 0,980314 | 0,956131 |
| | 10 15 20 | 0,086767 | 0,334069 | 0,134203 | 0,189602 | 0,990142 | 0,964652 |
| | 10 15 15 20 | 0,054943 | 0,418185 | 0,112227 | 0,183701 | 0,993780 | 0,955336 |

Tablo 5. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 60 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 60 validation data from 120 sample data generated using the Monte Carlo sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001313 | 0,049534 | 0,018744 | 0,078308 | 0,999753 | 0,962465 |
| | 10 15 20 | 0,000993 | 0,082836 | 0,015981 | 0,079942 | 0,999844 | 0,976793 |
| | 10 15 15 20 | 0,000996 | 0,086033 | 0,015675 | 0,085526 | 0,999868 | 0,966295 |
| trainlm | 15 20 | 0,001329 | 0,045046 | 0,019081 | 0,067007 | 0,999683 | 0,427380 |
| | 10 15 20 | 0,000998 | 0,052176 | 0,015809 | 0,073219 | 0,999528 | 0,371702 |
| | 10 15 15 20 | 0,000993 | 0,066269 | 0,016042 | 0,071179 | 0,999712 | 0,337340 |
| trainrp | 15 20 | 0,046070 | 0,069548 | 0,101068 | 0,115779 | 0,967993 | 0,963357 |
| | 10 15 20 | 0,020521 | 0,037888 | 0,064023 | 0,079406 | 0,977722 | 0,956007 |
| | 10 15 15 20 | 0,014878 | 0,040839 | 0,062132 | 0,083175 | 0,977871 | 0,926531 |
| trainscg | 15 20 | 0,016224 | 0,028126 | 0,064687 | 0,072597 | 0,971210 | 0,975758 |
| | 10 15 20 | 0,009670 | 0,024452 | 0,047320 | 0,059586 | 0,997118 | 0,992834 |
| | 10 15 15 20 | 0,007134 | 0,022210 | 0,040346 | 0,055654 | 0,998513 | 0,994423 |

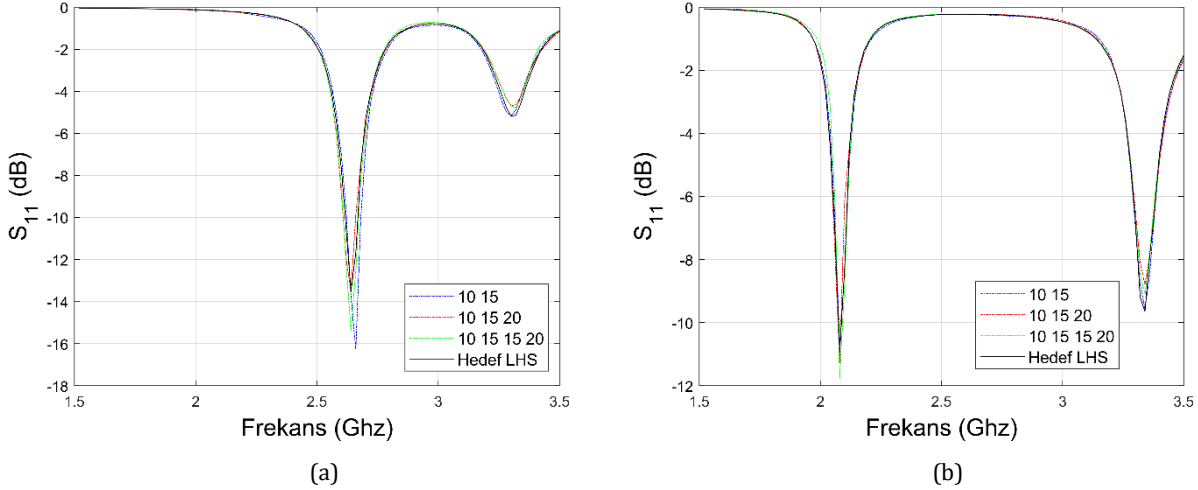
Tablo 6. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 60 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 60 validation data from 120 sample data generated using the Monte Carlo sampling method and average performances among 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001599 | 0,124235 | 0,020684 | 0,095263 | 0,999788 | 0,984703 |
| | 10 15 20 | 0,001017 | 0,136837 | 0,016893 | 0,099227 | 0,999866 | 0,982683 |
| | 10 15 15 20 | 0,000999 | 0,138683 | 0,016523 | 0,094267 | 0,999868 | 0,982522 |
| trainlm | 15 20 | 0,001724 | 3,618635 | 0,021042 | 0,208700 | 0,999772 | 0,806605 |
| | 10 15 20 | 0,001256 | 8,384723 | 0,018797 | 0,248744 | 0,999834 | 0,877114 |
| | 10 15 15 20 | 0,001182 | 62,23466 | 0,020253 | 0,795375 | 0,999843 | 0,747122 |
| trainrp | 15 20 | 0,100741 | 0,149667 | 0,147481 | 0,177807 | 0,986586 | 0,980641 |
| | 10 15 20 | 0,050355 | 0,130917 | 0,102756 | 0,132432 | 0,993302 | 0,983419 |
| | 10 15 15 20 | 0,057007 | 0,241713 | 0,106461 | 0,168643 | 0,992403 | 0,968840 |
| trainscg | 15 20 | 0,047986 | 0,069377 | 0,092270 | 0,103391 | 0,993599 | 0,991075 |
| | 10 15 20 | 0,014805 | 0,031459 | 0,060296 | 0,071632 | 0,998039 | 0,995963 |
| | 10 15 15 20 | 0,009678 | 0,031212 | 0,049057 | 0,065171 | 0,998718 | 0,995992 |

Verilen Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'dan yola çıkarak eğitim hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE ve MAE olarak trainbr algoritması her iki örnekleme yönteminde en başarılı sonuçların bulunduğu görülmektedir. Yine tablolardan örnekleme yöntemlerini performans olarak

birbirleri ile karşılaştırırsak MSE ve MAE olarak ise Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Tablolar üzerinden doğrulama hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE olarak trainscg algoritması için 2 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp örnekleme yöntemi en başarılı sonuca sahipken, trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride monte carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. MAE olarak ise trainbr algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp örnekleme yöntemi en başarılı sonuca sahipken, trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride Monte Carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. Örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırırsak MSE ve MAE olarak Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

Ayrıca Latin Hiperküp örnekleme yöntemiyle elde edilmiş trainbr algoritmalı 2, 3 ve 4 gizli katmanlı sonuçlardan seçilen 2 tanesi için S_{11} (dB) parametresi grafik olarak Şekil 3A ve Şekil 3B'de gösterilmiştir. Grafiklerdeki hedef ve modellenen çizgilerin örtüşmesi sonucun başarılı olduğunu grafiksel olarak ispatlamaktadır.



Şekil 3. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 60 doğrulama datası içerisinde seçilen 2, 3 ve 4 gizli katmanlı “trainbr” algoritmalı ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) simülasyonu (a) lp=54, wp=88, l=112, w=109 (mm) (b) lp=69, wp=87, l=129, w=131 (mm) (S_{11} (dB) simulation, which is the result of MLP modeling with 2, 3 and 4 hidden layers “trainbr” algorithm, selected from 60 validation data out of 120 sample data created using the Latin Hypercube sampling method (a) lp=54, wp=88, l=112, w=109 (mm) (b) lp=69, wp=87, l=129, w=131 (mm))

4.2. Latin Hiperküp ve Monte Carlo Örnekleme Yöntemlerinin 80 Eğitim 40 Doğrulama Verisi için Performans Karşılaştırması (Performance Comparison of Latin Hypercube and Monte Carlo Sampling Methods for 80 Training 40 Validation Data)

Bu kısımda 80 eğitim ve 40 doğrulama datası olmak üzere toplamda 120 örnek data kullanılacaktır. Eğitim ve doğrulama veri seti detayları Tablo 2’de nümerik olarak verilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen Latin Hiperküp örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 7 ve Tablo 8’de verilmiştir. Monte Carlo örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 9 ve Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 7. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 40 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 40 validation data from 120 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,003933 | 0,385420 | 0,030196 | 0,119281 | 0,999370 | 0,015992 |
| | 10 15 20 | 0,001428 | 0,685734 | 0,021152 | 0,136972 | 0,999740 | 0,583285 |
| | 10 15 15 20 | 0,000998 | 0,507913 | 0,016822 | 0,139642 | 0,999857 | 0,673131 |
| trainlm | 15 20 | 0,003485 | 0,647510 | 0,029434 | 0,129251 | 0,999199 | 0,124453 |
| | 10 15 20 | 0,001880 | 0,992843 | 0,023302 | 0,132946 | 0,937151 | 0,220892 |
| | 10 15 15 20 | 0,000993 | 0,394939 | 0,017729 | 0,124124 | 0,979294 | 0,224632 |
| trainrp | 15 20 | 0,138789 | 0,147121 | 0,161003 | 0,198407 | 0,934455 | 0,868007 |
| | 10 15 20 | 0,060710 | 0,144877 | 0,116404 | 0,152284 | 0,909801 | 0,851061 |
| | 10 15 15 20 | 0,045614 | 0,220835 | 0,107138 | 0,159026 | 0,927236 | 0,694099 |
| trainscg | 15 20 | 0,072538 | 0,153040 | 0,120014 | 0,165059 | 0,959037 | 0,928693 |
| | 10 15 20 | 0,037040 | 0,128874 | 0,089257 | 0,114068 | 0,987568 | 0,761788 |
| | 10 15 15 20 | 0,022477 | 0,140121 | 0,073786 | 0,110155 | 0,992649 | 0,904612 |

Tablo 8. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 40 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 40 validation data from 120 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method, and average performances among 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,004585 | 13,75082 | 0,033413 | 0,228361 | 0,999489 | 0,726046 |
| | 10 15 20 | 0,001891 | 2,644887 | 0,023379 | 0,196905 | 0,999790 | 0,809997 |
| | 10 15 15 20 | 0,001042 | 2,554567 | 0,017548 | 0,208413 | 0,999884 | 0,823942 |
| trainlm | 15 20 | 0,005145 | 94,61056 | 0,035269 | 0,663166 | 0,999427 | 0,484484 |
| | 10 15 20 | 0,057190 | 75,57028 | 0,070630 | 0,701197 | 0,993436 | 0,552098 |
| | 10 15 15 20 | 0,031620 | 121,5421 | 0,083918 | 1,504551 | 0,996455 | 0,516331 |
| trainrp | 15 20 | 0,300752 | 0,424269 | 0,249937 | 0,290997 | 0,965973 | 0,952716 |
| | 10 15 20 | 0,169526 | 0,451246 | 0,176775 | 0,238819 | 0,980672 | 0,950263 |
| | 10 15 15 20 | 0,188475 | 0,895378 | 0,191922 | 0,366386 | 0,978503 | 0,901148 |
| trainscg | 15 20 | 0,153375 | 0,308190 | 0,174839 | 0,207016 | 0,982760 | 0,966075 |
| | 10 15 20 | 0,057242 | 0,715813 | 0,110606 | 0,165539 | 0,993612 | 0,923310 |
| | 10 15 15 20 | 0,038357 | 0,371930 | 0,092861 | 0,132661 | 0,995722 | 0,957607 |

Tablo 9. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 40 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 40 validation data from 120 sample data generated using the Monte Carlo sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

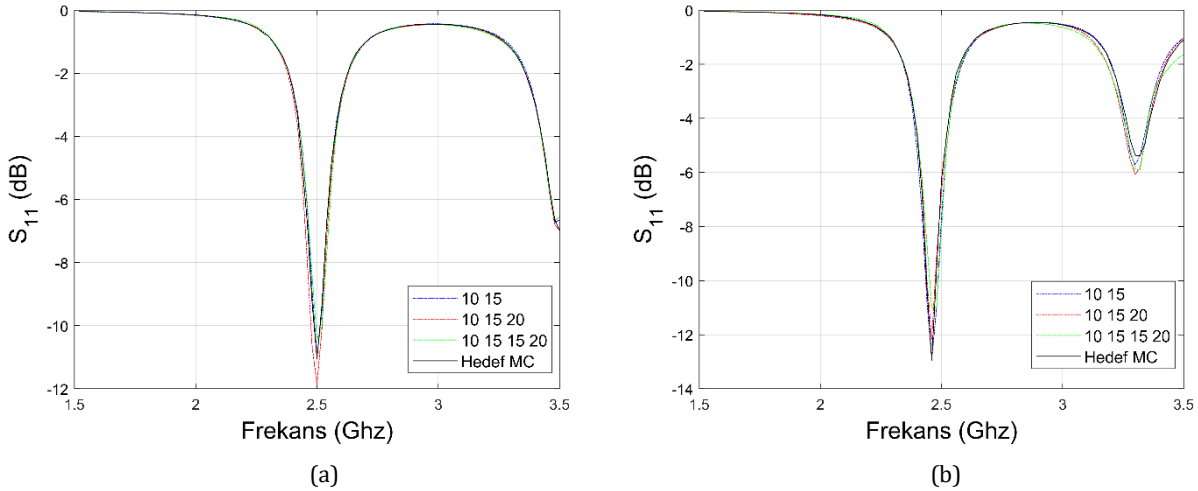
| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001898 | 0,025394 | 0,021124 | 0,060418 | 0,999623 | 0,990613 |
| | 10 15 20 | 0,001069 | 0,026984 | 0,017165 | 0,061214 | 0,999789 | 0,964204 |
| | 10 15 15 20 | 0,000998 | 0,063060 | 0,016280 | 0,081095 | 0,999865 | 0,939123 |
| trainlm | 15 20 | 0,002026 | 0,033453 | 0,021327 | 0,066231 | 0,999551 | 0,151974 |
| | 10 15 20 | 0,001182 | 0,053091 | 0,017726 | 0,074440 | 0,999791 | 0,924177 |
| | 10 15 15 20 | 0,000988 | 0,047050 | 0,016284 | 0,070968 | 0,999872 | 0,691523 |
| trainrp | 15 20 | 0,043964 | 0,038318 | 0,106944 | 0,115254 | 0,974435 | 0,960766 |
| | 10 15 20 | 0,019773 | 0,024613 | 0,065131 | 0,077623 | 0,980629 | 0,975262 |
| | 10 15 15 20 | 0,012991 | 0,019287 | 0,054340 | 0,065211 | 0,996063 | 0,974934 |
| trainscg | 15 20 | 0,018469 | 0,021077 | 0,063946 | 0,071418 | 0,995968 | 0,995406 |
| | 10 15 20 | 0,012208 | 0,015730 | 0,052254 | 0,055649 | 0,995859 | 0,995302 |
| | 10 15 15 20 | 0,006967 | 0,011902 | 0,037465 | 0,045570 | 0,994910 | 0,991838 |

Tablo 10. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 40 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 40 validation data from 120 sample data generated using the Monte Carlo sampling method and average performances among 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,002448 | 0,046752 | 0,023514 | 0,072579 | 0,999686 | 0,993892 |
| | 10 15 20 | 0,001321 | 0,115126 | 0,018879 | 0,088402 | 0,999830 | 0,985119 |
| | 10 15 15 20 | 0,001005 | 0,184657 | 0,016612 | 0,100020 | 0,999871 | 0,979430 |
| trainlm | 15 20 | 0,002491 | 111,9872 | 0,023935 | 0,400002 | 0,999680 | 0,882946 |
| | 10 15 20 | 0,001367 | 0,293139 | 0,018779 | 0,119649 | 0,999824 | 0,965502 |
| | 10 15 15 20 | 0,000997 | 1,256360 | 0,016946 | 0,144696 | 0,999872 | 0,944520 |
| trainrp | 15 20 | 0,102595 | 0,104201 | 0,153403 | 0,168428 | 0,986808 | 0,985924 |
| | 10 15 20 | 0,046683 | 0,060383 | 0,098521 | 0,109308 | 0,993980 | 0,991939 |
| | 10 15 15 20 | 0,021084 | 0,054416 | 0,071944 | 0,092636 | 0,997290 | 0,992758 |
| trainscg | 15 20 | 0,023872 | 0,026329 | 0,076088 | 0,081863 | 0,996930 | 0,996474 |
| | 10 15 20 | 0,017050 | 0,021851 | 0,064604 | 0,070574 | 0,997808 | 0,997085 |
| | 10 15 15 20 | 0,013648 | 0,021609 | 0,054652 | 0,063394 | 0,998246 | 0,997141 |

Verilen Tablo 7, Tablo 8, Tablo 9 ve Tablo 10'dan yola çıkarak eğitim hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE ve MAE olarak trainbr algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride Monte Carlo örnekleme yönteminde en başarılı sonuçların bulunduğu görülmektedir. Latin Hiperküp örnekleme yönteminde ise MSE olarak trainlm algoritmasında, MAE olarak ise trainbr algoritmasının daha başarılı sonuçlara sahip olduğu görülmektedir. Yine tablolardan örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırsak MSE olarak Latin Hiperküp örnekleme yönteminin, MAE olarak ise Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Tablolar üzerinden doğrulama hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE olarak trainscg algoritması için 3 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp örnekleme yöntemi en başarılı sonuca sahipken, trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride monte carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. MAE olarak ise trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. Örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırsak MSE ve MAE olarak Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

Ayrıca Monte Carlo örnekleme yöntemiyle elde edilmiş trainlm algoritmalı 2, 3 ve 4 gizli katmanlı sonuçlardan seçilen 2 tanesi için S_{11} (dB) parametresi grafik olarak Şekil 4A ve Şekil 4B'de gösterilmiştir. Grafiklerdeki hedef ve modellenen çizgilerin benzerliği bu kısımda da gözükmemektedir.



Şekil 4. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 40 doğrulama datası içerisinde seçilen 2, 3 ve 4 gizli katmanlı "trainlm" algoritmalı ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) simülasyonu (a) lp=57, wp=83, l=119, w=110 (mm) (b) lp=58, wp=88, l=121, w=98 (mm) (S_{11} (dB) simülasyonu, which is the result of MLP modeling with 2, 3 and 4 hidden layers "trainlm" algorithm, selected from 40 validation data out of 120 sample data created using Monte Carlo sampling method (a) lp=57, wp=83, l=119, w=110 (mm) (b) lp=58, wp=88, l=121, w=98 (mm))

4.3. Latin Hiperküp ve Monte Carlo Örnekleme Yöntemlerinin 50 Eğitim 50 Doğrulama Verisi için Performans Karşılaştırması (Performance Comparison of Latin Hypercube and Monte Carlo Sampling Methods for 50 Training 50 Validation Data)

Bu kısımda 50 eğitim ve 50 doğrulama datası olmak üzere toplamda 100 örnek data kullanılacaktır. Eğitim ve doğrulama veri seti detayları Tablo 2’de nümerik olarak verilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen Latin Hiperküp örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 11 ve Tablo 12’de, Monte Carlo örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 13 ve Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 11. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 50 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 50 validation data out of 100 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001585 | 2,333636 | 0,022464 | 0,349488 | 0,999672 | 0,231354 |
| | 10 15 20 | 0,000995 | 1,706196 | 0,017123 | 0,208349 | 0,999830 | 0,533939 |
| | 10 15 15 20 | 0,000995 | 1,557427 | 0,016606 | 0,253581 | 0,999872 | 0,548605 |
| trainlm | 15 20 | 0,001309 | 7,068730 | 0,020976 | 0,328642 | 0,997540 | 0,197531 |
| | 10 15 20 | 0,000996 | 0,896049 | 0,017822 | 0,266908 | 0,984509 | 0,177188 |
| | 10 15 15 20 | 0,000997 | 3,766801 | 0,019065 | 0,643363 | 0,816500 | 0,026961 |
| trainrp | 15 20 | 0,172894 | 0,557929 | 0,182967 | 0,307520 | 0,878103 | 0,673983 |
| | 10 15 20 | 0,061052 | 0,722574 | 0,114141 | 0,242127 | 0,928834 | 0,501273 |
| | 10 15 15 20 | 0,087372 | 0,878676 | 0,140899 | 0,395197 | 0,874162 | 0,305786 |
| trainscg | 15 20 | 0,089749 | 0,325379 | 0,142042 | 0,219289 | 0,958302 | 0,905458 |
| | 10 15 20 | 0,019838 | 0,227184 | 0,072324 | 0,137911 | 0,984989 | 0,927619 |
| | 10 15 15 20 | 0,019329 | 0,314340 | 0,069508 | 0,168582 | 0,995866 | 0,668651 |

Tablo 12. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 50 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 50 validation data out of 100 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method and average performances within 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,002045 | 16,18066 | 0,025745 | 0,486400 | 0,999738 | 0,620771 |
| | 10 15 20 | 0,001030 | 6,287330 | 0,018091 | 0,383860 | 0,999868 | 0,737979 |
| | 10 15 15 20 | 0,000999 | 9,208221 | 0,017442 | 0,420673 | 0,999872 | 0,722814 |
| trainlm | 15 20 | 0,004260 | 142,2027 | 0,034630 | 1,011339 | 0,999453 | 0,399249 |
| | 10 15 20 | 0,017270 | 742,0637 | 0,061437 | 3,249868 | 0,997772 | 0,476083 |
| | 10 15 15 20 | 0,134075 | 1538,540 | 0,099892 | 6,129165 | 0,981118 | 0,300158 |
| trainrp | 15 20 | 0,446364 | 1,724528 | 0,339359 | 0,721611 | 0,940749 | 0,828826 |
| | 10 15 20 | 0,232362 | 5,715165 | 0,222861 | 0,634925 | 0,969580 | 0,791798 |
| | 10 15 15 20 | 0,301587 | 25,65133 | 0,268356 | 0,976683 | 0,960062 | 0,623100 |
| trainscg | 15 20 | 0,160376 | 0,688733 | 0,186898 | 0,294752 | 0,979160 | 0,935194 |
| | 10 15 20 | 0,049122 | 0,487672 | 0,104394 | 0,194591 | 0,993675 | 0,956274 |
| | 10 15 15 20 | 0,025658 | 1,233003 | 0,083262 | 0,241400 | 0,996704 | 0,893627 |

Tablo 13. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 50 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 50 validation data from 100 sample data generated using the Monte Carlo sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

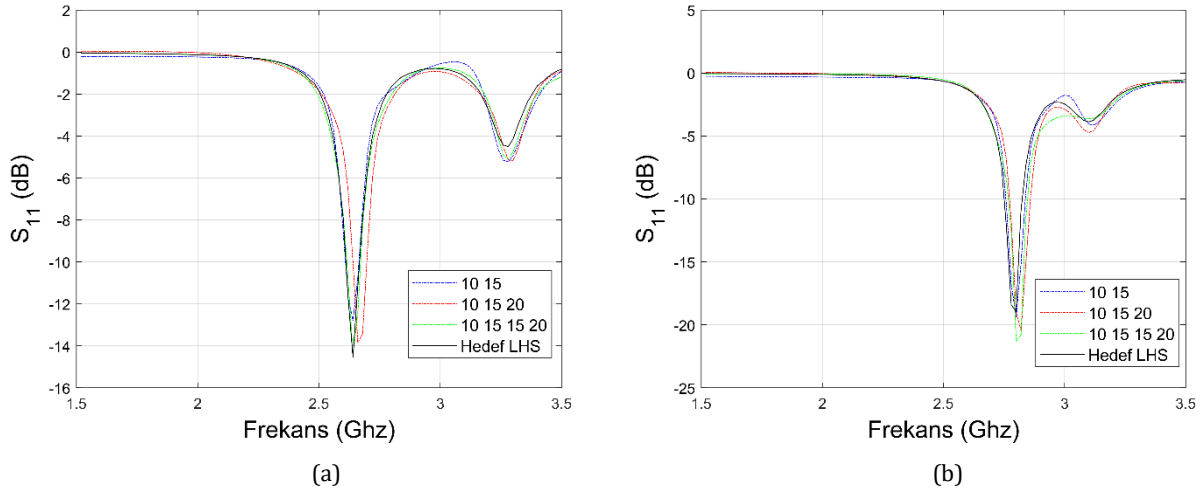
| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001000 | 0,061366 | 0,016683 | 0,089762 | 0,999837 | 0,958224 |
| | 10 15 20 | 0,000991 | 0,062696 | 0,015678 | 0,079976 | 0,999867 | 0,969483 |
| | 10 15 15 20 | 0,000994 | 0,044752 | 0,015575 | 0,074735 | 0,999872 | 0,980504 |
| trainlm | 15 20 | 0,000998 | 0,029041 | 0,016895 | 0,064791 | 0,992677 | 0,127467 |
| | 10 15 20 | 0,000994 | 0,058094 | 0,015964 | 0,077985 | 0,280952 | 0,064943 |
| | 10 15 15 20 | 0,000979 | 0,090526 | 0,015929 | 0,104591 | 0,999848 | 0,170217 |
| trainrp | 15 20 | 0,049709 | 0,057373 | 0,103332 | 0,129045 | 0,952535 | 0,725290 |
| | 10 15 20 | 0,014054 | 0,027980 | 0,063896 | 0,080441 | 0,975563 | 0,860686 |
| | 10 15 15 20 | 0,011397 | 0,025918 | 0,051620 | 0,073160 | 0,981948 | 0,814580 |
| trainscg | 15 20 | 0,016816 | 0,025738 | 0,065055 | 0,082955 | 0,995021 | 0,992125 |
| | 10 15 20 | 0,008972 | 0,019613 | 0,046257 | 0,064350 | 0,997112 | 0,993617 |
| | 10 15 15 20 | 0,005937 | 0,014702 | 0,039023 | 0,056149 | 0,995639 | 0,985060 |

Tablo 14. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 50 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 50 validation data out of 100 sample data generated using Monte Carlo sampling method and average performances within 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001131 | 0,147042 | 0,017825 | 0,131049 | 0,999855 | 0,981920 |
| | 10 15 20 | 0,001002 | 0,106380 | 0,016375 | 0,097173 | 0,999872 | 0,986572 |
| | 10 15 15 20 | 0,000997 | 0,088398 | 0,016180 | 0,096135 | 0,999872 | 0,988817 |
| trainlm | 15 20 | 0,006694 | 24,93457 | 0,031253 | 0,518730 | 0,999141 | 0,682751 |
| | 10 15 20 | 0,360822 | 0,745635 | 0,132281 | 0,259787 | 0,927980 | 0,867912 |
| | 10 15 15 20 | 0,001015 | 166,3106 | 0,018902 | 1,542591 | 0,999870 | 0,671264 |
| trainrp | 15 20 | 0,180577 | 0,833575 | 0,200131 | 0,412123 | 0,976583 | 0,898809 |
| | 10 15 20 | 0,071810 | 0,306512 | 0,125501 | 0,221286 | 0,990749 | 0,959279 |
| | 10 15 15 20 | 0,046469 | 0,559031 | 0,098857 | 0,252120 | 0,994027 | 0,932137 |
| trainscg | 15 20 | 0,023641 | 0,038412 | 0,075898 | 0,095058 | 0,996971 | 0,994933 |
| | 10 15 20 | 0,014456 | 0,030737 | 0,060377 | 0,078102 | 0,998149 | 0,995941 |
| | 10 15 15 20 | 0,012841 | 0,044033 | 0,057041 | 0,083581 | 0,998355 | 0,994206 |

Verilen Tablo 11, Tablo 12, Tablo 13 ve Tablo 14'den yola çıkarak eğitim hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE ve MAE olarak trainbr algoritması için Latin Hiperküp örnekleme yönteminde en başarılı sonuçların bulunduğu görülmektedir. Monte Carlo örnekleme yönteminde ise MSE olarak trainlm algoritmasında, MAE olarak ise trainbr algoritmasının daha başarılı sonuçlara sahip olduğu görülmektedir. Yine tablolardan örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırsak MSE olarak aynı MAE olarak ise Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Tablolar üzerinden doğrulama hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE olarak trainscg algoritması için 3 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp örnekleme yöntemi en başarılı sonuca sahipken, trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride monte carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. MAE olarak ise trainscg algoritması her iki örnekleme yönteminde en başarılı sonuçların bulunduğu görülmektedir. Örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırsak MSE ve MAE olarak Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

Ayrıca Latin Hiperküp örnekleme yöntemiyle elde edilmiş trainscg algoritmalı 2, 3 ve 4 gizli katmanlı sonuçlardan seçilen 2 tanesi için S₁₁ (dB) parametresi grafik olarak Şekil 5A ve Şekil 5B'de gösterilmiştir. Bu kısımdaki grafiklerde hedef ve modellenen çizgilerin örtüşmesi önceki bölümlere göre daha azdır.



Şekil 5. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 50 doğrulama datası içerisinde seçilen 2, 3 ve 4 gizli katmanlı “trainscg” algoritmali ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) simülasyonu (a) $l_p=54$, $w_p=89$, $l=137$, $w=103$ (mm) (b) $l_p=51$, $w_p=94$, $l=112$, $w=107$ (mm) (S_{11} (dB) simulation, which is the result of MLP modeling with 2, 3 and 4 hidden layers “trainscg” algorithm selected from 50 validation data out of 100 sample data created using the Latin Hypercube sampling method (a) $l_p=54$, $w_p=89$, $l=137$, $w=103$ (mm) (b) $l_p=51$, $w_p=94$, $l=112$, $w=107$ (mm))

4.4. Latin Hiperküp ve Monte Carlo Örnekleme Yöntemlerinin 67 Eğitim 33 Doğrulama Verisi için Performans Karşılaştırması (Performance Comparison of Latin Hypercube and Monte Carlo Sampling Methods for 67 Training 33 Validation Data)

Bu kısımda 63 eğitim ve 33 doğrulama datası olmak üzere toplamda 100 örnek data kullanılacaktır. Eğitim ve doğrulama veri seti detayları Tablo 2’de nümerik olarak verilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen Latin Hiperküp örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 15 ve Tablo 16’da, Monte Carlo örnekleme yöntemi için 10 koşu arasından en iyi ve ortalama performans karşılaştırması sırası ile Tablo 17 ve Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 15. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 33 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 33 validation data out of 100 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,002456 | 1,006949 | 0,026458 | 0,190577 | 0,999551 | 0,233098 |
| | 10 15 20 | 0,000999 | 0,863909 | 0,018016 | 0,171344 | 0,999752 | 0,472788 |
| | 10 15 15 20 | 0,000998 | 0,744676 | 0,016850 | 0,162948 | 0,999882 | 0,304711 |
| trainlm | 15 20 | 0,002638 | 2,576331 | 0,027338 | 0,195523 | 0,792954 | 0,202279 |
| | 10 15 20 | 0,001227 | 1,384747 | 0,019574 | 0,196208 | 0,982330 | 0,051905 |
| | 10 15 15 20 | 0,000998 | 1,098765 | 0,017763 | 0,207815 | 0,998606 | 0,146731 |
| trainrp | 15 20 | 0,129964 | 0,203759 | 0,158063 | 0,221754 | 0,940247 | 0,926071 |
| | 10 15 20 | 0,059178 | 0,123458 | 0,104575 | 0,131629 | 0,943105 | 0,717244 |
| | 10 15 15 20 | 0,023770 | 0,136946 | 0,077702 | 0,154237 | 0,957999 | 0,597428 |
| trainscg | 15 20 | 0,082545 | 0,177199 | 0,128622 | 0,171219 | 0,977717 | 0,915898 |
| | 10 15 20 | 0,031319 | 0,128665 | 0,084448 | 0,130037 | 0,988102 | 0,908936 |
| | 10 15 15 20 | 0,021335 | 0,197761 | 0,072470 | 0,124540 | 0,992639 | 0,867694 |

Tablo 16. Latin Hiperküp örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 33 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 33 validation data out of 100 sample data generated using the Latin Hypercube sampling method and average performances among 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,003152 | 9,295719 | 0,029142 | 0,286493 | 0,999626 | 0,578046 |
| | 10 15 20 | 0,001408 | 8,261951 | 0,020604 | 0,299841 | 0,999833 | 0,711752 |
| | 10 15 15 20 | 0,000999 | 3,504052 | 0,017474 | 0,257282 | 0,999882 | 0,797369 |
| trainlm | 15 20 | 0,159885 | 52,51200 | 0,101125 | 0,619414 | 0,978909 | 0,500023 |
| | 10 15 20 | 0,016328 | 113,1161 | 0,043864 | 1,163718 | 0,998049 | 0,607944 |
| | 10 15 15 20 | 0,002884 | 1942,713 | 0,030793 | 3,583872 | 0,999658 | 0,574024 |
| trainrp | 15 20 | 0,236083 | 0,364087 | 0,220032 | 0,285764 | 0,971713 | 0,959522 |
| | 10 15 20 | 0,154508 | 0,692181 | 0,169545 | 0,270353 | 0,981425 | 0,927013 |
| | 10 15 15 20 | 0,140619 | 1,155512 | 0,169647 | 0,385215 | 0,983103 | 0,874696 |
| trainscg | 15 20 | 0,123413 | 0,320150 | 0,156441 | 0,206112 | 0,985271 | 0,965468 |
| | 10 15 20 | 0,063031 | 0,352947 | 0,114308 | 0,167413 | 0,992505 | 0,961216 |
| | 10 15 15 20 | 0,037446 | 0,445158 | 0,093472 | 0,154624 | 0,995555 | 0,951359 |

Tablo 17. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 33 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde en iyi performansların karşılaştırması (Comparison of 33 validation data out of 100 sample data generated using the Monte Carlo sampling method and the best performances out of 10 runs for MLP modeling)

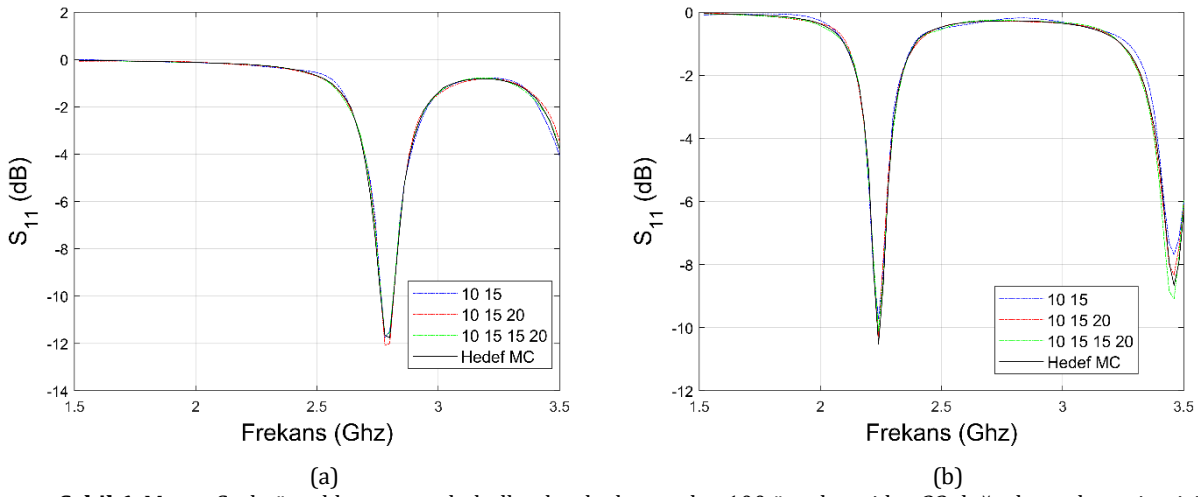
| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001637 | 0,037076 | 0,020367 | 0,070632 | 0,999744 | 0,856150 |
| | 10 15 20 | 0,000999 | 0,041839 | 0,016082 | 0,065080 | 0,999825 | 0,967785 |
| | 10 15 15 20 | 0,000997 | 0,044214 | 0,016217 | 0,072575 | 0,999872 | 0,976190 |
| trainlm | 15 20 | 0,001382 | 0,067309 | 0,019376 | 0,086141 | 0,999675 | 0,938985 |
| | 10 15 20 | 0,000999 | 0,084011 | 0,015882 | 0,085029 | 0,999654 | 0,849073 |
| | 10 15 15 20 | 0,000991 | 0,099057 | 0,016134 | 0,096517 | 0,993428 | 0,181333 |
| trainrp | 15 20 | 0,044324 | 0,041718 | 0,101561 | 0,115132 | 0,952361 | 0,928530 |
| | 10 15 20 | 0,017365 | 0,024819 | 0,064081 | 0,079914 | 0,996160 | 0,993482 |
| | 10 15 15 20 | 0,011500 | 0,022744 | 0,055728 | 0,073306 | 0,996430 | 0,988059 |
| trainscg | 15 20 | 0,012346 | 0,021273 | 0,056525 | 0,071212 | 0,990393 | 0,987929 |
| | 10 15 20 | 0,009564 | 0,019689 | 0,046992 | 0,060763 | 0,996922 | 0,994757 |
| | 10 15 15 20 | 0,007089 | 0,014139 | 0,041558 | 0,051128 | 0,998653 | 0,995267 |

Tablo 18. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 33 doğrulama datası ile ÇKA modellemesi için 10 koşu içerisinde ortalama performansların karşılaştırması (Comparison of 33 validation data out of 100 sample data generated using Monte Carlo sampling method and average performances among 10 runs for MLP modeling)

| Algoritma | Mimari | Eğitim Hata (MSE) | Doğrulama Hata (MSE) | Eğitim Hata (MAE) | Doğrulama Hata (MAE) | Eğitim Hata (R ²) | Doğrulama Hata (R ²) |
|-----------|-------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| trainbr | 15 20 | 0,001803 | 0,235575 | 0,021522 | 0,092728 | 0,999770 | 0,978725 |
| | 10 15 20 | 0,001111 | 0,125718 | 0,017228 | 0,104786 | 0,999858 | 0,984450 |
| | 10 15 15 20 | 0,000999 | 0,134136 | 0,016691 | 0,103023 | 0,999873 | 0,983951 |
| trainlm | 15 20 | 0,001844 | 0,222549 | 0,021850 | 0,109668 | 0,999765 | 0,972786 |
| | 10 15 20 | 0,001299 | 0,398032 | 0,018834 | 0,154045 | 0,999834 | 0,953409 |
| | 10 15 15 20 | 0,006668 | 334,1354 | 0,036147 | 2,103498 | 0,999147 | 0,670303 |
| trainrp | 15 20 | 0,134018 | 0,164554 | 0,160512 | 0,190653 | 0,982679 | 0,977327 |
| | 10 15 20 | 0,022331 | 0,033846 | 0,073418 | 0,086883 | 0,997148 | 0,995471 |
| | 10 15 15 20 | 0,017854 | 0,049051 | 0,067786 | 0,093423 | 0,997720 | 0,993500 |
| trainscg | 15 20 | 0,028605 | 0,036123 | 0,082779 | 0,093406 | 0,996342 | 0,995131 |
| | 10 15 20 | 0,013348 | 0,026543 | 0,057253 | 0,072128 | 0,998295 | 0,996467 |
| | 10 15 15 20 | 0,008866 | 0,021838 | 0,046537 | 0,062273 | 0,998868 | 0,997069 |

Verilen Tablo 15, Tablo 16, Tablo 17 ve Tablo 18'den yola çıkarak eğitim hata sonuçlarını her örnekleme yönteminin kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE ve MAE olarak trainbr algoritması için Latin Hiperküp örnekleme yönteminde en başarılı sonuçların bulunduğu görülmektedir. Monte Carlo örnekleme yönteminde ise MSE ve MAE olarak ise trainlm algoritmasının daha başarılı sonuçlara sahip olduğu görülmektedir. Yine tablolardan örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırsak MSE olarak aynı MAE olarak ise Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Tablolar üzerinden doğrulama hata sonuçlarını her örnekleme yöntemini kendi içinde karşılaştıracak olursak, MSE olarak trainrp algoritması için 3 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp örnekleme yöntemi en başarılı sonuca sahipken, trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride Monte Carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. MAE olarak ise trainscg algoritması için 4 gizli katmana sahip mimaride Latin Hiperküp ve Monte Carlo örnekleme en başarılı sonuca sahiptir. Örnekleme yöntemlerini performans olarak birbirleri ile karşılaştırsak MSE ve MAE olarak Monte Carlo örnekleme yönteminin daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

Ayrıca Monte Carlo örnekleme yöntemiyle elde edilmiş trainrp algoritmalı 2, 3 ve 4 gizli katmanlı sonuçlardan seçilen 2 tanesi için S_{11} (dB) parametresi grafik olarak Şekil 6A ve Şekil 6B'de gösterilmiştir. Verilen grafiklerdeki hedef ve modellenen çizgilerin örtüşmesi bir önceki bölüme göre daha iyidir.



Şekil 6. Monte Carlo örnekleme metodu kullanılarak oluşturulan 100 örnek veriden 33 doğrulama datası içerisinde seçilen 2, 3 ve 4 gizli katmanlı "trainrp" algoritmalı ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) simülasyonu (a) $l_p=51$, $w_p=81$, $l=134$, $w=132$ (mm) (b) $l_p=64$, $w_p=84$, $l=121$, $w=115$ (mm) (S_{11} (dB) simulation, which is the result of MLP modeling with 2, 3 and 4 hidden layers "trainrp" algorithm selected from 33 validation data out of 100 sample data created using Monte Carlo sampling method (a) $l_p=51$, $w_p=81$, $l=134$, $w=132$ (mm) (b) $l_p=64$, $w_p=84$, $l=121$, $w=115$ (mm))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, YSA modellemesi için farklı örnekleme metotlarının performansları anten optimizasyon tasarım problemlerinde sıkça kullanılan model olan ÇKA kullanılarak mikroşerit yama anten üzerinde performans karşılaştırılması yapılmıştır. Seçilen model toplamda 6 parametreye sahiptir. Bunlardan 5 tanesi giriş, 1 tanesi ise çıkış parametresidir. Parametre sayısının yüksek olması problemin zorluğunu arttırmıştır. Toplamda 12 farklı ağ kullanılmıştır. Bunlar 3 algoritma ve 4 mimariden oluşmaktadır. Kullanılan yapılar literatür taramasında karşılaşılan başarılı bir çalışmaya dayandırılarak seçilmiştir (Mahouti, 2019). Seçilen en başarılı örnekleme metodunun başarısı çok sayıda farklı ağ kullanılarak da test edilmiştir. Literatür taramasında karşılaşılan en düşük örnek sayısı 144 olarak tespit edilmiştir (Akdağlı, vd., 2015). Ayrıca tüm örnek sayısı içerisinde doğrulama veri sayısı oranı %7,2'dir (Akdağlı, vd., 2015). Yapılan çalışmada ise bahsedilen literatür örneklerinden daha düşük bir sayıda örnekleme boyutu olarak 120 ve 100 seçilmiştir. Doğrulama veri sayısı oranı ise yine bahsedilen literatür örneklerinden daha yüksek olacak şekilde %50 ve %33 olarak tercih edilmiştir. Böylelikle doğrulama hata gerçekliği tesadüfi olmadığı daha net bir şekilde teyit edilmektedir. Örnekleme metodunun başarısının sadece belirli bir sayı ile kısıtlı olmadığını göstermek için 4 farklı sayıda eğitim ve doğrulama veri seti kullanılarak performans karşılaştırılması ile kesin olarak teyit edilmiştir. Ek olarak tüm modelleme işlemleri 1 dakikanın altı bir sürede gerçekleşmiştir. En kısa optimizasyon süresi 10 saniye ve en uzun optimizasyon süresi ise 58 saniye sürmüştür. Performans değerlendirmesinde yine literatürdekilere benzer olarak ortalama kare hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve korelasyon katsayısı (R2) kullanılmıştır. Ayrıca her bölümde bir algoritma için seçilen bazı sonuçlar grafik olarak gösterilmiştir. Tüm sonuçlar göz önüne alındığında Monte Carlo örnekleme yöntemi bu işte daha iyi uygulanabilirliğe sahip olduğu gözükmektedir. Buradan Monte Carlo örnekleme yöntemini bu tarz bir modelleme için kullanılacak olan veri setini oluşturmada bir efekt algoritması olarak kabul

edilebilir. Dolayısı ile farklı modelleme problemlerinde veri seti oluşturmada Monte Carlo örnekleme yöntemini direk olarak tercih edilebilir ve bu çalışma referans olarak gösterilebilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Chávez-Hurtado, J. L., Rayas-Sánchez, J. E., Brito-Brito, Z., 2016. Multiphysics polynomial-based surrogate modeling of microwave structures in frequency domain. IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC).
- Rayas-Sánchez, J. E., Chávez-Hurtado, J. L., Brito-Brito, Z., 2015. Enhanced formulation for polynomial-based surrogate modeling of microwave structures in frequency domain. IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO).
- Rayas-Sánchez, J. E., Vargas-Chávez, N., 2010. Design optimization of microstrip lines with via fences through surrogate modeling based on polynomial functional interpolants. 19th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems, 125-128.
- Rayas-Sánchez, J. E., Aguilar-Torrentera, J., Jasso-Urzúa, J. A., 2010. Surrogate modeling of microwave circuits using polynomial functional interpolants. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 197-200.
- Khusro, A., Hashmi, M. S., Ansari, A. Q., 2018. Exploring Support Vector Regression for Modeling of GaN HEMT. IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC).
- Güneş F., Demirel S., Mahouti P., 2014. Design of a Front-End Amplifier for the Maximum Power Delivery and Required Noise by HBMO with Support Vector Microstrip Model. Radioengineering, 23(1).
- Geng, L., Gao, X., 2014. Support vector machine dynamic modeling method and its application in the fermentation process. The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), 4478-4482.
- Jacobs, J. P., Koziel, S., Ogurtsov, S., 2013. Computationally Efficient Multi-Fidelity Bayesian Support Vector Regression Modeling of Planar Antenna Input Characteristics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 61(2), 980-984.
- Tokan, N. T., Güneş, F., 2008. Analysis and Synthesis of the Microstrip Lines Based on Support Vector Regression. 38th European Microwave Conference, 1473-1476.
- Yuan, L., Yang, X-S., Wang, C., Wang, B-Z., 2020. Multibranch Artificial Neural Network Modeling for Inverse Estimation of Antenna Array Directivity. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 68(6), 4417-4427.
- Xiao, L-Y., Shao, W., Jin, F-L., Wang, B-Z., 2018. Multiparameter Modeling with ANN for Antenna Design. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 66(7), 3718-3723.
- Kapetanakis, T. N., Vardiambasis, I. O., Ioannidou, M. P., Maras, A., 2018. Neural Network Modeling for the Solution of the Inverse Loop Antenna Radiation Problem. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 66(11), 6283-6290.
- Xiao, L-Y., Shao, W., Jin, F-L., Wang, B-Z., Liu, Q. H., 2021. Inverse Artificial Neural Network for Multiobjective Antenna Design. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(10), 6651-6659.
- Mahouti, P., Güneş, F., Belen, M. A., Demirel, S., 2017. Symbolic Regression for Derivation of an Accurate Analytical Formulation using "Big Data" An Application Example. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 32(5), 372-380.
- Uluslu, A., 2021. Rekabetçi Evrimsel Algoritmalar ile Yuvarlak Papyon Anten Tasarımı. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 12(4), 551-564, DOI: 10.24012/dumf.1001870.
- Uluslu, A., 2021. Triangular Bowtie Antenna Design and Modelling - Research & Reviews in Engineering. Gece Kitaplığı Yayınevi, 93-106.
- Güneş, F., Mahouti, P., Demirel, S., Belen, M. A., Uluslu, A., 2017. Cost-effective GRNN-based modeling of microwave transistors with a reduced number of measurements. International journal of numerical modelling: electronic networks, devices and fields, 30(3-4).
- Mahouti, P., Güneş, F., Demirel, S., Uluslu, A., Belen, M. A., 2014. Efficient scattering parameter modeling of a microwave transistor using Generalized Regression Neural Network. 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON).
- Liu, B., Yang, H., Lancaster, M. J., 2018. Synthesis of coupling matrix for duplexers based on a self-adaptive differential evolution algorithm. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 66(2), 813-821.
- Uluslu, A., 2021. Süper Geniş Bantlı Antenin Uygun Maliyetli MLP Tabanlı Modellenmesi. 4th International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA), 1(21), 138-141.
- Mahouti, M., Kuşkonmaz, N., Mahouti, P., Belen M. A., Palandoken, M., 2020. Artificial neural network application for novel 3D printed nonuniform ceramic reflectarray antenna. International journal of numerical modelling: electronic networks, devices and fields, 33(6).
- Uluslu, A., 2021. Design of Microstrip Filter by Modeling with Reduced Data. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), 36(11), 1453-1459.
- Calik, N., Belen, M. A., Mahouti, P., 2019. Deep learning base modified MLP model for precise scattering parameter prediction of capacitive feed antenna. International journal of numerical modelling: electronic networks, devices and fields, 33(2).
- Mahouti, P., 2019. Design optimization of a pattern reconfigurable microstrip antenna using differential evolution and 3D EM simulation-based neural network model. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 29(8).
- Lei, G.Y., 2003. Study on Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods, Zhejiang Province.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J., 1979. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, 21(2), 239-245.
- Uluslu, A., 2021. Microstrip Low Pass Filter Analysis and Design. Research & Reviews in Engineering- Gece Kitaplığı Yayınevi, 35-52.

- Mahouti, T., Yıldırım, T., Kuşkonmaz, N., 2021. Artificial intelligence-based design optimization of nonuniform microstrip line band pass filter. *International Journal of Numerical Modelling*.
- Mahouti, T., Kuşkonmaz, N., Yıldırım, T., 2019. Modelling of Non-Planar Microstrip Lines via Artificial Neural Networks. *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*.
- Bose, T., Gupta, N., 2012. Design of an aperture-coupled microstrip antenna using a hybrid neural network. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 6(4), 470-474.
- Akdagli, A., Toktas, A., Kayabasi, A., Develi, İ., 2013. An Application of Artificial Neural Network to Compute the Resonant Frequency of E-Shaped Compact Microstrip Antennas. *Journal of Electrical Engineering*, 64(5), 317-322.
- Kayabasi, A., Toktas, A., Akdagli, A., Mustafa B. Bicer, B.M., Ustun, D., 2014. Applications of ANN and ANFIS to Predict the Resonant Frequency of L-Shaped Compact Microstrip Antennas. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 29(6), 460-469.
- Kayabasi, A., Akdagli, A., 2015. A Comparative Study on ANN, ANFIS and SVM Methods for Computing Resonant Frequency of A-Shaped Compact Microstrip Antennas. *17th International Conference on Communication and Information Technology and Engineering*, 9(8).
- Vuran, S., 2016. Dikdörtgen mikroşerit antenin rezonans frekansının hesaplanmasında yapay sinir ağı ve destek vektör makinası yöntemlerinin karşılaştırılması. Yüksek lisans tez.
- Uluslu, A., 2021. Kültürel Algoritma Tabanlı 24 GHz ISM Bant Uygulamaları için H Şeklinde Yama Anten Tasarımı. *10th Union Radio-Scientifique Internationale/International Union of Radio Science (URSI'2021)*.
- Uluslu, A., 2021. Triangular Patch Antenna Optimization for 77 GHz Automotive Radar Based on Genetic Algorithm. *II. International Conference on Innovative Engineering Applications (CIEA'2021)*.
- Balanis, C.A., 1982. *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley and Sons, Arizona State University, 4-6.
- Safran, M.I., Aydın, E., 2006. *Pek Geniş Bant Anten Tasarımı ve İmalatı*, Atılım Üniversitesi.
- Hossain, F., Anagnostou, E. N., Bagtzoglou, A. C., 2005. On Latin Hypercube sampling for efficient uncertainty estimation of satellite rainfall observations in flood prediction, 32, 776-792.
- Wan, Y., Lv, Z. Z., Yuan, X. K., 2008. Latin Hypercube sampling and updated Latin Hypercube sampling method for reliability sensitivity and its variance analysis, 30(6), 927-934.
- Wei, Q., Lu, W. X., Tian, Z. J., 2004. Application of Monte-Carlo to annual precipitation forecast. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 4(18), 144-146.
- Jin, C., 2005. Study on random number generator and random sampling in Monte Carlo method. *Dalian University of Technology*.
- Zhou, Y., 1997. Study of Sampling Methods in Monte Carlo Simulation. *Structure Environment Engineering*, (3), 14-18.
- Şen, Z., 2004. *Yapay Sinir Ağları İlkeleri*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.



BETON DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY TEPKİ YÖNTEMİ, GENETİK ALGORİTMA VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNİ

Ebru BAŞPINAR TUNCAY ^{1*}, Ekin KÖKEN ², Şemsettin KILINÇARSLAN ³

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|--|--|
| <i>Beton Dayanımı, Agregası, Yüzey Tepki Yöntemi, Genetik Algoritma, Yapay Sinir Ağları.</i> | Bu çalışmada, beton dayanım özellikleri yüzey tepki yöntemi, genetik algoritma ve yapay sinir ağları yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Altı farklı beton agregası kullanılarak küp (10x10x10 cm) ve prizmatik (15x15x60 cm) beton numuneleri hazırlanmış ve beton tek eksenli basınç dayanımı (UCS _c) ve eğilme dayanımının (FS _c) tahmin edilmesi için bazı modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde beton yoğunluğu (ρ_c), beton agregalarının Los Angeles aşınma kaybı (LAA) ve betonlara ait P dalgası hızı (V_{pc}) gibi parametreler kullanılmıştır. Elde edilen modellerin performansları bazı istatistiksel göstergeler ışığında değerlendirilmiş olup genetik algoritma ve yapay sinir ağlarını temel alan yöntemlerin beton dayanım özelliklerini tahmininde başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. |

ESTIMATION OF CONCRETE STRENGTH PROPERTIES THROUGH THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY, GENETIC ALGORITHM, AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

| Keywords | Abstract |
|---|--|
| <i>Concrete Strength, Aggregate, Response Surface Methodology, Genetic Algorithm, Artificial Neural Networks.</i> | In this study, concrete strength properties were estimated by surface response method, genetic algorithm, and artificial neural network methods. Cubic (10x10x10 cm) and prismatic (15x15x60 cm) concrete samples were prepared using six different concrete aggregates, and some models were developed to estimate the uniaxial compressive strength (UCS _c) and flexural strength (FS _c) of concrete. In the developed models, parameters such as concrete density (ρ_c), Los Angeles abrasion loss of concrete aggregates (LAA), and P wave velocity (V_{pc}) of concretes were used. The performances of the models obtained were evaluated in the light of some statistical indicators, and it was determined that methods based on genetic algorithms and artificial neural networks could be successfully used to estimate the concrete strength properties. |

Alıntı / Cite

Tuncay Başpınar, E., Köken, E., Kılınçarslan, Ş., (2022). Beton Dayanımının Yüzey Tepki Yöntemi Genetik Algoritma ve Yapay Sinir Ağları ile Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 429-441.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Başpınar Tuncay, 0000-0001-9416-9576

E. Köken, 0000-0003-0178-329X

Ş. Kılınçarslan, 0000-0001-8253-9357

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 22.10.2022

Revizyon Tarihi / Revision Date 09.02.2022

Kabul Tarihi / Accepted Date 13.02.2022

Yayın Tarihi / Published Date 30.06.2022

1. Giriş (Introduction)

Düşük üretim maliyeti ve yüksek tasarım esnekliğine sahip olan beton, günümüzün en sık kullanılan yapı malzemelerinden bir tanesidir. Genel olarak beton; çimento, boyutlandırılmış agrega ve sudan oluşan kompozit bir malzeme olarak tanımlanmakta olup, çeşitli tasarım özelliklerine göre farklı zamanlarda katılaşabilen,

* İlgili yazar / Corresponding author: ebrubaspınar@sdu.edu.tr, +90-246-211-1331

sertleşebilen ve mukavemet kazanabilen bir yapıya sahiptir (Nilson vd., 2010; Panzera vd., 2011; Özçep vd., 2012; Asutkar vd., 2017; Sun vd., 2019; Feng vd., 2020). Betonun genel kalitesini, yansıtan en önemli özelliklerden bir tanesi tek eksenli basınç dayanımı olup, mühendislik yapılarının güvenliği ile doğrudan ilişkilidir (Deng vd., 2018). Mühendislik yapılarında istenilen beton kalitesi için gerekli deneysel çalışmalarda agrega, çimento, kullanılan ekipman, iş gücü ve kalitesi, maliyet ile zaman dikkat edilmesi gereken değişkenler olarak ortaya çıkmaktadır. İstenilen beton kalitesine çeşitli hata veya olumsuzluklardan kaynaklanan sebepler nedeniyle ulaşılamadığı takdirde, yukarıda ifade edilen tüm değişkenlerin tekrar ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir (ACI, 1993; Öztaş vd., 2006; Tayfur vd., 2014; Namlı vd., 2016).

Son yıllarda beton üzerine artan çalışmalar ışığında, beton dayanımı tahmin etmek için çeşitli yöntemler ortaya konulmuştur. Genel olarak beton dayanımı, istatistiksel ve ileri modelleme teknikleri ile ele alınmaktadır (Snell vd., 1989; Oluokun vd., 1990; Popovics, 1998; Ni ve Wang, 2000; Özturan vd., 2008; Duan vd., 2013; Cihan vd., 2013; Siraj, 2015; Moutassem ve Chidiac 2016; Armaghani ve Asteris 2020).

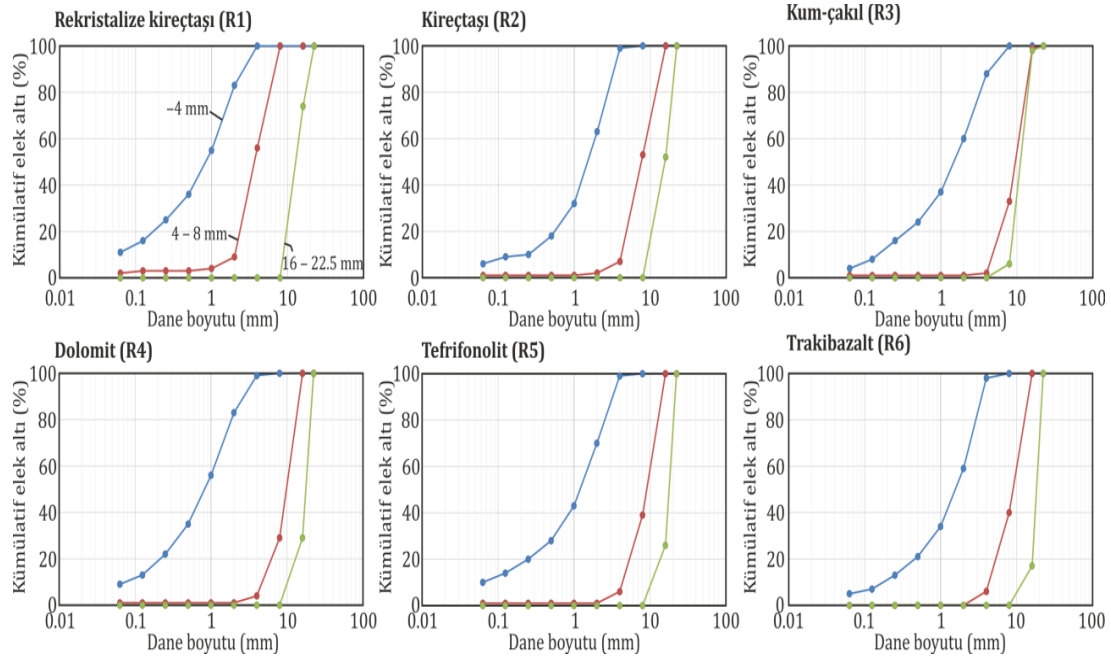
Günümüzde beton dayanımının tahminlenmesine ilişkin çalışmalarda, istatistiksel yöntemlerinden daha çok, ileri modelleme tekniklerini temel alan yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Kewalramani ve Gupta (2006), P dalga hızını temel alan laboratuvar çalışmalarında, farklı kürlenme teknikleri ile oluşturulan betonların dayanımının tahmin edilmesine ilişkin yapay sinir ağları (YSA) yöntemini kullanmıştır. Tayfur vd. (2014), bulanık mantık algoritmasını temel alan çalışmada, beton dayanımını silis içeriği, bağlayıcı içeriği ve beton yaşı parametrelerine bağlı olarak başarılı bir şekilde modellemiştir. Namlı vd. (2016), farklı boyutlardaki agregalar ve katkı malzemelerinden oluşan betonların dayanımını klasik YSA ve dalgacık dönüşümlü YSA yöntemlerini kullanarak modellemiştir. Tutarlılık ve tahmin gücü açısından araştırmacılar, YSA yöntemlerinin beton dayanımı tahmini konusunda etkin şekilde kullanıldığını ortaya koymuştur. Naderpour vd. (2018), betonlarda kullanılan agregaların ağırlıkça su emme (w_a), su/çimento oranı, ince agrega miktarı, geri dönüştürülmüş agrega miktarı gibi parametreleri kullanılarak, 28 günlük betonların dayanımını YSA yöntemi kullanarak modellemiştir. Önerilen modelin YSA mimarisi 6-4-1 şeklindedir ve araştırmacılar modelin korelasyon katsayısını $r = 0.8926$ olarak ortaya koymuştur. Deng vd. (2018), geri dönüştürülmüş agregalar kullanarak betonun basınç dayanımını tahmin etmek için derin öğrenme teorisine dayalı bir tahmin modeli önermiştir. Su/çimento oranı, geri dönüştürülmüş iri agrega oranı, geri dönüştürülmüş ince agrega oranı, uçucu kül oranını YSA modellerinde kullanılmıştır. Önerilen YSA modelinin mimarisi 3-4-2 şeklindedir. Getahun vd. (2018), farklı agrega türleri ve çimento içeriklerini temel alarak gerçekleştirdiği laboratuvar çalışmalarında, betonların dayanımını, 15-15-2 YSA mimarisi ile $r = 0.9811$ mertebesinde modellemiştir. Poorarbabi vd. (2020), yüzey tepki yöntemi (RMS), kullanarak beton dayanımını tahribatsız yöntemler ile modellemiştir. Geliştirilen modelde, P dalga hızı (V_p) ve Schmidt çekici geri tepme sayısı (SHV) değerleri bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Shishegaran vd. (2021), V_p ve SHV bağımsız değişkenlerinin kullanıldığı genetik algoritma (GA) ve adaptif yapay sinir ağı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFIS) ve çeşitli hibrit modeller ile beton dayanımını başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Yukarıda ifade edilen çalışmalardan elde edilen bulgular ışığında, ileri modelleme yöntemlerinin beton dayanımı tahmininde başarılı ve pratik bir şekilde kullanılabilirliği söylenebilir. YSA, GA, ve diğer çeşitli ileri modelleme yöntemleri, bağımsız değişkenlerin algoritmaya tanıtılması ve öğretilmesi temeline dayanmakta olup, elde edilen matematiksel eşitliklerin herhangi bir bilgisayar programına kodlanması oldukça pratik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, beton tek eksenli basınç dayanımının (UCS_c) ve eğilme dayanımının (FS_c) tahmin edilmesine yönelik bir dizi ileri modelleme yöntemleri (RSM, YSA, GA) tanıtılmış ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veri setine uygulanmıştır. Betonlarda kullanılan agregaların Los Angeles aşınma kaybı (LAA), 28 günlük beton yoğunluğu (ρ_c) ve P dalgası hızı (V_{pc}) değerleri bağımsız değişken olarak modellerde tanımlanmıştır. Söz konusu bu üç ileri modelleme tekniğine ait model performans değerlendirmeleri çeşitli istatistiksel parametreler ışığında yapılmış ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Beton numunelerinin hazırlanmasında en önemli etmen olan agregaların temini, saha çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Altı farklı agrega türü Isparta yöresinden temin edilmiş olup, beton agregaları üç farklı dane boyutunda (-4, 4-8 ve 16-22.5 mm) hazırlanmıştır (Şekil 1).

Agrega deneyleri için kullanılan numunelerin boyutlarına göre elenmesinde ve hazırlanmasında TS EN 933-2 (1996)'e uygun elekler ile elek sallama makinesi kullanılmıştır. Dane boyutu analizleri için TS 3530 EN 933-1 (1999)'deki yöntem benimsenmiştir.



Şekil 1. Farklı boyut gruplarına göre hazırlanan beton agregalarının tipik dane boyutu dağılım eğrileri (Typical particle size distribution curves of concrete aggregates with different size fractions)

Farklı boyut gruplarındaki beton agregalarının karışım oranları Tablo 1’de verilmiştir. Beton agregalarının kalıp içerisindeki ortalama dane boyutları 5 – 10 mm arasında sabit tutulabilmesi için farklı karışım oranları kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun TS EN 197-1 (2011)’e göre, uygunluk analiz sonuçları Tablo 2’de listelenmiştir. TS EN 206-1 (2014)’de belirtilen beton karışımında kullanılabilen karma suyu özelliklerini taşıdığı kabul edilerek içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmıştır. TS 802 (2009)’da ifade edilen beton karışım hesapları dikkate alınarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan agregaların en büyük dane büyüklüğü (d_{max}) 22,4 mm, 8-10 cm çökme miktarına sahip, kimyasal katkısız ve hava sürüklenmemiş olan beton karışımının su/çimento oranı ise 0.46 olarak sabit alınmıştır. Beton numunelerine ait tek eksenli basınç deneyi için 10x10x10 cm, eğilme dayanımı için ise 15x15x60 cm boyutlarında örnekler hazırlanmıştır.

Tablo 1. Beton agregaları karışım oranları (Mixture ratio of concrete aggregates)

| Agrega boyutu | Rekristalize Kireçtaşı (R1) | Kireçtaşı (R2) | Kum-çakıl (R3) | Dolomit (R4) | Tefrifonolit (R5) | Trakibazalt (R6) |
|---------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|
| İri agrega (16 - 22.5 mm) | 29.76 | 42.71 | 50.91 | 28.87 | 14.89 | 24.70 |
| Kırma kum (4 - 8 mm) | 34.04 | 3.43 | 5.88 | 30.53 | 37.07 | 29.67 |
| İnce agrega (-4 mm) | 36.21 | 53.86 | 43.21 | 40.60 | 48.04 | 45.63 |

Tablo 2. Kullanılan çimentonun (CEM I 42.5R) fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri (Physical, mechanical and chemical properties of cement (CEM I 42.5R) used)

| Değer | Blaine yüzey alanı (cm ² /g) | Yoğunluk (gr/cm ³) | Priz başlangıcı (dak) | Genleşme (mm) | Dayanım (MPa) | | | SO ₃ (%) | LOI (%) | CL (%) |
|-----------------------|---|--------------------------------|-----------------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|---------|--------|
| | | | | | B ₂ | B ₇ | B ₂₈ | | | |
| Ortalama | 3133 | 3.12 | 158 | 1 | 27.1 | 42.3 | 56.0 | 2.84 | 1.94 | 0.004 |
| Standart Sapma | 123.84 | 0.01 | 22.04 | 0 | 2.14 | 2.21 | 1.38 | 0.13 | 1.14 | 0.003 |
| Minimum | 2980 | 3.11 | 140 | 1 | 23.3 | 37.8 | 54.5 | 2.63 | 1.00 | 0.001 |
| Maksimum | 3370 | 3.14 | 200 | 1 | 30.0 | 44.6 | 58.1 | 3.00 | 3.83 | 0.010 |

TS EN 12390-2 (2010)’de belirtildiği gibi beton örnekleri, kalıptan çıkartıldıktan sonra, deney zamanına kadar 20 ±2 °C sıcaklığındaki su tankında kürlenme sürecine tâbi tutulmuştur. TS EN 12390-7 (2010) standardında göre, 28 günlük beton örnekleri, kür havuzundan çıkarıldıktan sonra numune yüzeyindeki serbest su silinerek yüzey kuru duruma getirilmiş ve doygun yüzey kuru ağırlıkları elektronik terazi (0.5 g hassasiyetli) ile tartılmıştır. Boyutları ise elektronik kumpas (1/100 mm hassasiyetli) kullanılarak ölçülmüş ve hacmi belirlenerek beton örneklerinin yoğunlukları TS EN 12390-7 (2010) standardına göre hesaplanmıştır.

TS EN 12390-3 (2010) standardında belirtildiği gibi, küp şeklindeki beton örnekleri, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak şekilde beton dayanım cihazına yerleştirildikten sonra, 0.5 ± 0.05 (N/mm².s) yükleme hızında tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Beton örneklerinin taşıyabildiği en büyük yük belirlenmiş ve beton basınç dayanımları hesaplanmıştır. Benzer şekilde, TS EN 12390-5 (2010)'e göre deney için kür havuzundan çıkarılan prizmatik beton örneklerinin yüzeylerindeki sular silindikten sonra mesnet (alt) ve yükleme (üst) silindirleri yoluyla yük uygulanmıştır. Eğilme momentine maruz kalan numunelerin ulaştıkları en büyük yük kaydedilerek eğilme dayanımı tespit edilmiştir.



Şekil 2. Laboratuvar çalışmaları a) Beton agregalarında LAA testi b) Beton numunelerinin kalıplara doldurulması c) Kütleme işlemi d) Beton numunelerinde P dalgası ölçümü e) Tek eksenli basınç deneyi f) Eğilme deneyi (Laboratory studies: a) LAA test for concrete aggregates b) Filling concrete samples into the molds c) Curing process d) Pulse wave velocity measurements for concrete samples e) Uniaxial compressive strength test f) Flexure strength test)

TS EN 1097-6 (2013)'e göre hava dolaşımli bir etüvde, $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuş, sabit kütlesi bilinen iri agregalar, piknometrede bulunan, $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suya daldırılarak hapsolmuş hava, piknometre sallanarak uzaklaştırılmıştır. Piknometre, su banyosu içerisinde düşey hale getirilip, deney numunesi kısmı, $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ 'de (24 ± 0.5) saat süreyle tutulmuştur. Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş hale getirilen agrega numuneleri tartılmıştır. TS EN 1097-6 (2013)'de belirtildiği gibi agregaların ağırlıkça su emme yüzdesi belirlenmiştir. TS EN 1097-6 (2013)'de belirtildiği gibi, agregalar, öncelikle yapışmış haldeki tanelerin uzaklaştırmak için yıkanmıştır. 31.5 mm göz açıklıklı elekte tutulan ve 0.063 mm. göz açıklıklı elekten geçen taneler atılmış ve agregalar etüvde $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ sıcaklıkta sabit kütleye ulaşılncaya kadar kurutulmuştur. Böylelikle kütle, deney agregalarının, etüvde kurutulmuş esasta tartmak suretiyle elde edilmiştir. Hacim ise, hacmi bilinen bir piknometrede kütle azalması yoluyla, kuru tanelerin sebep olduğu yer değiştiren su ile tayin edilmiştir. Deney agregalarının kütlelerini ve hacmini tayin etmek ve kütle hacme oranı olarak kuru tane yoğunluğunu hesaplanmıştır. TS EN 1097-2 (2010)'e göre, 14 mm deney eleğinden geçen ve 10 mm deney eleğinde kalan agregalar, dönen tamburda çelik bilyalar ile birlikte 31-33 devir/dakika sabit hızda 500 devir döndürülmüştür. Agregalar 1.6 mm'lik elek kullanılarak yıkanmış ve elenmiştir. 1.6 mm elekte kalan kısım, $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'daki etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Deney tamamlandıktan sonra standartta belirtildiği gibi 1.6 mm'lik elekten geçen deney kısmının yüzdesi hesaplanarak LAA testi ile iri agregaların parçalanma direnci belirlenmiştir. Ultrasonik test yöntemi ASTM C597 (1994) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Beton içerisindeki P dalga hızı, ultrasonik test cihazı tarafından gönderilen ultrasonik dalganın gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki mesafeyi ve iletildiği sürenin belirlenmesiyle hesaplanmıştır. Laboratuvar çalışmaları Şekil 2'de verilmiştir.

3. Laboratuvar Çalışmaları (Laboratory Studies)

3.1. Beton Agregalarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Physical and Mechanical Properties of Concrete Aggregates)

Bu çalışmada kullanılan beton agregalarının fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3'te ortalama değerleri gösterecek şekilde listelenmiştir. Buna göre, incelenen kayaçların kuru yoğunlukları $2338 - 2735$ kg/m³, ağırlıkça su emme değerleri %0.141 - %3.943 ve Los Angeles aşınma kaybı değerleri ise %11.35 - %26.54 arasında değişmektedir.

Tablo 3. Beton agregalarının fiziksel ve mekanik özellikleri (Tuncay Başpınar, 2015, Kılınçarslan vd., 2018) (Physical and mechanical properties of the concrete aggregates (Tuncay Başpınar, 2015, Kılınçarslan vd., 2018))

| Agrega türü | n | ρ_d (kg/m ³) | w_a (%) | LAA (%) |
|-------------|---|----------------------------------|--------------|------------|
| R1 | 3 | 2570 | 0.215 | 20.28 |
| R2 | 3 | 2590 | 0.298 | 19.25 |
| R3 | 3 | 2576 | 0.371 | 17.45 |
| R4 | 3 | 2709 | 0.205 | 13.65 |
| R5 | 3 | 2338 | 3.943 | 26.54 |
| R6 | 3 | 2735 | 0.141 | 11.35 |

Açıklamalar: n: Örnek sayısı, ρ_d : Kuru yoğunluk, w_a : Ağırlıkça su emme, LAA: Los Angeles aşınma kaybı

3.2. Beton Deneyleri (Concrete Tests)

Hazırlanan beton numunelerine ait 28 gün sonundaki ρ_c , V_{pc} , UCS_c FS_c değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre, betonlara ait ρ_c , V_{pc} , UCS_c ve FS_c değerleri sırasıyla 2187 – 2465 kg/m³, 4.161 – 4.656 km/s, 40.81 – 55.74 MPa ve 7.52 – 12.69 MPa arasında değişmektedir.

Tablo 4. 28 gün sonundaki betonların fiziksel ve mekanik özellikleri (Tuncay Başpınar 2015, Kılınçarslan vd., 2018) (Physical and mechanical properties of the concrete samples, (Tuncay Başpınar 2015, Kılınçarslan vd., 2018))

| Agrega türü | n | ρ_c (kg/m ³) | V_{pc} (km/s) | UCS _c (MPa) | FS _c (MPa) |
|-------------|---|----------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|
| R1 | 6 | 2284 | 4.291 | 44.80 | 7.81 |
| | | 2237 | 4.278 | 43.96 | 7.64 |
| | | 2187 | 4.215 | 43.00 | 7.50 |
| | | 2230 | 4.225 | 44.71 | 7.73 |
| | | 2284 | 4.201 | 44.22 | 7.52 |
| | | 2329 | 4.264 | 44.89 | 7.96 |
| R2 | 6 | 2268 | 4.280 | 45.73 | 8.61 |
| | | 2345 | 4.273 | 47.44 | 8.80 |
| | | 2282 | 4.223 | 46.80 | 9.03 |
| | | 2282 | 4.355 | 47.74 | 8.65 |
| | | 2267 | 4.265 | 46.44 | 8.48 |
| | | 2328 | 4.372 | 47.96 | 8.91 |
| R3 | 6 | 2460 | 4.563 | 55.33 | 11.80 |
| | | 2395 | 4.593 | 54.79 | 12.04 |
| | | 2461 | 4.497 | 55.74 | 12.56 |
| | | 2465 | 4.619 | 55.18 | 11.51 |
| | | 2462 | 4.435 | 55.25 | 11.64 |
| | | 2444 | 4.656 | 55.47 | 12.69 |
| R4 | 6 | 2178 | 4.161 | 41.68 | 8.43 |
| | | 2177 | 4.196 | 40.81 | 8.02 |
| | | 2192 | 4.221 | 41.34 | 8.84 |
| | | 2163 | 4.194 | 42.10 | 9.26 |
| | | 2222 | 4.178 | 42.05 | 9.23 |
| | | 2193 | 4.237 | 41.50 | 8.27 |
| R5 | 6 | 2326 | 4.418 | 49.48 | 10.84 |
| | | 2356 | 4.413 | 50.55 | 11.01 |
| | | 2387 | 4.410 | 52.83 | 10.57 |
| | | 2408 | 4.455 | 53.47 | 11.85 |
| | | 2401 | 4.516 | 53.58 | 12.12 |
| | | 2434 | 4.401 | 53.55 | 12.38 |
| R6 | 6 | 2222 | 4.292 | 48.92 | 11.05 |
| | | 2252 | 4.337 | 49.33 | 10.71 |
| | | 2425 | 4.324 | 49.31 | 10.40 |
| | | 2314 | 4.342 | 49.14 | 10.22 |
| | | 2382 | 4.326 | 49.44 | 10.95 |
| | | 2385 | 4.423 | 49.24 | 10.88 |

Açıklamalar: n: Örnek sayısı, ρ_c : Beton yoğunluğu, V_{pc} : Beton P dalga hızı, UCS_c: Beton tek eksenli basınç dayanımı, FS_c: Beton eğilme dayanımı.

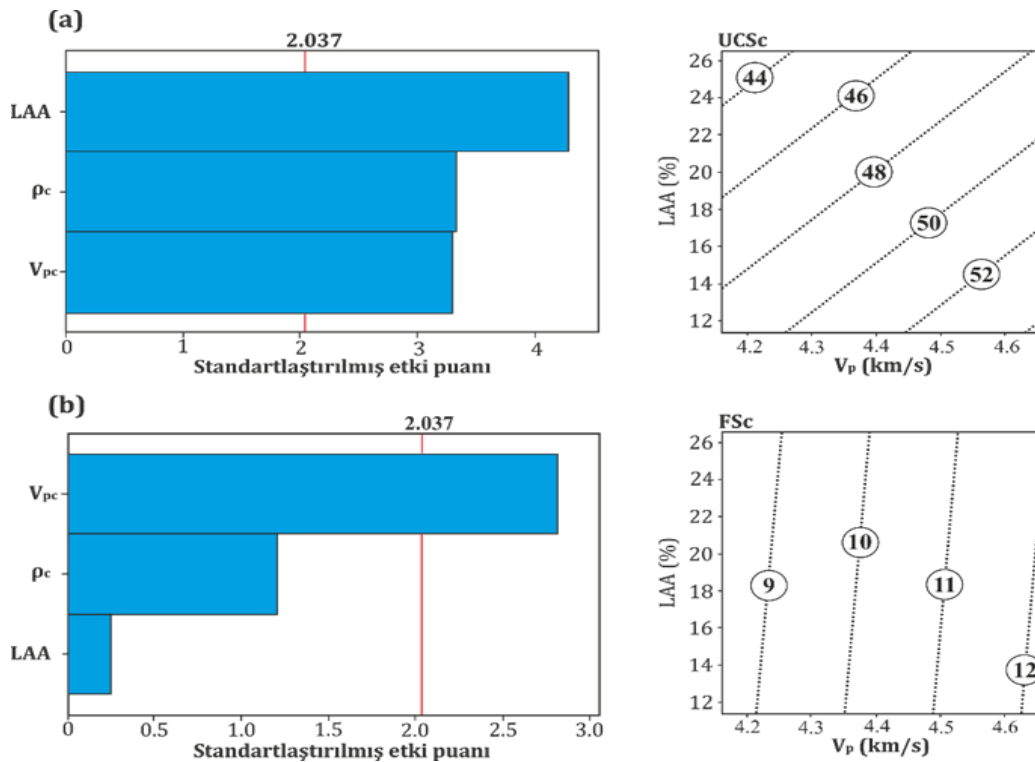
4. Beton Dayanımının Matematiksel Modellenmesi (Mathematical Modeling of Concrete Strength)

4.1. Yüzey Tepki Yöntemi (RSM) (Response Surface Methodology (RSM))

Yüzey tepki yöntemi, ürün veya modelleri geliştirme, iyileştirme veya optimize etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Myers, 2016). Bu çalışmada UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini konusunda istatistiksel olarak anlamlı faktörler Pareto diyagramları ile ortaya konulmuştur (Şekil 3). Şekil 3a'ya göre UCS_c tahmini için agregaların LAA ve betonların ρ_c ve V_{pc} değerleri istatistiksel olarak anlamlı olup, FS_c için ise sadece V_{pc} değeri anlamlı bulunmuştur. (Şekil 3b). Şekil 3a ve Şekil 3b'deki parametrelere ait RSM modelleri ise Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de sırasıyla verilmiştir. Eşitlik 1 ve 2 R² değerleri açısından kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, RSM modelinin UCS_c değerinin tahmin edilmesinde daha başarılı olduğu sonucuna varılabilir.

$$UCS_c = -25.8 + 0.015\rho_c - 0.4044LAA + 10.72V_{pc}, r^2 = 0.94 \quad (1)$$

$$FS_c = -31.5 + 0.00434\rho_c - 0.0188LAA + 7.28V_{pc}, r^2 = 0.71 \quad (2)$$



Şekil 3. Bu çalışmada geliştirilen yüzey tepki modelleri a) UCS_c b) FS_c (Response surface models established in this study a) UCS_c b) FS_c)

4.2. Genetik Algoritma (GA) Yöntemi (Genetic Algorithm (GA) Method)

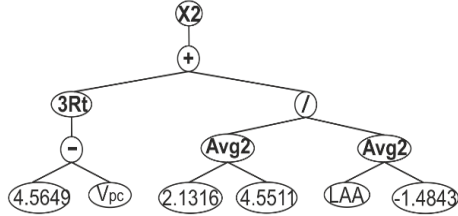
GA yöntemi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında açık bir matematiksel formül üretebilen evrimsel tabanlı bir algoritma türüdür (Koza, 2001). Bu algoritma ilk olarak Ferreira (2001) tarafından geliştirilmiş olup, fen ve mühendislik alanlarında modelleme ve sınıflama alanlarında sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir (Zhong vd., 2017). Bu çalışmada UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için farklı genetik algoritmalar oluşturulmuş ve elde edilen en iyi modellerin gen ağaçları ve matematiksel denklemleri sunulmuştur. GA analizlerinde kromozom sayısı (*number of chromosomes*), ana gövde sayısı (*head size*) ve gen sayısı (*number of genes*) sırayla 30, 7 ve 3 olarak kabul edilmiştir. Gen ağaçları arasındaki ilişki denklemi ise toplama fonksiyonu (*addition*) şeklinde algoritmada tanımlanmıştır. UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için geliştirilen GA modellerine ait gen ağaçları Şekil 4'te verilmiş olup, gen ağaçlarına ait matematiksel denklemler ise Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'te sunulmuştur. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'e ait gen ağacı alt denklemleri Tablo 5'te görülmektedir.

$$UCS_c = 0.9984 \left(\sum_{i=1}^3 S_i \right) + 0.1909, r^2 = 0.97 \quad (3)$$

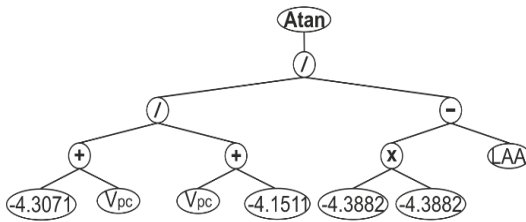
$$FS_c = 1.04 \left(\sum_{i=1}^3 S_i \right) - 0.3822, r^2 = 0.92 \quad (4)$$

a) UCS_c

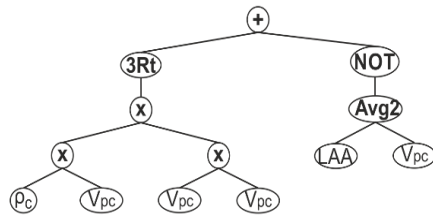
Sub-ET 1



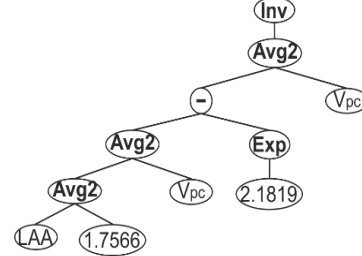
Sub-ET 2



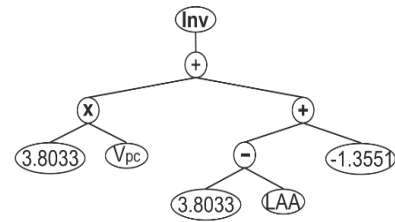
Sub-ET 3

b) FS_c

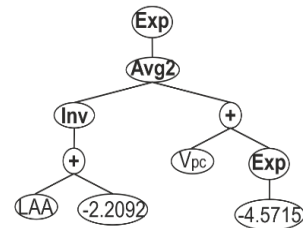
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



Şekil 4. Bu çalışmada geliştirilen GA modellerine ait gen ağaçları a) UCS_c b) FS_c (Sub expression trees established in the genetic algorithms a) UCS_c b) FS_c)

Tablo 5. GA modellerinden elde edilen gen ağaçlarına ait alt denklem setleri (Mathematical equation sets obtained from the genetic algorithms)

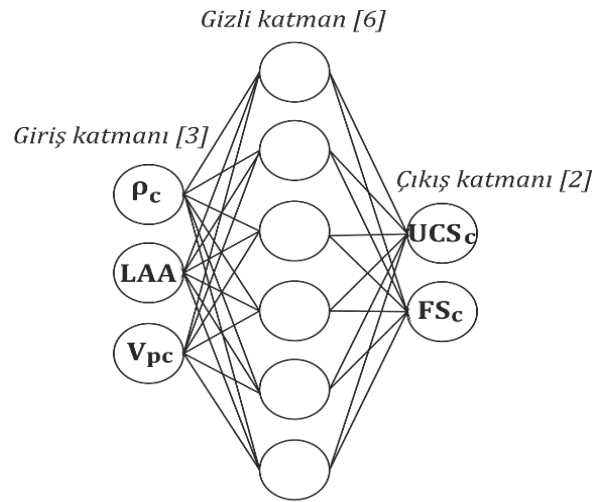
| Eşitlik 3 | Eşitlik 4 |
|--|--|
| $Sub-ET1(S_1) = \left(\left(4.5649 - V_{pc} \right)^{1/3} + \left(\frac{6.6826}{LAA - 1.4843} \right) \right)^2$ | $Sub-ET1(S_1) = \frac{2}{\left(\frac{LAA + 1.7566}{2} + V_{pc} - 8.8631 \right) + V_{pc}}$ |
| $Sub-ET2(S_2) = \operatorname{Atan} \left(\frac{\left(\frac{V_{pc} - 4.3071}{V_{pc} - 4.1511} \right)}{(19.2562 - LAA)} \right)$ | $Sub-ET2(S_2) = \frac{1}{3.8033V_{pc} + (2.4482 - LAA)}$ |
| $Sub-ET3(S_3) = \left(\rho_c^{0.3333} \times V_{pc} \right) + \left(1 - \frac{LAA + V_{pc}}{2} \right)$ | $Sub-ET3(S_3) = \exp \left(\frac{\left(\frac{1}{LAA - 2.2092} \right) + (V_{pc} + 0.0103)}{2} \right)$ |

Açıklamalar: ρ_c Beton görünür yoğunluğu (kg/m³), V_{pc} : Beton numunesi P dalga hızı (km/s), LAA: Beton agregasının Los Angeles aşınma kaybı (%), UCS_c ve FS_c MPA birimindedir.

4.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi (Artificial Neural Networks (ANN) Method)

Karmaşık problemlerin çözülmesine yardımcı olan yapay sinir ağları, bilgiyi işlemek için insan beyninin biyolojik sinir sistemini taklit eder. Birbirine bağlı hesaplama elemanlarının bulunduğu yapay sinir ağı tekniğinde, ağ mimarisi tek giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir tahmin (çıkış) katmanı olmak üzere üç bölümden oluşur. Giriş katmanında veriler sisteme entegre edilir ve nöronlar ile iletilir, ardından gizli katmanda işlenir ve sistemin yanıtını kaydetmek için çıkış katmanına gönderilir. Girdi boyutları ve bunlara karşılık gelen hedefler arasındaki ilişkiyi yakalamak için her katmandaki nöronlar, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirleriyle etkileşime girer (Gallo, 2015; Zhang ve diğerleri, 2020; Raja ve Shukla, 2021).

Bu süreç doğrultusunda giriş katmanındaki verilerin işleme ve transfer süreci tamamlanarak çıktı katmanına ait olası sonuçlar elde edilir. Bu çalışmada farklı giriş ve gizli katmanlar kullanılarak en uygun YSA modelleri geliştirilmeye çalışılmış ve en uygun YSA mimarisi Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre, ρ_c , LAA ve V_{pc} bağımsız değişkenler olarak sisteme girdi parametreleri olarak verilmiş olup, YSA mimarisi 3-6-2 şeklinde tanımlanmıştır. YSA analizlerinden elde edilen matematiksel denklemler Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verilmiştir. UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için YSA alt denklemleri Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Bu çalışmada benimsenen YSA mimarisi (ANN architecture adopted in this study)

$$UCS_c = 7.45 \tanh \left(\sum_{i=1}^6 A_i + 0.43963 \right) + 48.26, r^2 = 0.98 \quad (5)$$

$$FS_c = 2.51 \tanh \left(\sum_{i=1}^6 A_i + 1.5054 \right) + 10.01, r^2 = 0.97 \quad (6)$$

YSA analizlerine göre, UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmininde Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 yeterli güvenilirlikte kullanılabilir olup, her iki modelin belirleme katsayısı (r^2) sırasıyla 0.98 ve 0.97 olarak belirlenmiştir. Bu bölüme kadar tanıtılan altı adet tahmin modelinin performans değerlendirmesi ise tartışma bölümünde sunulmuştur.

Tablo 6. Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'daki alt denklem sistemleri (Sub-equations systems of Equation 5 and Equation 6)**Eşitlik 5**

$$\begin{aligned}
A_1 &= 2.9337 \tanh(-1.6536 {}^n \rho_c + 1.4813 {}^n LAA + 2.51 {}^n V_{pc} + 2.5903) \\
A_2 &= -2.1796 \tanh(-2.1379 {}^n \rho_c + 1.5681 {}^n LAA + 1.6641 {}^n V_{pc} + 2.3798) \\
A_3 &= 4.439 \tanh(3.3755 {}^n \rho_c - 0.67676 {}^n LAA - 2.2679 {}^n V_{pc} + 1.4714) \\
A_4 &= -4.2256 \tanh(5.5857 {}^n \rho_c - 0.52721 {}^n LAA - 4.7598 {}^n V_{pc} + 1.6304) \\
A_5 &= -3.4234 \tanh(-4.8225 {}^n \rho_c + 1.4746 {}^n LAA - 2.3256 {}^n V_{pc} + 7.025) \\
A_6 &= -2.1252 \tanh(-0.31896 {}^n \rho_c + 2.6015 {}^n LAA + 0.69765 {}^n V_{pc} - 4.1531)
\end{aligned}$$

Tablo 6 devamı**Eşitlik 6**

$$\begin{aligned}
A_1 &= -1.2251 \tanh(-3.2088 {}^n \rho_c + 2.709 {}^n LAA - 1.6424 {}^n V_{pc} + 4.1221) \\
A_2 &= 3.8511 \tanh(-0.24017 {}^n \rho_c + 4.7958 {}^n LAA - 0.25217 {}^n V_{pc} - 1.2469) \\
A_3 &= 1.0487 \tanh(-1.4781 {}^n \rho_c + 1.6071 {}^n LAA - 0.68061 {}^n V_{pc} + 2.2897) \\
A_4 &= -2.0103 \tanh(-0.66733 {}^n \rho_c + 5.6985 {}^n LAA - 1.0162 {}^n V_{pc} - 0.3501) \\
A_5 &= -2.6367 \tanh(-3.1288 {}^n \rho_c + 1.1132 {}^n LAA - 0.25373 {}^n V_{pc} - 2.4756) \\
A_6 &= -1.7019 \tanh(4.2981 {}^n \rho_c + 2.0655 {}^n LAA + 0.27309 {}^n V_{pc} + 3.0354)
\end{aligned}$$

Normalizasyon denklemleri

$${}^n \rho_c = 0.0066 \rho_c - 15.325$$

$${}^n LAA = 0.1317 LAA - 2.4944$$

$${}^n V_{pc} = 4.0404 V_{pc} - 17.812$$

Açıklamalar: ρ_c Beton görünür yoğunluğu (kg/m^3), V_{pc} : Beton numunesi P dalga hızı (km/s), LAA: Beton agregasının Los Angeles aşınma kaybı (%), UCS_c ve FS_c MPA birimindedir.

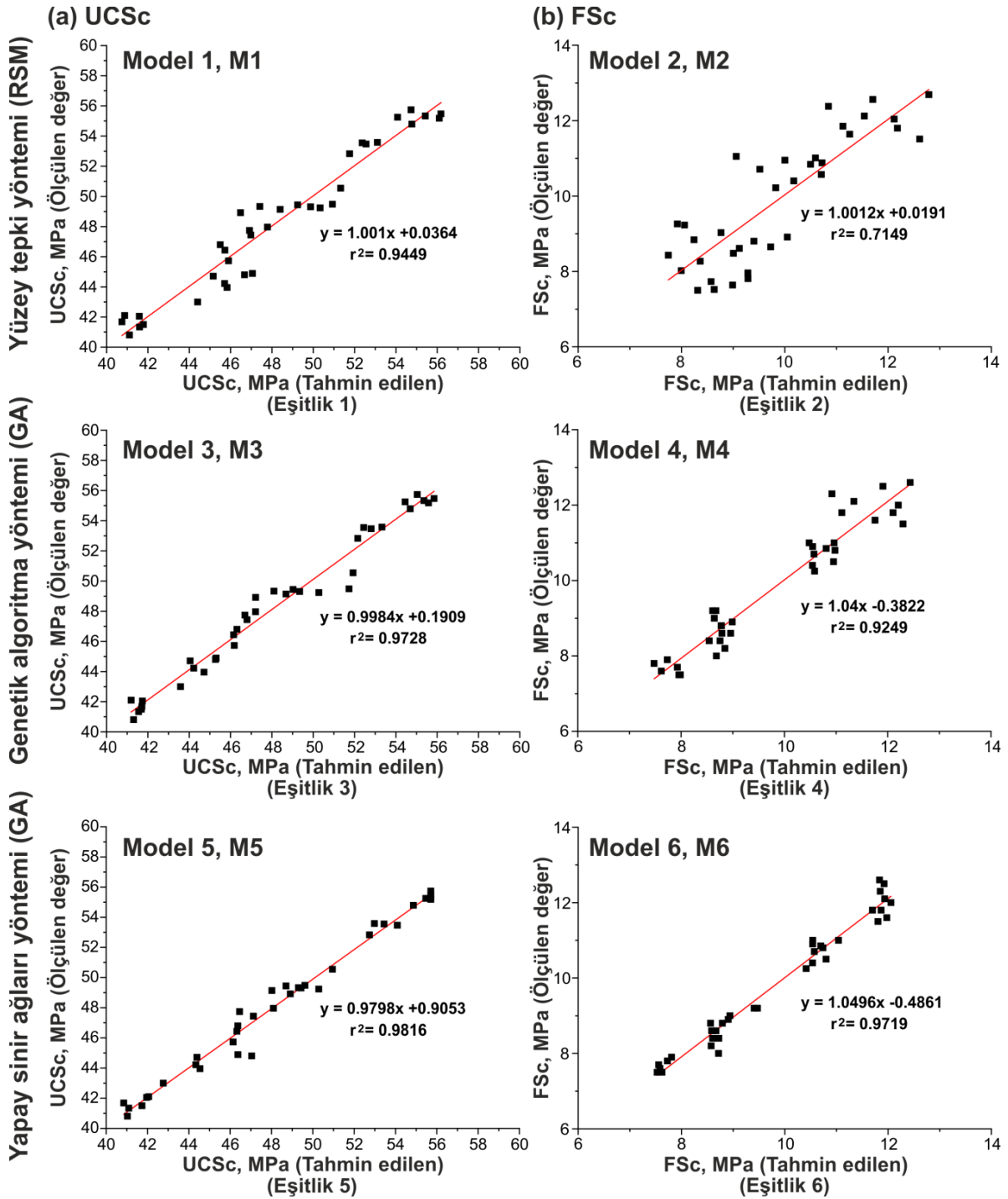
5. Tartışma (Discussion)

Geliştirilen modellerden tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ilişkiler Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, UCSs değerinin tahmininde her üç modelde (M1, M3 ve M5) tutarlı sonuçlar sağlamaktadır (Şekil 6a). Diğer taraftan, FS_c tahminindeki M2 modeli, bu çalışmadaki en düşük R² değerini (0.71) vermektedir. FS_c'nin tahmininde bu sebepten M4 ve M6 modellerinin birlikte kullanılması önerilmektedir (Şekil 6b). Genel olarak bu çalışmada, GA ve YSA tabanlı modellerin RSM modellerinden daha tutarlı ve genel sonuçlar verdiği görülmektedir. Hammoudi vd. (2019), geri dönüştürülmüş beton agregalarının basınç dayanımını tahmin etmede RSM ve YSA'nın doğruluğunu karşılaştırmış YSA tabanlı modellerin beton dayanım tahmininde RSM'den daha iyi olduğunu belirtmiştir. Söz konusu bu çalışma da mevcut çalışmadan elde edilen bulgular ile uyum içerisindedir. Benzer bulgular Namli vd. (2016) tarafından da belirtilmiştir.

Daha ayrıntılı bir değerlendirme için mevcut modellerin (M1-M6) performansları bazı istatistiksel göstergeler ışığında tekrar ele alınmış ve modellerin birbirine göre üstünlük veya zayıflıkları tartışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan istatistiksel göstergeler; ortalama toplam hata oranı (MAPE), ortalama karekök hatası (RMSE) ve varyans açıklama değeri (VAF) olup, bu göstergelere ait denklemler Eşitlik 7 - 9 ile ifade edilmektedir.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |o_i - e_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}} \quad (8)$$



Şekil 6. Bu çalışmadan elde edilen modellere ait tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması (Comparison of the predicted and measured values obtained from the established models in this study)

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(o_i - e_i)}{\text{var}(o_i)} \right) \times 100 \quad (9)$$

Burada o_i ölçülen laboratuvar sonucunu, e_i ise tahmin edilen laboratuvar sonucunu göstermektedir.

Tablo 7'de geliştirilen modellerin bazı istatistiksel göstergeler ışığındaki değerlendirilmesi görülmektedir. En uygun modellerin seçiminde en yüksek r^2 ve VAF değeri ile en düşük MAPE ve RMSE değerleri aranmaktadır (Onifade vd. 2019; Lawal ve Idris 2020). Bu bilgiler ışığında, geliştirilen modeller birbirleri ile karşılaştırılmış ve en düşük hata oranını veren modelin YSA tabanlı modeller (M5, M6) modellerinin olduğu tespit edilmiştir (Tablo 7). Ancak GA modellerinin de (M3, M4) UCS ve FSc'nin tahmininde yeteri güvenilirlikte kullanılabileceği söylenebilir.

Tablo 7. Geliştirilen modellerin performans değerlendirmesi (Performance evaluation of the established models)

| Bağımlı değişken | Model No | Eşitlik No | r^2 | MAPE | RMSE | VAF |
|------------------|----------|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| UCSc | M1 (RSM) | 1 | 0.9449 | 0.9191 | 1.1036 | 94.48 |
| | M3 (GA) | 3 | 0.9728 | 0.6199 | 0.7833 | 97.27 |
| | M5 (YSA) | 5 | 0.9816 | 0.4392 | 0.6479 | 98.12 |
| FSc | M2 (RSM) | 2 | 0.7149 | 0.7358 | 0.8833 | 71.48 |
| | M4 (GA) | 4 | 0.9249 | 0.3580 | 0.4560 | 92.35 |
| | M6 (YSA) | 6 | 0.9719 | 0.2121 | 0.2865 | 96.97 |

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, Isparta yöresinden temin edilmiş altı farklı beton agregasının fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir (Tablo 3). Ayrıca, hazırlanmış beton numunelerinin ρ_c , V_{pc} , $UCSc$ ve FSc değerleri laboratuvar çalışmaları ile ortaya konmuştur (Tablo 4). RSM, GA ve YAS tahmin modellerinde $UCSc$, FSc için agregaların LAA ve betonların ρ_c ve V_{pc} değerleri anlamlı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır. 36 veri seti ile geliştirilen RSM, GA ve YSA yöntemleri kullanılarak betonların $UCSc$ ve FSc değerlerinin tahmini için altı farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen $UCSc$ ve FSc 'ye ait yüzey tepki (M1, M2), GA (M3), (M4) ve YSA (M5, M6) modelleri tanıtılmış ve modellere ait matematiksel ifadeler sunulmuştur. Geliştirilen modellerin performans değerlendirmeleri r^2 , MAPE, RMSE ve VAF değerleri ile ortaya konmuş ve M1, M3 ve M5 modellerinin $UCSc$ değerinin tahmini için kullanılabilir olduğu görülmüştür (Tablo 7). FSc değerinin tahmini için ise M4 ve M6 modellerinin birlikte kullanılması uygun görülmektedir. İleriki çalışmalar için, veri setinin artırılması ve farklı RSM modellerinin uygulanması tavsiye edilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 1806-D-09 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Araştırmacılar Prof. Dr. Fuzuli YAĞMURLU'ya ve Öğretim Görevlisi Olcay ÇAKMAK'a katkılarından dolayı içtenlikle teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- American Concrete Institute (ACI) Committee 211, 1993. Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash. ACI211.4R-93, Detroit, MI.
- Armaghani, D.J., Asteris, P.G., 2021. A Comparative Study of ANN and ANFIS Models for the Prediction of Cement-Based Mortar Materials Compressive Strength. *Neural Computing and Applications*, 33(9), 4501-4532.
- ASTM C597, 1994. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.02. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Asutkar, P., Shinde, S.B., Patel, R., 2017. Study on the Behaviour of Rubber Aggregates Concrete Beams Using Analytical Approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(1), 151-159.
- Cihan, M.T., Güner, A., Yüzer, N., 2013. Response Surfaces for Compressive Strength of Concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 763-774.
- Deng, F., He, Y., Zhou, S., Yu, Y., Cheng, H., Wu, X., 2018. Compressive Strength Prediction of Recycled Concrete Based on Deep Learning. *Construction and Building Materials*, 175, 562-569.
- Duan, Z.H., Kou, S.C., Poon, C.S., 2013. Prediction of Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete Using Artificial Neural Networks. *Construction and Building Materials*, 40, 1200-1206.
- Feng, D.C., Liu, Z.T., Wang, X.D., Chen, Y., Chang, J.Q., Wei, D.F., Jiang, Z.M., 2020. Machine learning-Based Compressive Strength Prediction for Concrete: An Adaptive Boosting Approach. *Construction and Building Materials*, 230, 117000.
- Ferreira, C., 2001. Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. *Complex Systems*, 13(2), 87-129.
- Gallo, C., 2015. Artificial Neural Networks Tutorial. In *Encyclopedia of Information Science and Technology*, Third Edition (pp. 6369-6378). IGI Global.
- Getahun, M.A., Shitote, S.M., Gariy, Z.C.A., 2018. Artificial Neural Network Based Modelling Approach for Strength Prediction of Concrete Incorporating Agricultural and Construction Wastes. *Construction and Building Materials*, 190, 517-525.
- Hammoudi, A., Moussaceb, K., Belebchouche, C., Dahmoune, F., 2019. Comparison of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) Prediction in Compressive Strength of Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 209, 425-436.
- Kewalramani, M.A., Gupta, R., 2006. Concrete Compressive Strength Prediction Using Ultrasonic Pulse Velocity Through Artificial Neural Networks. *Automation in Construction*, 15(3), 374-379.

- Kılıncarslan, Ş., İnce Yılmaz, E., Tuncay Başpınar, E., Yağmurlu, F., 2018. Clustering Analysis of Normal Strength Concretes Produced with Different Aggregate Types. *Open Chemistry*, 16(1), 918-922.
- Koza J., 1992. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT press, USA.
- Lawal, A.I., Idris, M.A., 2020. An Artificial Neural Network-Based Mathematical Model for the Prediction of Blast-Induced Ground Vibrations. *International Journal of Environmental Studies*, 77(2), 318-334.
- Myers R.H., 2016. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th ed. (Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook. Eds.), Wiley, ISBN 978-1-118-91601-8.
- Moutassem, F., Chidiac, S.E., 2016. Assessment of Concrete Compressive Strength Prediction Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 343-358.
- Naderpour, H., Rafiean, A.H., Fakharian, P., 2018. Compressive Strength Prediction of Environmentally Friendly Concrete Using Artificial Neural Networks. *Journal of Building Engineering*, 16, 213-219.
- Namli, E., Erdal, H.İ., Erdal, H., 2016. Dalgacık Dönüşümü ile Beton Basınç Dayanım Tahmininin İyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 471-480.
- Ni, H.G., Wang, J.Z., 2000. Prediction of Compressive Strength of Concrete by Neural Networks. *Cement and Concrete Research*, 30(8), 1245-1250.
- Nilson, A.H., Darwin, D., Dolan, C.W., 2010. Design of Concrete Structures. 14th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education.
- Oluokun F.A., Burdette E.G., Harold Deatherage J., 1990. Early-Age Concrete Strength Prediction by Maturity--Another Look. *Materials Journal*, 87(6), 565-572.
- Onifade, M., Lawal, A.I., Aladejare, A.E., Bada, S., Idris, M.A., 2019. Prediction of Gross Calorific Value of Solid Fuels from Their Proximate Analysis Using Soft Computing and Regression Analysis. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-15.
- Özçep, F., Karabulut, S., Özgüven, B., Sanlı, O., 2012. Tahribatsız Test Yöntemleri ve Ultrasonik Hız Ölçümleri. *Jeofizik Bülteni*, 22, 69-70.
- Öztaş, A., Pala, M., Özbay, E., Kanca, E., Çağlar, N., Bhatti, M.A., 2006. Predicting the Compressive Strength and Slump of High Strength Concrete Using Neural Network. *Construction and Building Materials*, 20(9), 769-775.
- Özturan, M., Kutlu, B., Özturan, T., 2008. Comparison of Concrete Strength Prediction Techniques with Artificial Neural Network Approach. *Building Research Journal*, 56(1), 23-36.
- Panzer, T.H., Christoforo, A.L., Cota, F.P., Borges, P.R., Bowen, C.R., 2011. Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. *Advances in Composite Materials-Analysis of Natural and Man-Made Materials*, 411-436.
- Poorababi, A., Ghasemi, M., Moghaddam, M.A., 2020. Concrete Compressive Strength Prediction Using Non-Destructive Tests Through Response Surface Methodology. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 939-949.
- Popovics, S., 1998. History of a Mathematical Model for Strength Development of Portland Cement Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, pp. 593-600.
- Raja, M.N.A., Shukla, S.K., 2021. Predicting the Settlement of Geosynthetic-Reinforced Soil Foundations Using Evolutionary Artificial Intelligence Technique. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 49, Issue 5, 1280-1293.
- Shishegaran, A., Varraee, H., Rabczuk, T., Shishegaran, G., 2021. High Correlated Variables Creator Machine: Prediction of the Compressive Strength of Concrete. *Computers & Structures*, 247, 106479.
- Siraj, N., 2015. Prediction of Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Network, Fuzzy System Model and Thermodynamic Methods. Addis Ababa University Institute of Technology, Master Thesis, 99p.
- Snell, L.M., Van Roekel, J., Wallace, N.D., 1989. Predicting Early Concrete Strength. *Concrete International*, 11(12), 43-47.
- Sun, Y., Li, G., Zhang, J., Qian, D., 2019. Prediction of the Strength of Rubberized Concrete by an Evolved Random Forest Model. *Advances in Civil Engineering*, Volume 2019, Article ID 5198583, 7 pages.
- Tayfur, G., Erdem, T.K., Kırca, Ö., 2014. Strength Prediction of High-Strength Concrete by Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014079.
- TS EN 933-2, 1996. Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Kısım 2: Tane Boyutu Dağılımı Tayini-Deney Elekleri, Elek Göz Açıklıklarının Anma Büyüklükleri. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 197-1, 2011. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS 3530 EN 933-1, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elementer Metodu. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 206-1, 2014. Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 12390-2, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2010. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini için Metotlar. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, 2009. Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- Tuncay Başpınar, E., 2015. Isparta Yöresinde Yeralan Kaya Birimlerinden Elde Edilen Agregaların Beton Performansına Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, 228s, Isparta, Türkiye.

- Zhang, X., Nguyen, H., Bui, X.N., Le, H.A., Nguyen-Thoi, T., Moayedi, H., Mahesh, V., 2020. Evaluating and Predicting the Stability of Roadways in Tunnelling and Underground Space Using Artificial Neural Network-Based Particle Swarm Optimization. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103517.
- Zhong, J., Feng, L., Ong, Y.S., 2017. Gene expression Programming: A Survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 12(3), 54-72.



DOĞA İLHAMLI OPTİMİZASYON KULLANARAK ÖZELLİK SEÇİMİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE MEME KANSERİ TEŞHİSİ

Onur SEVLİ*

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
Burdur, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Meme Kanseri Teşhisi,
Doğa İlhamlı Optimizasyon,
Özellik Seçimi,
Makine Öğrenmesi.*

Öz

Meme kanseri kadınlarda en yaygın görülen kanser türü ve en çok ölüme sebep olan hastalıktır. Erken teşhis ve tedavi edilirse iyileşme ve hayatta kalma olasılığı yükselmektedir. Makine öğrenmesi, medikal alanda farklı uygulamalarıyla kanser türlerinin erken teşhisinde uzmanlar için başarılı bir karar destek sistemi rolü üstlenmektedir. Bir hastalığın tanısı için toplanan çok sayıda özelliğin tümünün birlikte kullanımını analiz süreci ve başarısını olumsuz etkileyebilmektedir. Toplanan verilerden en etkin özniteliklerin seçilmesi ve bunları kullanarak tahminlemeler yapılması teşhis başarısını artırabilmektedir. Bu çalışmada meme kanseri konusunda literatürde yaygın kullanılan UCI WDBC veri seti üzerinde KNN, RO ve DVM algoritmaları ile öznitelik seçimi olmadan ve öznitelik seçimi uygulanarak sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Öznitelik seçimi konusunda başarılı sonuçlar sağlayan doğa ilhamlı algoritmalarından Guguk Kuşu Arama (GKA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Balina Optimizasyon (BO) algoritması ve Kızıl Geyik (KG) algoritması kullanılarak ve bu algoritmaların 25, 50 ve 75 parçacıklı sürüleri ile 30 öznitelikli orijinal WDBC veri seti üzerinde öznitelik seçimleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek doğruluk 75 parçacıklı GKA ile seçilen 16 adet öznitelik ile RO sınıflandırıcı kullanılarak %99.12 olarak elde edilmiştir. Öznitelik seçimi yapılarak gerçekleştirilen sınıflandırmalardaki doğruluklarının, seçim yapılmadan elde edilen sonuçlardan yüksek olduğu görülmüştür. Eldeki bulgular literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve daha yüksek başarı sağladığı gözlenmiştir.

BREAST CANCER DIAGNOSIS WITH FEATURE SELECTION USING NATURE-INSPIRED OPTIMIZATION AND MACHINE LEARNING

Keywords

*Breast Cancer Diagnosis,
Nature-Inspired Optimization,
Feature Selection,
Machine Learning.*

Abstract

Breast cancer is the most common type of cancer in women and is the leading cause of death. If diagnosed and treated early, the rate of recovery and survival increases. Machine learning, with different applications in the medical field, plays a successful decision support role for experts in the early diagnosis of cancer types. Using all of the many features collected to diagnose a disease can negatively affect the analysis process and success. Selecting the most effective features from the collected data and making predictions using them can increase the success of the diagnosis. In this study, classifications were carried out on the UCI WDBC dataset, which is widely used in the literature on breast cancer, with KNN, RF, and SVM, without feature selection and by applying feature selection. Feature selection operations were performed on the original WDBC dataset containing 30 features, using nature-inspired algorithms Cuckoo Search (CS), Particle Swarm Optimization (PSO), Whale Optimization (WOA), and Red Deer Algorithm (RDA) consisting of 25, 50, and 75 particles. The highest accuracy was obtained with the RO classifier as 99.12%, using 16 features selected with 75-particle CS. It was observed that the accuracy of the classifications made by feature selection was higher than the results obtained without feature selection. The findings were compared with the current studies in the literature and it was observed that it provided higher success.

* İlgili yazar / Corresponding author: onursevli@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-4130

Alıntı / Cite

Sevli, O. (2022). Doğa İlhamlı Optimizasyon Kullanarak Özellik Seçimi ve Makine Öğrenmesi ile Meme Kanseri Teşhisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 442-452.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

O. Sevli, 0000-0002-8933-8395

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 14.11.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 16.01.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 24.01.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Kanser, hücrelerin büyümesini düzenlemekten sorumlu genlerdeki mutasyonlar veya anormal değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıkar. Normal şartlarda vücuttaki hücreler düzenli hücre bölünmeleri ile yenilenirler. Yaşlanan hücreler ölürken yerlerini yeni hücreler alır. Ancak oluşan anormallikler sebebiyle değişen hücre kontrolsüz ve düzensiz olarak bölünmeye devam ederek tümör oluşturma potansiyeli kazanır. Tümörler iyi huylu (benign) veya kötü huylu (malignant) olabilir. İyi huylu tümörler yavaş büyürler, yakınındaki dokuları istila etmez ve vücudun diğer bölgelerine yayılmazlar. Bu nedenle iyi huylu tümörler kanserli olarak kabul edilmezler. Kötü huylu tümörler ise kanserlidir ve kontrol altına alınmazlarsa hızla çoğalarak vücudun diğer bölgelerine yayılabilirler.

Meme tümörleri, meme dokusunda özellikle süt kanalları ve bezlerindeki hücrelerin olağandışı bölünmesi sonucu büyüyen ve farklılaşan kitleler şeklinde kendini gösterir (Jerez-Aragonés vd., 2003). Kitlenin pürüzsüz yapıda olması ve sınırlarının belirli olması iyi huylu olduğunu, düzensiz sınırlara sahip olması ve pürüzlü olması ise kötü huylu olduğunu, yani kanser riski taşıdığını gösterir (Papageorgiou vd., 2015). Meme kanseri kadınlarda en yaygın görülen kanser türü ve en yüksek oranda ölüme sebep olan hastalıktır (Shrivastavat vd., 2013). Son dönemdeki istatistikler meme kanserinin %11.7'lik görülme oranıyla akciğer kanserini geride bıraktığını ve kanser kaynaklı ölümlerin genelinde %6.9'luk bir paya sahip olduğunu göstermektedir (Sung vd., 2021). Diğer tüm kanser türlerinde olduğu gibi meme kanserinin de erken dönemde teşhis ve tedavi edilmesi, iyileşme ve hayatta kalma olasılığını yükseltir. Ancak düzenli ve periyodik kontrollerin yapılmaması halinde çoğu hastaya ileri safhalarda tanı konulabilmektedir. Meme kanseri tanısı uzmanlık gerektirmekte fakat uzmanlar tarafından manuel olarak gerçekleştirilen testler bazen yanlış sonuçlar verebilmektedir (Kumar & Bhargava, 2019). Bu durum uzmanların sağlıklı kararlar vermelerine yardımcı olacak otomatik karar destek sistemlerini gündeme getirmektedir (Sinha vd., 2020).

Meme kanseri tanısında konsültasyon raporları, histopatolojik görüntüler, kan testi sonuçları, mamografik görüntüler gibi çok sayıda veri elde edilir. Bu veriler doğru kullanıldığında bir destek sistemi rolü üstlenecek güçlü tahmin modelleri oluşturulabilir. Yapay zekanın bir alt dalı olan makine öğrenmesi, verilerin analiz edilmesi ve en iyi tanılama için veriler arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasını sağlar (Bayrak vd., 2019). Makine öğrenmesi alanındaki sınıflandırma teknikleri, meme kanseri gibi kanser türlerinin nispeten erken aşamada, kısa sürede ve etkin şekilde tespitinde de kullanılabilir.

Makine öğrenmesi teknikleri ile meme kanseri tespiti konusunda Wisconsin Breast Cancer Diagnostic (WDBC) veri seti literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu veri seti meme dokusundaki kitleleri tespit etmek için ince iğne aspirasyon (fine-needle aspiration / FNA) biyopsisi tekniği ile elde edilen görüntülerin sayısallaştırılmış özelliklerinden oluşmaktadır. Genel olarak bu veri seti üzerinde, farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen son dönemdeki çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Khorshid vd. (2021) Matlab kullanarak, 5 farklı makine öğrenmesi tekniği ile meme tümörü tespitine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Destek Vektör Makinesi (DVM), Lojistik Regresyon (LR), K-En yakın Komşu (KNN), Ağırlıklandırılmış KNN(W-KNN) ve Gaussian Naïve Bayes (Gaussian NB) algoritmaları kullanarak gerçekleştirdikleri sınıflandırmalarda en yüksek doğruluğu %96.7 olarak W-KNN ile elde etmişlerdir. Ahuja vd. (2021) ise veri seti üzerinde PCA ile boyut indirgeme yapıp daha sonra aykırı değerlerin temizlenmesinin ardından gerçekleştirdikleri sınıflandırmalarda W-KNN yöntemiyle %98.9 doğruluğa ulaşmışlardır. Vijayakumar vd. (2021) derin sinir ağları (DNN) ile farklı aktivasyon fonksiyonları ve optimize ediciler kullanarak sınıflandırma çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. ReLU aktivasyon fonksiyonu ve Adagrad optimize edici kullanarak gerçekleştirdikleri sınıflandırma çalışmasında %97.94 doğruluk değerine ulaşmışlardır. Feroz vd. (2021) farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak gerçekleştirdikleri karşılaştırmalı sınıflandırmalarda KNN ve Rastgele Orman (RO) yöntemleri ile %97.14 doğruluk değerine ulaşmışlardır. Muhammad Amin ve Inna (2021) ise Lojistik Regresyon (LR) yöntemi ile %93.9 doğruluk elde etmişlerdir. Jabbar (2021) Bayes ağı ve Radial Basis Function (RBF) birleşimi ile oluşturduğu kolektif öğrenme (ensemble learning) algoritmasını kullanarak %97 doğruluk değerine ulaşmıştır.

Assegie (2021) KNN algoritmasının hiperparametrelerinin varsayılan değerlerini kullanarak ve ayrıca hiperparametre optimizasyonu yaparak gerçekleştirdiği iki ayrı sınıflandırmada sırayla %90.10 ve %94.35 doğruluk elde etmiştir. Gupta ve Kaushik (2021) KNN, LR, RO, DVM ve sinir ağları (NN) algoritmalarının birleşimi ile oluşturdukları kolektif öğrenme tekniği ile gerçekleştirdikleri sınıflandırmada %97.9 doğruluğa ulaşmışlardır. Ghosh vd. (2021) bir derin öğrenme tekniği olan Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modeli kullanarak gerçekleştirdikleri sınıflandırmada %99.1 doğruluk elde etmişlerdir. Lahoura vd. (2021) KNN, Naïve Bayes (NB) ve DVM algoritmaları kullanarak sırası ile %90.64, %84.80, %92.98 sınıflandırma doğruluğuna ulaşmışlardır.

Pravesjit vd. (2021) veri seti üzerinde Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması ve NB sınıflandırıcı kullanarak gerçekleştirdikleri sınıflandırmada %97.27 doğruluk değerine ulaşmışlardır. Jijitha ve Amudha (2021) ise Genetik Algoritmalar (GA) ile öznitelik seçimi yaparak ve öznitelik seçimi olmaksızın sınıflandırmalar gerçekleştirmişlerdir. Öznitelik seçimi olmadan LR ile %96.5, KNN ile %79.02 doğruluk elde ederken, öznitelik seçimi uygulandığı durumda doğruluk değerleri %98.24 ve %95.1'e yükselmiştir. Devi vd. (2021) veri setinde öznitelik seçimi uygulayarak elde ettikleri 16 elemanlı alt set üzerinde LR ve NN'den oluşan kolektif sınıflandırma algoritması kullanarak %98.5 doğruluk elde etmişlerdir.

Parekh ve Dahiya (2021) DVM ve NN kullanarak gerçekleştirdikleri karşılaştırmalı sınıflandırma çalışmasında %96.48 ve %96.04 doğruluk elde etmişlerdir. Naji vd. (2021), veri setinden seçtikleri özellikler üzerinde DVM, RO, LR, Karar Ağacı (KA) ve KNN kullanarak gerçekleştirdikleri karşılaştırmalı sınıflandırma çalışmasında %93.2 ile %97.2 arasında değişen doğruluk değerleri elde etmişlerdir. %97.2 oranla en yüksek sonucu DVM algoritması sağlamıştır. Magboo ve Magboo (2021) veriler üzerinde ölçekleme, PCA ve yeniden örnekleme yöntemleri ile birlikte LR, NB, KNN ve DVM algoritmaları kullanarak sınıflandırmalar gerçekleştirmişlerdir. En yüksek doğruluğu %80 olarak LR sınıflandırıcı ile birlikte PCA kullandıkları durumda elde etmişlerdir. Al-Azzam, ve Shatnawi (2021), meme kanseri tespitinde danışmanlı ve yarı danışmanlı makine öğrenmesi tekniklerinin performanslarını karşılaştıran bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Danışmanlı öğrenmede KNN ve yarı danışmanlı öğrenmede LR modeli %98 ile en yüksek doğruluğu sağlamıştır. Pawar vd. (2021) veri seti üzerinde özelliklerin ölçeklendirilmesinin ardından DVM, KNN, KA, RO, AdaBoost ve XGBoost olmak üzere altı farklı sınıflandırıcı ile karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. En yüksek doğruluk değeri %98.24 olarak XGBoost sınıflandırıcı ile elde edilmiştir. Al-Yaseen vd. (2021) veri setini %75 eğitim ve %25 test seti olarak ayırmışlar, eğitim seti üzerinde KMeans kullanarak gerçekleştirdikleri kümeleme ile özellikleri indirgeyerek eğitim süresini kısaltmayı hedeflemişlerdir. İndirgenen veriler üzerinde DVM kullanarak gerçekleştirdikleri sınıflandırmada % 98.067 doğruluk elde etmişlerdir. Ara vd. (2021) öznitelik seçiminin ardından LR, KNN, KA, NB, RO ve DVM algoritmaları kullanarak gerçekleştirdikleri sınıflandırmalarda en yüksek doğruluğu %96.5 olarak DVM ile elde etmişlerdir.

Bu çalışmada WDBC veri seti üzerinde farklı makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak meme kanseri durumunun tespitine yönelik sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Orijinal veri seti üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırmalar yanında sınıflandırma öncesinde 4 farklı Doğa ilhamlı Optimizasyon Algoritması (DOA) kullanılarak öznitelik seçim işlemi uygulanmıştır. Her bir sınıflandırıcının performansı öznitelik seçimi olmaksızın ve öznitelik seçimi uygulanarak raporlanmıştır. Elde edilen bulgular aynı veri setini kullanan ve son dönemde yapılan literatürdeki güncel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Devam eden bölümlerde kullanılan veri setinin özellikleri, kullanılan sınıflandırma ve optimizasyon yöntemleri, araştırma bulguları ve karşılaştırma ile sonuç bölümleri yer almaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Veri Seti (Dataset)

Çalışmada kullanılan Wisconsin Breast Cancer Diagnostic (WDBC) veri seti, University of California Irvine (UCI) veri deposundan elde edilmiştir. Veriler Wisconsin Üniversite Hastanesi'nde Dr. Wolberg vd. tarafından toplanmış ve kamuya açık olarak paylaşımına sunulmuştur (UCI, 2021).

Veri setindeki öznitelikler, meme kitlelerinin FNA biyopsisi ile elde edilen görüntülerin sayısallaştırılması ile elde edilmiştir. Bu öznitelikler görüntüdeki hücre çekirdeğinin morfolojik özellikleridir. 30 adet tanımlayıcı özellik ve bir adet teşhis parametresi olmak üzere toplam 31 adet öznitelik bulunmaktadır. Her bir hücre çekirdeği için 10 ana özelliğin ortalama, standart hata ve en kötü (en büyük) değeri ile toplam 30 öznitelik tanımlanmıştır. 10 ana özellik ve elde edilmiş biçimleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu 10 adet özelliğin ortalama (mean), standart hata (error) ve en kötü (worst) olmak üzere üçer farklı değeri ile toplam 30 adet öznitelik oluşturulmuştur. Bu ölçümlere kitlenin iyi huylu (Benign) ya da kötü huylu (Malignant) olma durumunu belirten Diagnosis isimli teşhis özniteliği eklenerek veri seti tanımlanmıştır. Veri seti içerisinde toplam 569 adet örnek yer almaktadır. Bunlardan 357 adedi iyi huylu, 212 adedi ise kötü huylu yani kanserlidir.

Tablo 1. Verinin ana özellikleri (Main features of the data)

| ÖZELLİK ADI | AÇIKLAMA | ELDE EDİLİŞ ŞEKLİ |
|--------------------------|--------------------------|---|
| Radius | Yarıçap | Sınırın kütle merkezinden sınır noktalarının her birine doğru olan radyal doğru parçalarının uzunluğunun ortalaması şeklinde hesaplanmıştır. |
| Texture | Doku | Piksellerindeki gri yoğunluklarının varyansı alınarak elde edilmiştir. |
| Perimeter | Çevre | Ardışık sınır noktaları arasındaki mesafelerin toplamı ile hesaplanmıştır. |
| Area | Alan | Sınırın iç kısmındaki pikseller sayılarak elde edilmiştir. |
| Smoothness | Düzensizlik, pürüzsüzlük | Her bir radyal çizginin uzunluğu ile onu çevreleyen iki radyal çizginin ortalama uzunluğu arasındaki fark ölçülerek elde edilmiştir. |
| Compactness | Kompaktlık | Çevrenin karesinin alana bölümü ile hesaplanmıştır |
| Concavity | İçbükeylik | Hücre çekirdeğinin sınırındaki girintilerin boyutu ölçülerek elde edilmiştir. |
| Concave points | İçbükey noktalar | Sınırın içbükey bölgelerinde yer alan sınır noktalarının sayısıdır |
| Symmetry | Simetri | Hücre çekirdeğinin ana eksenine dik çizgi çiftleri arasındaki orantılı uzunluk farkı bulunarak ölçülmüştür. |
| Fractal dimension | Fraktal boyut | Çekirdeğin çevresi giderek büyüyen cetveller ile ölçülmüştür. Değerlerin log-log ölçeğinde çizilmesi ve düşey eğimin hesaplanması ile fraktal boyuta bir yaklaşık değer negatif olarak elde edilir. |

2.2. Sınıflandırmada Kullanılan Makine Öğrenmesi Teknikleri (Machine Learning Techniques Used for Classification)

Bu çalışmada sınıflandırma için literatürde de yaygın olarak kullanılan 3 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Bunlar; K-En yakın Komşu (K-Nearest Neighbor / KNN), Rastgele Orman (RO) ve Destek Vektör Makinesi (DVM)' dir.

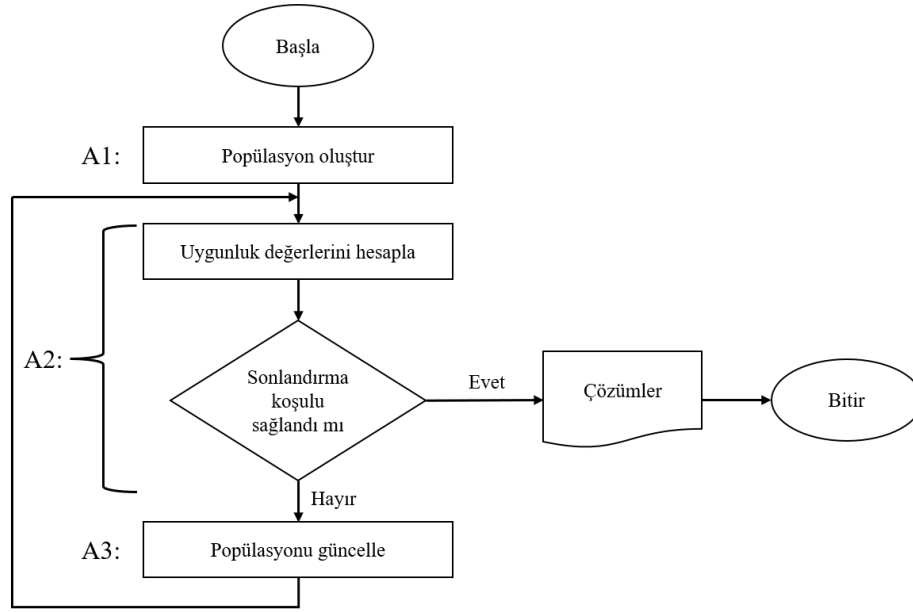
KNN algoritması, literatüre Fix ve Hodges (1952) tarafından kazandırılan, sınıflandırma ve regresyon problemleri için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Sınıfı belirlenmek istenen nokta K adet en yakın komşunun oyuyla en yaygın olan sınıfa atanır. KNN mesafeye dayalı ve en temel makine öğrenmesi algoritmalarından biridir. KNN ile gerçekleştirilen sınıflandırmada çıktı, bir sınıfın üyeliğidir.

RO algoritması, eğitim esnasında çok sayıda karar ağacı oluşturularak, her bir ağacın ürettiği sonuçların modu veya ortalamasını alıp çıktı sınıfın belirlenmesini sağlayan kolektif bir öğrenme algoritmasıdır. Ho (1995) tarafından oluşturulan yöntem dayanan RO, daha sonra Breiman (2001) tarafından geliştirilerek literatüre kazandırılmıştır. RO, geleneksel karar ağaçlarında yaygın problemlerden biri olan aşırı uydurma (overfitting) sorununa hem veri seti, hem de öznitelikleri çok sayıda parçaya bölüp birden çok ağaç üzerinde işleyerek çözüm getirir.

DVM algoritması, Vapnik vd. (1997) tarafından literatüre kazandırılan, istatistiksel öğrenme teorisine dayalı bir yöntemdir. DVM, her biri ayrı kategorilere ait olarak işaretlenmiş eğitim setinden öğrenerek, yeni örnekleri bu sınıflardan birine olasılıklı olmayacak şekilde atayan bir model oluşturur. Veri örneklerinin yer aldığı düzlemde, sınıfları birbirinden ayırmak için, iki sınıfın üyelerinden en uzak mesafede olacak şekilde bir karar sınırının çizilmesi sağlanır. DVM'nin, aşırı uydurma problemi karşısındaki hassasiyetinin düşük olması ve yüksek doğruluk sağlaması kullanım yaygınlığını arttırmaktadır.

2.3. Öznitelik Seçiminde Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları (Optimization Algorithms Used for Feature Selection)

Doğa ilhamlı optimizasyon algoritmaları (DOA), bitki ve hayvan davranışlarından, sürü zekası, fiziksel, biyolojik, kimyasal sistemler dahil olmak üzere doğadan ilham alan bir grup algoritma olarak tanımlanır (Fister Jr vd., 2013). Bu algoritmalar global optimize edicilerdir ve optimal çözümü bulmak için dengeli global ve yerel arama bileşenlerine sahiptirler (Dhal vd., 2019). Parçacık temelli olarak çalışan DOA'lar, çok sayıda parçacık ile ideal sonucu arama ve hesaplama süreçlerini yerine getirirler. Temel mantıkları benzer olan DOA'ların genel işleyiş biçimini gösterir akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. DOA genel işleyiş diyagramı (General mechanism diagram of nature inspired optimization algorithms)

A1 olarak işaretlenmiş adımda optimizasyon algoritmasının başlangıç popülasyonu mümkün olduğu kadar geniş çözüm alanını kapsayacak şekilde rastgele yöntemlerle oluşturulur. Popülasyon büyüklüğü gereksinimlere bağlı olarak ve elde edilen tecrübeler doğrultusunda seçilir. DOA'ların çoğu iteratif yöntemler kullanır ve maksimum iterasyon sayısı, hassasiyet eşiği gibi sonlandırma parametreleri de A1 adımında belirlenir. A2 adımında her bir parçacığın uygunluk değerleri bir uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak hesaplanır. Uygunluk fonksiyonu, her bir çözümün performansını yansıtan benzersiz bir göstergedir ve genellikle maksimum veya minimum değere sahip olan hedef fonksiyona uygun şekilde tasarlanmıştır. Genel olarak her bireyin kendi yerel optimal çözümü vardır ve tüm popülasyonun da global bir optimumu vardır. A2 adımında, her iterasyonda popülasyonun uygunluk değerleri hesaplanır ve global en iyi çözüm, sonlandırma koşullarını sağlıyorsa çıkış olarak verilir. Aksi halde iç etkileşimlerle popülasyonu iyileştirmek için gerekli işlemlerin uygulandığı A3 adımına geçilir. Güncellenen popülasyon sonraki iterasyonu gerçekleştirmek üzere A2 adımına geri döner.

Gerçek dünya problemlerinde mevcut olan büyük verilerin çok sayıda özellik ve/veya örneğe sahip olması analiz etme sürecini zorlaştırmakta ve başarısı düşük sonuçların üretilmesine neden olmaktadır. Öznitelik seçimi (feature selection), optimal çözümleri elde etmek için bir veri kümesi oluşturan özelliklerin tümünden en uygun özellikleri belirleme ve seçme işlemidir. Öznitelik seçiminin iki temel amacı sınıflandırma doğruluğunu en üst düzeye çıkarmak ve öznitelik sayısını en aza indirmektir (Arora & Anand, 2019). Bu iki amaç çoğu durumda birbirleriyle çatışsa da ikisi arasında bir denge oluşturup mümkün olduğunca az ve etkin özelliklerle en yüksek doğruluğa ulaşmak hedeflenir.

DOA'lar veri setlerinden öznitelik alt seti seçimi konusunda son dönemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada öznitelik seçimi için Guguk Kuşu Arama (GKA) algoritması (Cuckoo search), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması (Particle swarm optimization), Balina Optimizasyon (BO) algoritması (Whale optimization) ve Kızıl Geyik (KG) algoritması (Red deer algorithm) olmak üzere 4 farklı DOA kullanılmıştır.

GKA algoritması, bazı guguk kuşu türlerinin yumurtalarını diğer ev sahibi türlerin yuvalarına bırakarak asalak biçimde üreme davranışlarından esinlenerek Yang ve Deb (2009) tarafından formülize edilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Ev sahibi kuş yumurtaların kendine ait olmadığını keşfederse bu yumurtaları yuvadan atabilir ya da yuvasını terk ederek başka bir yerde yeni yuva kurabilir. Tapera gibi bazı guguk kuşu türleri asalak üreme için evrimleşerek yumurtalarını seçilen ev sahibi türün yumurtalarına benzer renk ve desende yapma konusunda ustalaşmışlardır. GKA algoritmasında, içerisinde yumurtaların yer aldığı her bir yuva, çözüm uzayında bir parçacığı temsil eder. Parçacıklar çözüm uzayına Lévy Uçuşları adlı rastgele hareket desenine bağlı olarak konumlanır. Her bir parçacığın bulunduğu konumda uygunluk değeri hesaplanır. Uygunluk fonksiyonunda iyi değerler üreten yuvalar/yumurtalar bir sonraki nesle aktarılır. Yuvalarını başka kuşlara kaptıran kuşlar (parçacıklar) ise yeni yuva arayışına girerek optimizasyon sürecini devam ettirirler.

PSO algoritması, balık ve kuş gibi sürüler halinde yaşayan canlıların yiyecek bulma gibi temel ihtiyaçlarını giderirken bireysel olarak gerçekleştirdikleri davranışların sürüdeki diğer bireyleri etkileyerek, sürünün amacına daha kolay ulaşmasını sağladığının gözlenmesinden hareketle Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen

bir optimizasyon algoritmasıdır. PSO'da çözüme ulaşmaya çalışan her bir bireye parçacık, parçacıklardan oluşan popülasyona ise sürü adı verilir. Her parçacığın çözüme ne kadar yaklaştığı uygunluk fonksiyonu ile hesaplanır. Parçacığın hareketi ve yeni durumu, parçacığın kendi en iyi çözümü ve tüm popülasyondaki global en iyi çözüm temel alınarak, bir değişim hızı fonksiyonu ile belirlenir. Ardından uygunluk fonksiyonu kullanılarak çözüme ne kadar yaklaşıldığı tekrar kontrol edilir. Bu döngü belirlenen iterasyon şartları sağlanana kadar devam eder.

BO algoritması, Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından geliştirilen, kambur balinaların avlanma davranışlarından esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır. Kambur balinalar "kabarçık ağı avlanma manevrası" adı verilen bir taktik kullanırlar. Yüzeğe yakın küçük balıkları avlamayı tercih eden kambur balinalar, yiyecek arama esnasında spiraller çizerek ve belirgin kabarcıklar çıkararak hareket ederler. BO algoritmasında avını arayan her bir balina bir parçacığı, çok sayıda balinadan oluşan popülasyon ise sürüyü oluşturur. BO'da popülasyon çok boyutlu bir uzayda arama yapar. Bir balina ile avı arasındaki mesafe maliyet değerine karşılık gelir. Bu algoritmada balinaların konumu zamana bağlı bir değerdir. Bireyin zamana bağlı konumu üç operasyonel süreçle ölçümlenir: Keşif aşaması, avın çevrelediği halkanın küçültülmesi ve kabarcık ağı saldırısı. Kambur balina avın konumunu belirleyip onu çevreler. Arama uzayındaki optimal çözümün yeri önceden bilinmediğinden BO mevcut en iyi adayın hedef av olduğunu ve optimuma en yakın olduğunu varsayar. Algoritma en iyi arama ajanını belirlemeye çalışırken diğer ajanlar da konumlarını en iyiye göre günceller. Konumların belirlenmesi esnasında kambur balinaların hareketlerini taklit eden spiral bir matematiksel fonksiyon kullanılır. Optimum çözüme ulaşana kadar güncelleme süreci devam eder.

KG algoritması İskoç kızıl geyiğinin (*Cervus Elaphus Scoticus*) üreme davranışından esinlenerek Fathollahi-Fard vd. (2020) tarafından geliştirilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Popülasyon erkek ve dişi geyiklerden oluşur. Üreme sezonunda erkek geyikler sık sık kükrerler. Yüksek sesle kükreyen erkek dişiler tarafından daha çok tercih edilir. Kükrere oranı hem üreme başarısı hem de savaşma yeteneği ile pozitif ilişkilidir. Kükrere oranı yüksek erkekler hem diğer erkekler üzerinde baskı oluşturma hem de dişiler tarafından daha yüksek farkedilirliğe sahip olmalarından dolayı üreme başarıları artar. Güçlü kükreyen erkekler grup içerisinde komutan rolüne yükselir. Her komutan kendine ait bölgelerde kendi çiftleşme alanlarını oluşturur. Yakın çiftleşme alanlarındaki komutan geyikler birbirleri ile savaşır ve galip olan komutan diğerinin çiftleşme alanına girer. KG algoritması rastgele bir ilk popülasyonla başlar. Her bir bireyin çözümü yakınlığı bir uygunluk fonksiyonu ile belirlenir. En iyi çözümleri temsil eden geyiklerin kükrere oranları yüksektir. Yüksek kükrere oranına sahip belirli sayıda geyik komutan olarak kendi çiftleşme alanlarını oluşturur. Her komutan kendi çiftleşme alanında belirli bir yüzdelik dilimde dişi ile çiftleşir. Aynı zamanda komutanlar savaşarak galip geldikleri diğer komutanların çiftleşme alanında da belirli bir yüzdelik oranda dişi geyik ile çiftleşir. Aynı zamanda erkek geyikler kendilerine en yakın dişi ile de çiftleşir. Bu şekilde oluşturulan yeni popülasyondan uygunluk fonksiyonuna göre yeni nesiller seçilir. Optimum çözüme ulaşana kadar süreç devam eder.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada 30 adet giriş özneliği ve 1 adet hedef teşhis parametresinden oluşan WDBC veri seti üzerinde sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada veri setindeki tüm öznelikler kullanılarak 3 farklı makine öğrenmesi algoritmasının sınıflandırma başarıları test edilmiştir. Ardından veri setinin orijinal öznelikleri içerisinde dört farklı DOA kullanarak öznelik alt setleri seçilmiş ve bu setler üzerinde aynı sınıflandırma algoritmaları kullanılarak işlemler tekrarlanmıştır. Orijinal veri setinde yer alan 30 adet giriş özneliği ve veri seti içindeki sıra numaraları Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2. WDBC veri setinin öznelikleri (Features of the WDBC dataset)

| ÖZNEİELİK NO | ÖZNEİELİK ADI | ÖZNEİELİK NO | ÖZNEİELİK ADI |
|--------------|------------------------|--------------|-------------------------|
| 1 | mean radius | 16 | compactness error |
| 2 | mean texture | 17 | concavity error |
| 3 | mean perimeter | 18 | concave points error |
| 4 | mean area | 19 | symmetry error |
| 5 | mean smoothness | 20 | fractal dimension error |
| 6 | mean compactness | 21 | worst radius |
| 7 | mean concavity | 22 | worst texture |
| 8 | mean concave points | 23 | worst perimeter |
| 9 | mean symmetry | 24 | worst area |
| 10 | mean fractal dimension | 25 | worst smoothness |
| 11 | radius error | 26 | worst compactness |
| 12 | texture error | 27 | worst concavity |
| 13 | perimeter error | 28 | worst concave points |
| 14 | area error | 29 | worst symmetry |
| 15 | smoothness error | 30 | worst fractal dimension |

Sınıflandırma işlemlerinin başarısını raporlamak için karmaşıklık matrislerinden elde edilen değerler ile hesaplanan metrikler kullanılmıştır. Bir karmaşıklık matrisinin genel yapısı Şekil 2’de verilmiştir.

| | | Gerçek sınıf | |
|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| | | Meme kanseri | Kanser değil |
| Tahmin edilen sınıf | Meme kanseri | Doğru Pozitif (DP) | Yanlış Pozitif (YP) |
| | Kanser değil | Yanlış Negatif (YN) | Doğru Negatif (DN) |

Şekil 2. Karmaşıklık matrisi (Confusion matrix)

Sınıflandırıcı tarafından meme kanseri olduğu belirlenen örneğin gerçek sınıfı da meme kanseri ise bu durum Doğru Pozitif (DP), gerçek sınıfı kanser değil ise Yanlış Pozitif (YP) olarak adlandırılır. Benzer şekilde sınıflandırıcının kanserli olmadığını belirlediği örneğin gerçek sınıfı da kanserli değil ise bu durum Doğru Negatif (DN), gerçek sınıfı meme kanseri ise Yanlış Negatif (YN) olarak adlandırılır. Bu değerler kullanılarak hesaplanan performans metrikleri ve formülleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Model performans metrikleri (Model performance metrics)

| METRİK | MATEMATİKSEL İFADESİ |
|------------|---|
| Doğruluk | $(DP + DN) / (DP + YP + YN + DN)$ |
| Kesinlik | $DP / (DP + YP)$ |
| Duyarlılık | $DP / (DP + YN)$ |
| F1 Skoru | $2 * kesinlik * duyarlılık / (kesinlik + duyarlılık)$ |

İlk etapta WDBC veri setinde yer alan ve Tablo 2’de belirtilen 30 özneliğin tamamı kullanılarak KNN, RO ve DVM yöntemleri ile sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sınıflandırma yöntemlerinin parametreleri üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamış olup varsayılan değerleriyle kullanılmıştır. 5 kat çapraz doğrulama kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinin sonuçları Tablo 3’te belirtilen metrikler ile raporlanmıştır. Öznelik seçimi uygulanmadan gerçekleştirilen bu sınıflandırmalar sonucunda elde edilen bulgular Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Öznelik seçimi yapılmadan elde edilen sonuçlar (Results without feature selection)

| ÖZNETELİK SAYISI | SINIFLANDIRICI | DOĞRULUK | KESİNLİK | DUYARLILIK | F1 SKORU |
|------------------|----------------|----------|----------|------------|----------|
| 30 (tamamı) | KNN | 0,929825 | 0,910256 | 0,986111 | 0,946667 |
| | RO | 0,938596 | 0,933333 | 0,972222 | 0,952381 |
| | DVM | 0,921053 | 0,909091 | 0,972222 | 0,939597 |

İkinci aşamada WDBC veri setinde yer alan öznelikler üzerinde GKA, PSO, BO, KG olmak 4 farklı DOA ile, farklı sayıda parçacıklar kullanılarak öznelik alt seti seçimleri gerçekleştirilmiştir. Her bir DOA için 25, 50 ve 75 adet parçacık kullanılarak, her biri 100’er iterasyon çalıştırılmıştır. Seçilen öznelikler üzerinde KNN, RO ve DVM yöntemleri ile sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Her bir durumda seçilen öznelikler ve bunlar üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırmalara ait bulgular Tablo 5’te yer almaktadır.

Tablo 5’teki sonuçlar incelendiğinde her bir DOA için parçacık sayısındaki artışın elde edilen sınıflandırma başarılarında da artış sağladığı görülmektedir. Ayrıca parçacık sayısındaki artış genel olarak daha çok özneliğin seçilmesini sağlamıştır. En yüksek doğruluk değeri GKA algoritması ile 75 parçacık kullanılarak seçilen 16 adet öznelik üzerinde RO sınıflandırıcı ile %99.12 olarak elde edilmiştir. Kesinlik ve duyarlılık metrikleri için %100 değer elde edilen farklı durumlar bulunmakla birlikte bu iki metriğin dengesini ifade eden F1 Skorunun en yüksek değeri yine aynı sınıflandırma işleminde %99.30 olarak elde edilmiştir. Farklı sınıflandırmalarda seçilen en az öznelik sayısı 12 olup, bu sayıda öznelikle elde edilen en yüksek doğruluk %97.36 olarak RO algoritması ile 25 parçacıklı PSO ve 50 parçacıklı KG kullanılan durumlarda elde edilmiştir. En az parçacıkla, en az sayıda öznelik seçilerek en iyi doğruluğu PSO ile birlikte RO kullanılan durum sağlamıştır. Gerçekleştirilen sınıflandırmalar sonucunda, kullanılan DOA ve sınıflandırıcı bazında elde edilen en yüksek doğruluk değerleri özet olarak Tablo 6’da verilmiştir.

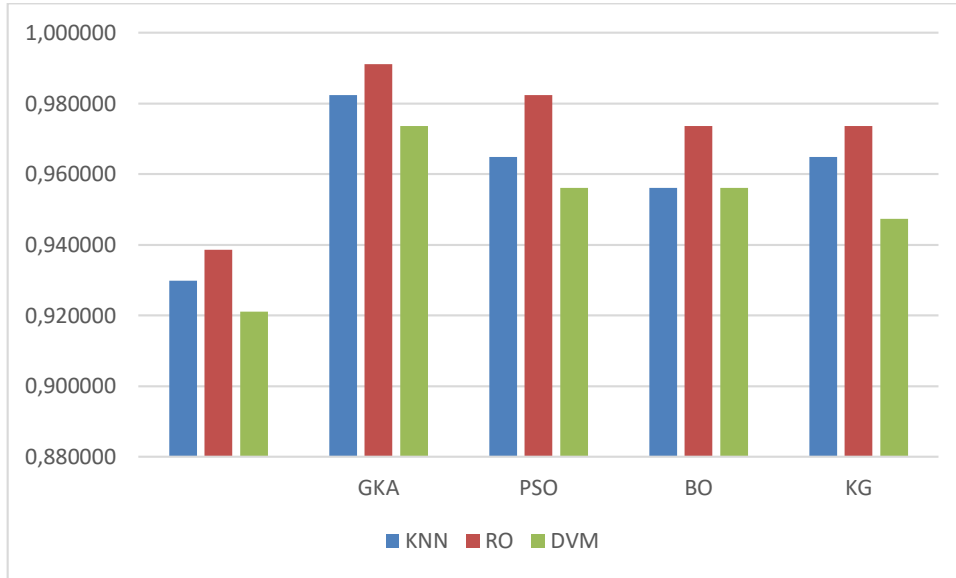
Tablo 5. Öznitelik seçimi ile elde edilen sonuçlar (Results with feature selection)

| DOA | PARÇACIK SAYISI | SEÇİLEN ÖZİNTELİKLER | ÖZİNTELİK SAYISI | SINIFLANDIRICI | DOĞRULUK | KESİNLİK | DUYARLILIK | F1 SKORU |
|-----|-----------------|---|------------------|----------------|-------------------|------------|------------|-------------------|
| GKA | 25 | 1-5-7-8-10-21-22-23-29 | 9 | KNN | 0,93859649 | 0,97101449 | 0,93055556 | 0,95035461 |
| | | | | RO | 0,96491228 | 0,94736842 | 1 | 0,97297297 |
| | | | | DVM | 0,96521739 | 0,97260274 | 0,97260274 | 0,97260274 |
| | 50 | 1-3-6-11-13-19-20-21-22-23-26-27-28-29-30 | 15 | KNN | 0,97368421 | 0,98591549 | 0,97222222 | 0,97902098 |
| | | | | RO | 0,98245614 | 1 | 0,97222222 | 0,98591549 |
| | | | | DVM | 0,97368421 | 0,97260274 | 0,98611111 | 0,97931034 |
| | 75 | 2-3-5-6-8-9-10-11-12-17-18-19-20-22-23-26 | 16 | KNN | 0,98245614 | 0,98611111 | 0,98611111 | 0,98611111 |
| | | | | RO | 0,99122807 | 1 | 0,98611111 | 0,99300699 |
| | | | | DVM | 0,97368421 | 0,97260274 | 0,98611111 | 0,97931034 |
| PSO | 25 | 2-8-10-12-13-17-18-20-23-25-28-29 | 12 | KNN | 0,95614035 | 0,95890411 | 0,97222222 | 0,96551724 |
| | | | | RO | 0,97368421 | 0,97260274 | 0,98611111 | 0,97931034 |
| | | | | DVM | 0,92982456 | 0,93243243 | 0,95833333 | 0,94520548 |
| | 50 | 1-2-3-5-7-8-9-11-12-22-23-26-27-28-29-30 | 16 | KNN | 0,96491228 | 0,97222222 | 0,97222222 | 0,97222222 |
| | | | | RO | 0,96491228 | 0,95945946 | 0,98611111 | 0,97260274 |
| | | | | DVM | 0,95614035 | 0,93506494 | 1 | 0,96644295 |
| | 75 | 1-2-3-4-5-6-9-10-14-17-18-19-20-24-27-29-30 | 17 | KNN | 0,95614035 | 0,95890411 | 0,97222222 | 0,96551724 |
| | | | | RO | 0,98245614 | 0,97297297 | 1 | 0,98630137 |
| | | | | DVM | 0,95614035 | 0,94666667 | 0,98611111 | 0,96598639 |
| BO | 25 | 1-5-6-10-11-12-13-17-21-25-27-29-30 | 13 | KNN | 0,93859649 | 0,93333333 | 0,97222222 | 0,95238095 |
| | | | | RO | 0,95614035 | 0,93506494 | 1 | 0,96644295 |
| | | | | DVM | 0,92982456 | 0,9 | 1 | 0,94736842 |
| | 50 | 1-4-5-6-9-12-13-15-16-18-20-22-24-26-28-29-30 | 17 | KNN | 0,95614035 | 0,94666667 | 0,98611111 | 0,96598639 |
| | | | | RO | 0,97368421 | 0,97260274 | 0,98611111 | 0,97931034 |
| | | | | DVM | 0,93859649 | 0,92207792 | 0,98611111 | 0,95302013 |
| | 75 | 3-5-7-9-10-12-13-14-15-17-18-19-21-22-23-28-29-30 | 18 | KNN | 0,94736842 | 0,94594595 | 0,97222222 | 0,95890411 |
| | | | | RO | 0,96491228 | 0,97222222 | 0,97222222 | 0,97222222 |
| | | | | DVM | 0,92982456 | 0,91025641 | 0,98611111 | 0,94666667 |
| KG | 25 | 1-2-6-7-11-13-15-16-17-18-20-21-22-23-25-29-30 | 17 | KNN | 0,95614035 | 0,95890411 | 0,97222222 | 0,96551724 |
| | | | | RO | 0,96491228 | 0,94736842 | 1 | 0,97297297 |
| | | | | DVM | 0,94736842 | 0,94594595 | 0,97222222 | 0,95890411 |
| | 50 | 5-8-9-12-15-17-19-20-21-22-26-27 | 12 | KNN | 0,96491228 | 0,95945946 | 0,98611111 | 0,97260274 |
| | | | | RO | 0,97368421 | 0,98591549 | 0,97222222 | 0,97902098 |
| | | | | DVM | 0,94736842 | 0,94594595 | 0,97222222 | 0,95890411 |
| | 75 | 2-3-6-8-11-12-16-18-21-22-23-28-29 | 13 | KNN | 0,95614035 | 0,93506494 | 1 | 0,96644295 |
| | | | | RO | 0,97368421 | 0,96 | 1 | 0,97959184 |
| | | | | DVM | 0,93859649 | 0,91139241 | 1 | 0,95364238 |

Tablo 6. Elde edilen en iyi doğruluk değerleri (The best accuracy values obtained)

| DOA | KNN | RO | DVM | Ortalama |
|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------|
| - | 0,929825 | 0,938596 | 0,921053 | 0,929825 |
| GKA | 0,982456 | 0,991228 | 0,973684 | 0,982456 |
| PSO | 0,964912 | 0,982456 | 0,95614 | 0,967836 |
| BO | 0,95614 | 0,973684 | 0,95614 | 0,961988 |
| KG | 0,964912 | 0,973684 | 0,947368 | 0,961988 |
| Ortalama | 0,959649 | 0,97193 | 0,950877 | |

Tablo 6'daki değerler doğrultusunda öz nitelik seçimi olmadan ve farklı DOA'lar ile öz nitelik seçimi yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 2'de grafik olarak da gösterilmiştir.



Şekil 2. Özellik seçimi ile ve özellik seçimi olmadan elde edilen en iyi doğruluk değerleri (Best accuracy values obtained with and without feature selection)

Sonuçlar incelendiğinde öz nitelik seçimi yapılan tüm durumlarda elde edilen başarının öz nitelik seçimi yapılmadan gerçekleştirilen sınıflandırmalardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Tüm sınıflandırıcılar için en yüksek doğruluk değerlerinin GKA algoritması kullanılarak öz nitelik seçimi yapılan durumlarda elde edildiği görülmektedir. GKA kullanılarak elde edilen sınıflandırma doğruluklarının ortalaması %98.24 iken, ikinci sırada %96.78 ortalama ile PSO, ardından %96.19 ile BO ve KG gelmektedir. Kullanılan 3 sınıflandırıcı içerisinde en yüksek başarı RO ile elde edilmiştir. RO kullanılarak elde edilen doğruluk değerlerinin ortalaması %97.19 iken, bunu %95.96 ile KNN ve %95.08 ile DVM takip etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulguların, aynı veri setini kullanılan literatürdeki güncel çalışmaların bulguları ile karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Bulguların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması (Comparison of the findings with the literature)

| | REFERANS | YÖNTEM | EN İYİ DOĞRULUK (%) |
|----|------------------------------|--------------------|---------------------|
| 1 | (Khorshid vd., 2021) | W-KNN | 96.7 |
| 2 | (Ahuja vd., 2021) | W-KNN + PCA | 98.9 |
| 3 | (Vijayakumar vd., 2021) | ReLU DNN + Adagrad | 97.94 |
| 4 | (Feroz vd., 2021) | KNN ve RO | 97.14 |
| 5 | (Muhammad Amin & Inna, 2021) | LR | 93.9 |
| 6 | (Jabbar, 2021) | Bayes + RBF | 97 |
| 7 | (Assegie, 2021) | Optimized KNN | 94.35 |
| 8 | (Gupta & Kaushik, 2021) | Ensemble learning | 97.9 |
| 9 | (Ghosh vd., 2021) | LSTM | 99.10 |
| 10 | (Lahoura vd., 2021) | DVM | 92.98 |
| 11 | (Pravesjit vd., 2021) | NB+PSO | 97.27 |
| 12 | (Jijitha & Amudha, 2021) | LR+GA | 98.24 |
| 13 | (Devi vd., 2021) | LR+NN | 98.5 |
| 14 | (Parekh vd., 2021) | DVM | 96.48 |
| 15 | (Naji vd., 2021) | DVM | 97.2 |
| 16 | (Magboo & Magboo, 2021) | LR+PCA | 80 |
| 17 | (Al-Azzam & Shatnawi, 2021) | KNN ve LR | 98 |
| 18 | (Pawar vd., 2021) | XGBoost | 98.24 |
| 19 | (Al-Yaseen vd., 2021) | KMeans + DVM | 98.067 |
| 20 | (Ara vd., 2021) | DVM | 96.5 |
| | Bu çalışma | RO+GKA | 99.122 |

Tablo 7'de yer alan çalışmalar ile karşılaştırıldığında bu çalışmada GKA algoritması ve RO sınıflandırıcı kullanılarak elde edilen %99.12'lik doğruluk oranının diğer çalışmalardan daha yüksek olduğu görülmektedir.

DOA kullanan diğer iki çalışmada Pravesjit vd. (2021) PSO ve NB ile %97.27, Jijitha ve Amudha (2021) GA ve LR kullanarak %98.24 ile bu çalışmadan daha düşük bir doğruluk elde etmişlerdir. Devi vd. (2021) sınıflandırma öncesinden gerçekleştirdikleri öznitelik seçiminde bu çalışmaya benzer şekilde 16 elemanlı bir öznitelik alt seti elde etmişler, bunun üzerinde LR ve NN'den oluşan kolektif bir yöntemle %98.5 oranla bu çalışmadan daha düşük bir doğruluğa ulaşmışlardır. Bu çalışma ile benzer RO sınıflandırıcı kullanan Feroz vd. (2021) tarafından yürütülen diğer çalışmada elde edilen doğruluk ise %97.14'tür. Bu çalışmaya en yakın doğruluk ise %99.1 olarak Ghosh vd. (2021) tarafından daha kompleks bir derin öğrenme yöntemi ile elde edilmiştir.

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada meme kanseri tespitinde literatürde yaygın kullanılan WDBC veri seti üzerinde öznitelik seçimi ve farklı sınıflandırıcıların performansları üzerine test ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Öznitelik seçimi için farklı doğa ilhamlı optimizasyon algoritmaları kullanılarak başarıları karşılaştırılmıştır. 30 öznitelikten oluşan orijinal veri seti üzerinde KNN, RO ve DVM algoritmaları ile gerçekleştirilen sınıflandırmalarda en yüksek doğruluk %93.85 olarak RO sınıflandırıcı ile elde edilmiştir. Veri setindeki tüm özniteliklerin kullanılması analiz sürecini zorlaştırmakta ve başarısı düşük sonuçların üretilmesine neden olabilmektedir. Bunu test etmek amacıyla orijinal veri seti üzerinde GKA, PSO, BO ve KG olmak üzere 4 ayrı optimizasyon algoritması ile öznitelik seçim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ardından seçilen öznitelik alt setleri üzerinde aynı sınıflandırıcılarla gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinde %10'a varan başarı artışı olduğu gözlenmiştir. Optimizasyon algoritmalarının parçacık sayıları değiştirilerek performans değişimleri izlenmiş, genel anlamda parçacık sayısının artması ile seçilen özniteliklerdeki değişimin başarıyı arttırdığı görülmüştür. Öznitelik seçimi ile gerçekleştirilen sınıflandırmalarda en başarılı sonuç 75 parçacıklı GKA algoritması ve RO sınıflandırıcı kullanılan durumda %99.12 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bulgular literatürde aynı veri setini kullanan güncel çalışmaların bulguları ile karşılaştırılmış ve genelinden daha yüksek sonuç elde edildiği görülmüştür. Geçekleştirilen bu çalışma meme kanseri tespiti konusunda uzman bir karar destek sisteminin oluşturulmasında başarı ile kullanılabilir niteliktedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Ahuja, A., Al-Zogbi, L., & Krieger, A. (2021). Application of Noise-Reduction Techniques to Machine Learning Algorithms for Breast Cancer Tumor Identification. *Computers in Biology and Medicine*, 104576.
- Al-Azzam, N., & Shatnawi, I. (2021). Comparing supervised and semi-supervised Machine Learning Models on Diagnosing Breast Cancer. *Annals of Medicine and Surgery*, 62, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2020.12.043>
- Al-Yaseen, W., Jehad, A., Abed, C. I., & Idrees, A. K. (2021). The use of modified K-Means algorithm to enhance the performance of support vector machine in classifying breast cancer. *Int. J. Intell. Eng. Syst*, 14(2).
- Ara, S., Das, A., & Dey, A. (2021). Malignant and Benign Breast Cancer Classification using Machine Learning Algorithms. 2021 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI), 97-101.
- Arora, S., & Anand, P. (2019). Binary butterfly optimization approaches for feature selection. *Expert Systems with Applications*, 116, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.051>
- Assegie, T. A. (2021). An optimized K-Nearest Neighbor based breast cancer detection. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(3), 115-118.
- Bayrak, E. A., Kırıcı, P., & Ensari, T. (2019). Comparison of machine learning methods for breast cancer diagnosis. 2019 Scientific meeting on electrical-electronics & biomedical engineering and computer science (EBBT), 1-3.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- Devi, M. V., Sravani, M., Ramya, K., Bindulakshmisai, N., Parameshwari, V., & others. (2021). Breast Cancer Diagnosis Using Adaptive Voting Ensemble Machine Learning Algorithm. *UGC Care Group I Listed Journal*, 11(1), 495-501.
- Dhal, K. G., Ray, S., Das, A., & Das, S. (2019). A Survey on Nature-Inspired Optimization Algorithms and Their Application in Image Enhancement Domain. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26(5), 1607-1638. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9289-9>
- Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). Red deer algorithm (RDA): A new nature-inspired meta-heuristic. *Soft Computing*, 24(19), 14637-14665.
- Feroz, N., Ahad, M. A., & Doja, F. (2021). Machine Learning Techniques for Improved Breast Cancer Detection and Prognosis—A Comparative Analysis. *Çinde Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning* (ss. 441-455). Springer.
- Fister Jr, I., Yang, X.-S., Fister, I., Brest, J., & Fister, D. (2013). A brief review of nature-inspired algorithms for optimization. *arXiv preprint arXiv:1307.4186*.
- Fix, E., & Hodges Jr, J. L. (1952). Discriminatory analysis-nonparametric discrimination: Small sample performance. *California Univ Berkeley*.

- Ghosh, P., Azam, S., Hasib, K. M., Karim, A., Jonkman, M., & Anwar, A. (2021). A Performance Based Study on Deep Learning Algorithms in the Effective Prediction of Breast Cancer. 2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 1-8.
- Gupta, N., & Kaushik, B. N. (2021). Prognosis and Prediction of Breast Cancer Using Machine Learning and Ensemble-Based Training Model. *The Computer Journal*.
- Ho, T. K. (1995). Random decision forests. *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition*, 1, 278-282.
- Jabbar, M. A. (2021). Breast Cancer Data Classification Using Ensemble Machine Learning. *Engineering and Applied Science Research*, 48(1), 65-72.
- Jerez-Aragonés, J. M., Gómez-Ruiz, J. A., Ramos-Jiménez, G., Muñoz-Pérez, J., & Alba-Conejo, E. (2003). A combined neural network and decision trees model for prognosis of breast cancer relapse. *Artificial intelligence in medicine*, 27(1), 45-63.
- Jijitha, S., & Amudha, T. (2021). Breast cancer prognosis using machine learning techniques and genetic algorithm: Experiment on six different datasets. *İcinde Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks (ss. 703-711)*. Springer.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 4, 1942-1948.
- Khorshid, S. F., Abdulazeez, A. M., & Sallow, A. B. (2021). A comparative analysis and predicting for breast cancer detection based on data mining models. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 45-59.
- Kumar, S., & Bhargava, C. (2019). A review on Breast Cancer Analysis using Machine Learning. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6, 326-329.
- Lahoura, V., Singh, H., Aggarwal, A., Sharma, B., Mohammed, M. A., Damaševičius, R., Kadry, S., & Cengiz, K. (2021). Cloud computing-based framework for breast cancer diagnosis using extreme learning machine. *Diagnostics*, 11(2), 241.
- Magboo, V. P. C., & Magboo, M. S. A. (2021). Machine Learning Classifiers on Breast Cancer Recurrences. *Procedia Computer Science*, 192, 2742-2752. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.044>
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
- Muhammad Amin, B., & Inna, E. (2021). Breast Cancer Prediction Model Using Machine Learning. *Journal of Data Science*, 2021(02).
- Naji, M. A., Filali, S. E., Aarika, K., Benlahmar, E. H., Abdelouhahid, R. A., & Debauche, O. (2021). Machine Learning Algorithms For Breast Cancer Prediction And Diagnosis. *Procedia Computer Science*, 191, 487-492. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.062>
- Papageorgiou, E. I., Subramanian, J., Karmegam, A., & Papandrianos, N. (2015). A risk management model for familial breast cancer: A new application using Fuzzy Cognitive Map method. *Computer methods and programs in biomedicine*, 122(2), 123-135.
- Parekh, D. H., Dahiya, V., & others. (2021). Predicting breast cancer using machine learning classifiers and enhancing the output by combining the predictions to generate optimal F1-score. *Biomedical and Biotechnology Research Journal (BBRJ)*, 5(3), 331.
- Pawar, S., Bagal, P., Shukla, P., & Dawkhar, A. (2021). Detection of Breast Cancer using Machine Learning Classifier. 2021 Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ASIANCON51346.2021.9544767>
- Pravesjit, S., Longpradit, P., Kantawong, K., Pengchata, R., & Oul, N. (2021). A Hybrid PSO with Rao Algorithm for Classification of Wisconsin Breast Cancer Dataset. 2021 2nd International Conference on Big Data Analytics and Practices (IBDAP), 68-71. <https://doi.org/10.1109/IBDAP52511.2021.9552152>
- Shrivastavat, S. S., Sant, A., & Aharwal, R. P. (2013). An overview on data mining approach on breast cancer data. *International Journal of Advanced Computer Research*, 3(4), 256.
- Sinha, N. K., Khulal, M., Gurung, M., & Lal, A. (2020). Developing a web based system for breast cancer prediction using xgboost classifier. *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, 9.
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, 71(3), 209-249.
- UCI. (2021). Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set. Erişim tarihi 04 Ekim 2021, [https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Breast+Cancer+Wisconsin+\(Diagnostic\)](https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Breast+Cancer+Wisconsin+(Diagnostic))
- Vapnik, V., Golowich, S. E., Smola, A., & others. (1997). Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. *Advances in neural information processing systems*, 281-287.
- Vijayakumar, K., Kadam, V. J., & Sharma, S. K. (2021). Breast cancer diagnosis using multiple activation deep neural network. *Concurrent Engineering*, 29(3), 275-284.
- Yang, X.-S., & Deb, S. (2009). Cuckoo Search via Lévy flights. 2009 World Congress on Nature Biologically Inspired Computing (NaBIC), 210-214. <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393690>



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGGREGATE SPECIFIC GRAVITY ON OPTIMUM BITUMEN CONTENT OF HOT MIX ASPHALT

Mehmet SALTAN¹, Gizem KAÇAROĞLU^{1*}, Öznur KARADAĞ¹, İslam GÖKALP², Volkan Emre UZ³

^{1*} Suleyman Demirel University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Isparta, Türkiye

² Batman University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering Department, Batman, Türkiye

³ İzmir Institute of Technology, Civil Engineering, İzmir, Türkiye

Keywords

Aggregate Specific Gravity, Superpave, Indirect Tensile Strength, Moisture Sensitivity.

Abstract

In this study, effect of aggregate specific gravity, which is directly related to origin of aggregates used in hot mix asphalt on optimum bitumen content, indirect tensile strength and tensile strength ratio of hot mix asphalt, was investigated. Specific gravity (SG) values of one kind of limestone aggregate were calculated according to Turkish Standard (TS), American Society for Testing and Materials (ASTM) and American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) standards, separately. Although one kind of limestone aggregate and 50/70 penetration grade bitumen are used in the mixtures, different values were obtained in terms of optimum bitumen content, indirect tensile strength and moisture sensitivity due to differences in the specific gravity values of the aggregates. Optimum bitumen contents were found by using TS, ASTM and AASHTO standards as 5.03%, 4.75% and 4.59%, respectively. According to the cost – benefit analysis, it can be said that changes in aggregate specific gravity values, which were calculated, based on different standards provide economic benefit. Overall, the results indicated that specific gravity values of one kind of limestone aggregate used in hot mix asphalt have significantly affected optimum bitumen content and indirect tensile strength of the mixtures.

SICAK KARIŞIM ASFALTIN OPTİMUM BİTÜM ORANI ÜZERİNE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler

Agrega Özgül Ağırlığı, Superpave, İndirekt Çekme Dayanımı, Nem Hassasiyeti.

Öz

Bu çalışmada, sıcak karışım asfaltta kullanılan agregaların kökeni ile doğrudan ilişkili olan agreganın özgül ağırlığının, sıcak karışım asfaltın optimum bitüm oranı, indirekt çekme dayanımı ve çekme dayanımı oranı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bir tür kireçtaşı agreganın özgül ağırlık değerleri Türk Standardı (TS), Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) ve Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği (AASHTO) standartlarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Karışımlarda tek çeşit kireçtaşı agregası ve 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmasına rağmen, agregaların özgül ağırlık değerlerindeki farklılıklardan dolayı optimum bitüm oranı, indirekt çekme dayanımı ve nem hassasiyeti açısından farklı değerler elde edilmiştir. Optimum bitüm içerikleri TS, ASTM ve AASHTO standartları kullanılarak sırasıyla %5,03, %4,75 ve %4,59 olarak bulunmuştur. Fayda – maliyet analizine göre farklı standartlar esas alınarak hesaplanan agreganın özgül ağırlık değerlerindeki değişimlerin ekonomik fayda sağladığı söylenebilir. Genel olarak sonuçlar, sıcak karışım asfaltta kullanılan bir tür kireçtaşı agregasının özgül ağırlık değerlerinin, karışımların optimum bitüm oranını ve indirekt çekme dayanımını önemli derecede etkilediğini göstermiştir.

Alıntı / Cite

Saltan, M., Kaçaroglu, G., Karadağ, Ö., Gökalp, İ., Uz, V.E., (2022). Investigation of the Effect of Aggregate Specific Gravity on Optimum Bitumen Content of Hot Mix Asphalt, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(2), 453-465.

* İlgili yazar/ Corresponding author: gizemkacaroglu07@gmail.com, +90-246-211-0833

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|---|---|------------|
| M. Saltan, 0000-0001-6221-4918 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 15.11.2021 |
| G. Kaçaroğlu, 0000-0002-5734-7131 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 19.01.2022 |
| Ö. Karadağ, 0000-0003-0755-5626 | Kabul Tarihi / Accepted Date | 07.02.2022 |
| İ. Gökalp, 0000-0003-3198-3508 | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |
| V.E. Uz, 0000-0002-9328-4756 | | |

1. Introduction

Properties of aggregates and bitumen affect significantly design parameters of hot mix asphalt (HMA). The physical (such as specific gravity, angularity, water absorption, surface texture etc.) and mechanical properties (including resistance to crushing, polishing, weathering etc.) of the aggregates which consisted of 95% by weight of hot mix asphalt affect the performance of the pavement. In addition, it is known that the chemical, rheological and physical properties (such as viscosity, softening point etc.) of bitumen also affect the performance of the pavement. Different studies are carried out on properties of bitumen and aggregates to improve the properties of hot mix asphalt.

The angularity of coarse and fine aggregates has an impact on the strength, stiffness, permeability and air void parameters of asphalt mixtures. Ramli et al. (2013) investigated the effect of angularity of fine aggregates on tensile strength and rutting resistance of HMA. As the angularity of fine aggregates increases, the interlocking of the aggregates in the asphalt mixture increased. Thus, it was seen that the tensile strength and rutting resistance of asphalt mixtures are increased. The study fails to consider the different characteristics of aggregates in different origin. It is well-known that the aggregates in different origin show different physical properties including shape, angularity and surface texture and these characteristics may cause positive or negative effects on HMA design parameters (Bessa et al., 2015). Moreover, structural and functional performance of HMA is affected by these aggregate properties.

Depending on the crushing type, origin and shape (cubical, rounded, flat, and elongated) of aggregates, the performance of mixture can be differed. Since cubical aggregates provide excellence interlocking and good internal friction, they are preferred (Li et al., 2019). This aspect can be proved with a study which Adishesu et al. (2011) investigated the shape characteristics of aggregates on HMA performance. Asphalt mixtures prepared using angularity coarse aggregates have exhibited higher strength than asphalt mixtures prepared using flat-elongated coarse aggregates. It is also indicated that interlocking among the coarse aggregates provide significantly uniform load distribution and strengthen pavement surface against repeated traffic loads and harsh environmental conditions. Contacts among aggregates cause an increase in internal forces that result in fraction on aggregates. Mahmoud et al. (2010) evaluated the effect of aggregate gradation, shape and strength of aggregates on degradation of asphalt mixes. According to their comprehensive survey, it was seen that as internal friction increases, degradation in aggregates which observed is less.

The deteriorations in the pavement occur due to environmental conditions (temperature, life of pavement), repeated wheel, poor mixture design (air void, gradation curve) and the properties of the aggregates and bitumen forming the mixture. Aggregates used in mixtures significantly affect the performance of mixtures under applied external loads and environmental conditions. The most effective parameter in the formation of rutting on the pavement is the aggregate properties. Both the types of aggregates and determined aggregate gradation are effective in resistance to rutting. For example, some studies, which examined the relationship between the rutting characteristics of HMA and type of aggregate, promoted that rutting resistance is predominantly affected by aggregate type (Afaf, 2014; Al-Khateeb et al., 2013). While rutting behavior depending on temperature has changed linearly for asphalt mixtures prepared using basalt, it has changed exponentially for asphalt mixes prepared using limestone. The optimum bitumen content also largely depends on the types of aggregate and aggregate gradation. Aggregate gradation is one of the most important aggregate properties that affect the permanent deformation of hot mix asphalt. When the aggregate gradation curve approaches the lowest limit, permanent deformation and rutting resistance of the mixtures increase and decrease, respectively (Golalipour et al., 2012). Fatigue cracking is another common deterioration of the pavement due to repeated traffic loads and temperature changes. Moreno and Rubio (2013) investigated the effect of different aggregates (ophite and limestone) origin on fatigue cracking performance of HMA. Although the moisture sensitivity values of hot mix asphalt prepared using ophite and limestone aggregates were similar, it showed better resistance to fatigue cracking of hot mix asphalt which prepared using limestone aggregates. When asphalt mixtures are exposed to water, deteriorations such as raveling, stripping may be observed due to the decreasing of adhesion between aggregate and bitumen. The chemical structure of aggregates used in the mixture plays an important role on water-resistant capability of HMA (Cui et al., 2014). In Behiry's study, HMA mixtures prepared with limestone exhibited better stripping resistance than the ones prepared with granite (Behiry, 2013). In addition, when it comes to

sensitivity to water, the chemical structure of aggregate is more important than its porosity (Cui et al., 2014). Besides the environmental conditions and traffic volume, types of aggregates used in the mixtures affect the occurrence of stripping in the pavement. It has been observed that, when compared with mixtures prepared with limestone, more stripping has been occurred in mixtures prepared with aggregates such as granite, gravel (Behiry, 2013). The deteriorations such as fatigue cracks and rutting which are affected the performance and structure of pavement may be increased with moisture. As the adhesion between aggregate and bitumen increases in HMA mixtures, the structural and functional performance of the pavement increases. Stripping resistance of HMA mixtures is significantly increased in as a result of the modification of bitumen with polyethylene for both limestone and granite aggregates (Nejad et al., 2013).

In current study, it was aimed to determine the specific gravity of one kind of limestone aggregates according to different standards. The standards used in the study other than the Turkish Standard (TS) were determined by considering the standards used in previous studies (Table 1). When Table 1 is examined, it seen that although there are aggregates of different origin and their specific gravity is calculated using different standards, the specific gravity value of aggregate is slightly different in some studies. The effect of these differences seen in the calculation of specific gravity of aggregate on bituminous hot mixes was examined. In this study, specific gravities of one kind of limestone aggregates were calculated according to TS, ASTM and AASHTO standards. Optimum bitumen content, indirect tensile strength and moisture sensitivity of bituminous hot mixes which prepared by taking into account obtained values of specific gravity were examined. According to the calculated optimum bitumen contents, cost-benefit analysis was performed for the 400 m³ hot mix asphalt mixtures (wearing course with 5 cm thick and 1 km pavement length and 8 m platform width).

Table 1. Specific gravity values of limestone aggregates

| Research | Standard | Specific Gravity of Limestone (g/cm ³) | | |
|-----------------------------|-------------|--|-----------------|--------|
| | | Coarse Aggregate | Fine Aggregates | Filler |
| Kök and Çolak, 2011 | ASTM C 127 | 2.613 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.622 | - |
| | ASTM D854 | - | - | 2.711 |
| Nejad et al., 2012 | ASTM C 127 | 2.643 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.633 | - |
| | ASTM D 854 | - | - | 2.640 |
| Arabani and Hamed, 2011 | ASTM C 127 | 2.643 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.633 | - |
| | ASTM D854 | - | - | 2.640 |
| Arabani et al., 2017 | ASTM C 127 | 2.641 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.645 | - |
| Ameri et al., 2016 | AASHTO T 85 | 2.654 | - | - |
| | AASHTO T 84 | - | 2.617 | - |
| | AASHTO T 84 | - | - | 2.702 |
| Haghshenas et al., 2015 | AASHTO T 85 | 2.520 | - | - |
| | AASHTO T 84 | - | 2.510 | - |
| Hesami et al., 2013 | AASHTO T 85 | 2.643 | - | - |
| | AASHTO T 84 | - | 2.633 | - |
| | ASTM D854 | - | - | 2.640 |
| Nejad et al., 2013 | ASTM C 127 | 2.643 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.633 | - |
| | ASTM D854 | - | - | 2.640 |
| Behiry, 2013 | ASTM C 127 | 2.60 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.65 | - |
| | ASTM C 128 | - | - | 2.72 |
| Al-Khateeb, 2013 | AASHTO T 85 | 2.699 | - | - |
| | AASHTO T 84 | - | 2.549 | - |
| Muniandy and Aburkaba, 2011 | ASTM C 127 | 2.620 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.580 | - |
| Hamed and Tahami, 2018 | ASTM C 127 | 2.58 | - | - |
| | ASTM C 128 | - | 2.57 | - |
| | ASTM D854 | - | - | 2.54 |

2. Material and Method

2.1. Bitumen and Aggregates

In the study 50/70 penetration grade bitumen is used. Penetration, softening point, specific gravity and viscosity tests were performed on the bitumen. Properties of bitumen and limestone aggregates are given in Table 2 – 3.

Table 2. Properties of bitumen

| Test | Bitumen | Standard |
|---------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| Penetration (0.1 mm) | 51 | TS EN 1426, |
| Softening Point (°C) | 50.3 | TS EN 1427 |
| Specific Gravity (g/cm ³) | 1.031 | TS EN 15326+A1 |
| Rotational Viscometer (cP) | 504 at 135 °C 138.2 at 165 °C | ASTM D 4402 |

Table 3. Properties of limestone aggregates

| Test | Aggregate | Standard |
|--|-----------|---------------|
| Resistance (Los Angeles wear loss) (%) | 18.48 | ASTM C 131-03 |
| Resistance (Micro – Deval wear loss) (%) | 9.95 | TS EN 1097-1 |
| Methylene Blue | 0.25 | TS EN 933-9 |
| Flakiness Index | 12.8 | TS EN 933-3 |
| Magnesium Sulphate (%) | 1 | TS EN 1367-2 |

In the study, the aggregates were used in three size that are classified as coarse aggregates (remaining on the 4.75 mm sieve), fine aggregates (passing through 4 mm sieve and remaining on the 0.063 mm sieve) and filler (passing 0.063 mm sieve).

2.2. Experimental Studies

Specific gravity (SG) and water absorption (WA) values of aggregates that have different sizes (coarse, fine aggregate and filler) were determined according to different standards (AASHTO, ASTM and TS).

The SG and WA values of coarse aggregates were determined with the standards coded with AASHTO T 85, ASTM C127 and TS EN 1097-6, whereas that of fine aggregates were determined with AASHTO T 84, ASTM C128 and TS EN 1097-6 standards. The specific gravity of the filler was calculated with the standards used to determine the specific gravity of fine aggregates. The tests, which carried out within the scope of this study, are shown in the flow diagram (Figure 1). In this section, the test procedures of the standards used for each type of grain sizes are presented in detail.

2.2.1. Determination of the Specific Gravity of Coarse, Fine Aggregates and Filler

The specific gravity of the coarse aggregates which used in the study was calculated according to TS EN 1097-6, BS EN 812-2, ASTM C127 and AASHTO T85 standards. Coarse aggregates remaining on a 4.75 mm sieve in TS EN 1097-6 and BS EN 812-2 standards are placed with in the wire basket and immersed in a tank containing water with 22±3 °C for 24 hours. In ASTM C127 and AASHTO T85 standards, coarse aggregates remaining on a 4.75 mm sieve are kept in a tray containing water with 22±3 °C for 24 hours and 15 hours respectively. When the specific gravity of coarse aggregates is calculated according to TS EN 1097-6 and BS EN 812-2 standards, the aggregate mass, the apparent mass of the wire basket containing the saturated aggregate sample in water and the apparent mass of the empty wire basket in water are taken into account. In ASTM C127 and AASHTO T85 standards, the mass of the air-dried test sample, the mass of the air-saturated surface dry test sample and the mass of the aggregate sample are taken into account.

The specific gravity of the fine aggregates which used in the study was calculated according to TS EN 1097-6, BS EN 812-2, ASTM C128 and AASHTO T84 standards. There are minor differences between TS EN 1097-6, BS EN 812-2, ASTM C128 and AASHTO T84 standards used to determine the specific gravity of fine aggregate. In TS EN 1097-6 standard, one kilo fine aggregates are placed in a water-filled pycnometer with 22±3 °C and kept in a water bath with 22±3 °C for 24 hours. According to BS EN 812-2 standard, 500 gr fine aggregates is waited in the water-filled tray. ASTM C128 and AASHTO T84 standards, one kilo of fine aggregate is kept in the water-filled tray with 22±3 °C for 24 hours and 15-19 hours respectively. The only difference between ASTM C128 and AASHTO T84 standards is the waited time of fine aggregates in water.

TS EN 1097-7, AASHTO T 84 and ASTM C128 standards were followed to determine the specific gravity of the filler materials. According to three different standards, only apparent specific gravity is calculated.

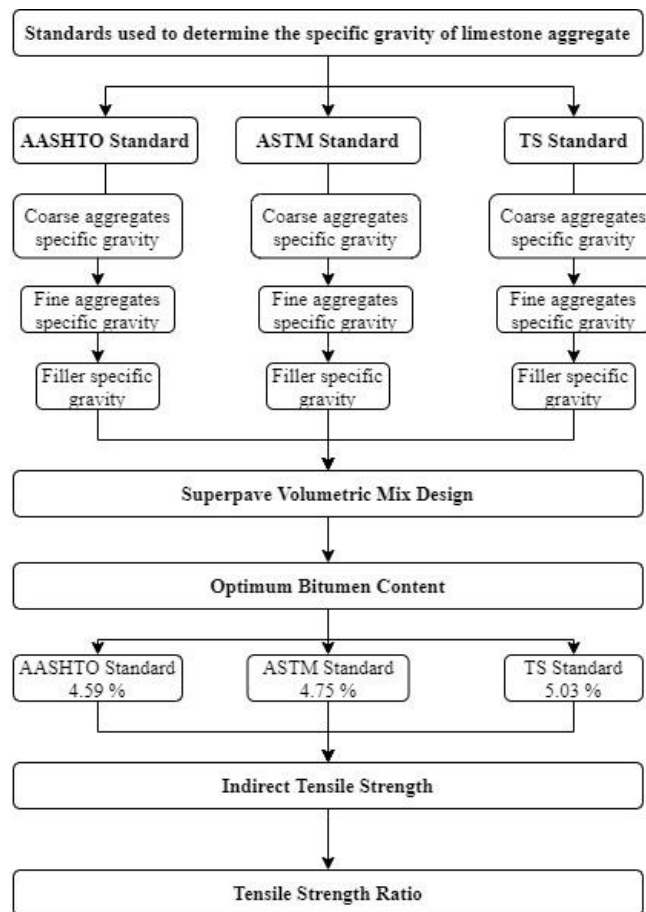


Figure 1. The tests that carried out within the scope of this study

2.2.1. Determination of the Specific Gravity of Coarse, Fine Aggregates and Filler

The specific gravity of the coarse aggregates which used in the study was calculated according to TS EN 1097-6, BS EN 812-2, ASTM C127 and AASHTO T85 standards. Coarse aggregates remaining on a 4.75 mm sieve in TS EN 1097-6 and BS EN 812-2 standards are placed with in the wire basket and immersed in a tank containing water with 22 ± 3 °C for 24 hours. In ASTM C127 and AASHTO T85 standards, coarse aggregates remaining on a 4.75 mm sieve are kept in a tray containing water with 22 ± 3 °C for 24 hours and 15 hours respectively. When the specific gravity of coarse aggregates is calculated according to TS EN 1097-6 and BS EN 812-2 standards, the aggregate mass, the apparent mass of the wire basket containing the saturated aggregate sample in water and the apparent mass of the empty wire basket in water are taken into account. In ASTM C127 and AASHTO T85 standards, the mass of the air-dried test sample, the mass of the air-saturated surface dry test sample and the mass of the aggregate sample are taken into account.

The specific gravity of the fine aggregates which used in the study was calculated according to TS EN 1097-6, BS EN 812-2, ASTM C128 and AASHTO T84 standards. There are minor differences between TS EN 1097-6, BS EN 812-2, ASTM C128 and AASHTO T84 standards used to determine the specific gravity of fine aggregate. In TS EN 1097-6 standard, one kilo fine aggregates are placed in a water-filled pycnometer with 22 ± 3 °C and kept in a water bath with 22 ± 3 °C for 24 hours. According to BS EN 812-2 standard, 500 gr fine aggregates is waited in the water-filled tray. ASTM C128 and AASHTO T84 standards, one kilo of fine aggregate is kept in the water-filled tray with 22 ± 3 °C for 24 hours and 15-19 hours respectively. The only difference between ASTM C128 and AASHTO T84 standards is the waited time of fine aggregates in water.

TS EN 1097-7, AASHTO T 84 and ASTM C128 standards were followed to determine the specific gravity of the filler materials. According to three different standards, only apparent specific gravity is calculated.

2.2.2. Superpave Volumetric Mix Design

Superpave volumetric mix design method consists of four steps: material selection, aggregate gradation, optimum bitumen content and moisture sensitivity. During all these steps, the temperatures and traffic volume are kept same. Aggregate grading curve for asphalt mixtures is given in Figure 2.

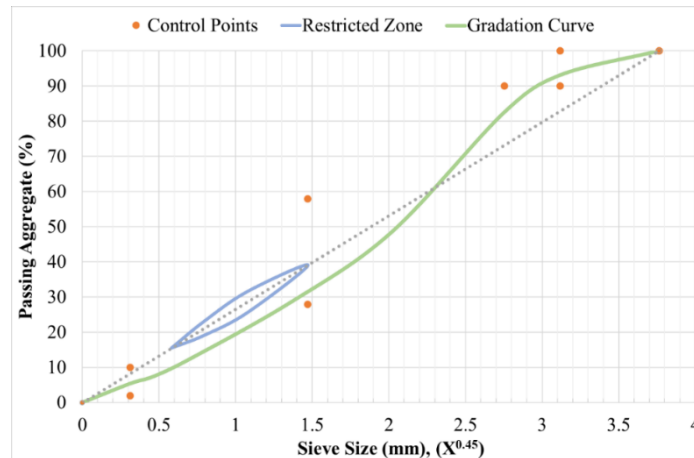


Figure 2. Gradation curve of aggregate mixture

The estimated traffic for 20-year design period is considered to be more than 30×10^6 equivalent standard axle loads. Within the scope of study, optimum bituminous binder content has been determined using volumetric mix design. N_{design} has been selected as 125 gyros for the estimated 20-year traffic load. While the optimum bituminous binder content is calculated, Voids in the Mineral Aggregate (VMA) Voids Filled with Asphalt (VFA) limit values, which are minimum. 14% and 65-75%, respectively, and 4% air void criteria have been taken into consideration.

2.2.3. Indirect Tensile Strength Test

The final step of the Superpave volumetric mix design method is to determine the moisture sensitivity of the prepared mixtures. In order to determine the moisture sensitivity, Indirect Tensile Strength test (ITS) is performed on the prepared HMA samples in accordance with AASHTO T 283 standard. ITS value of mixtures which compressed with Superpave gyrator compactor is calculated with Eq. (1). Afterwards, unconditioned (ITS_{dry}) and conditioned (ITS_{wet}) values for all samples are recorded. Using the results of ITS in dry and wet case, tensile strength ratio values are calculated using Eq. (2). It is worth to say that the required limit of TSR values is 80% (FHWA, 2000).

$$S_t = \frac{2P}{\pi tD} \quad (1)$$

Where ITS is indirect tensile strength (kPa), P means maximum load (kN), t is sample thickness (m) and D represents sample diameter (m).

$$TSR = \frac{ITS_{\text{wet}}}{ITS_{\text{dry}}} \quad (2)$$

Where TSR is tensile strength ratio (%), ITS_{wet} is average tensile strength of conditioned specimen (kPa) and ITS_{dry} is average tensile strength of unconditioned specimen (kPa).

3. Results and Discussions

3.1. The Specific Gravity of Coarse Aggregates

The specific gravity of the coarse aggregates used in the present study was calculated according to different standards (TS EN 1097-6, ASTM C127 and AASHTO T 85). In three different standards, specific bulk gravity, specific bulk gravity (saturated-surface-dry), apparent specific gravity and value of water absorption of coarse aggregates were determined as presented in Figure 3 and Figure 4. The only difference from AASHTO T85 standard of ASTM C127 standard is that coarse aggregates are kept in water for 9 hours more. This difference created 0.014 g/cm^3 difference between the specific bulk gravity (saturated-surface-dry) of the coarse aggregates. The difference between TS EN 1097-6 and ASTM C127 standards is that the coarse aggregates are kept in the wire basket and

tray, respectively. Due to the difference in the places where the coarse aggregates are kept in water, 0.012 g/cm^3 difference has occurred in the specific bulk gravity (saturated-surface-dry) of the coarse aggregates.

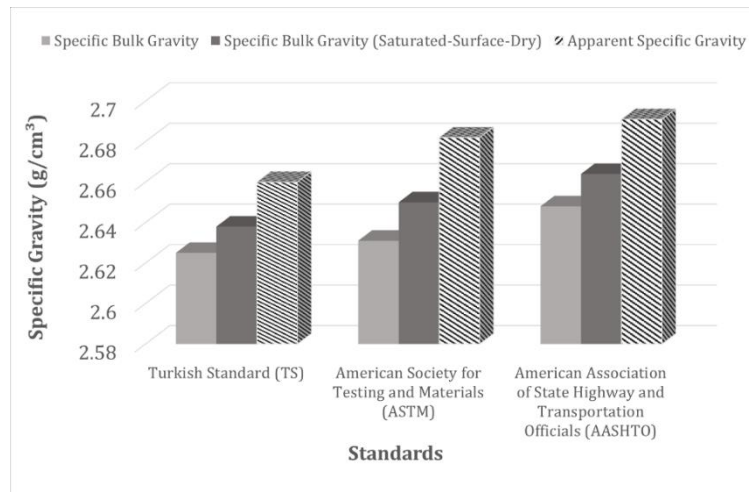


Figure 3. Specific gravity values of coarse aggregates

As Figure 3 is examined, it can be seen that the highest value of specific bulk gravity for coarse aggregates were found from the test done based on the AASHTO T 85 standard. According to obtained results, the lowest coarse aggregate specific gravity was calculated considering the TS EN 1097-6 standard. It is well-known that increasing the specific bulk gravity of coarse aggregates results decrease in the volumetric ratio of them in the total volume of HMA. According to the followed standards, the WA values were also determined and presented in Figure 4.

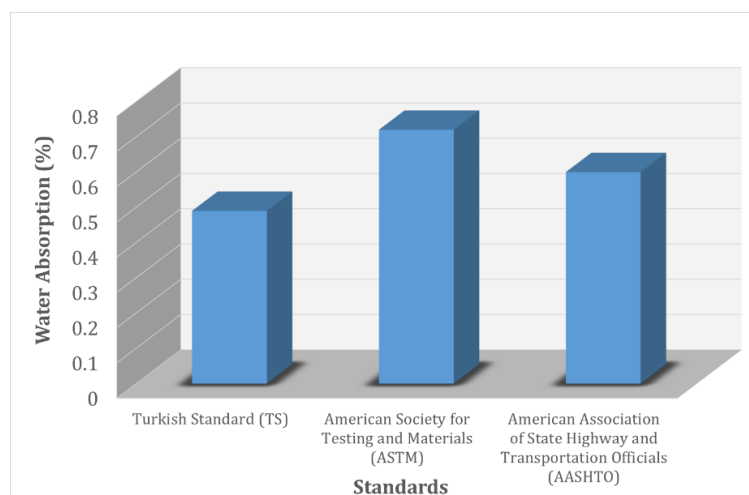


Figure 4. Values of water absorption of coarse aggregates

Due to the differences between the standards mentioned above, 0.23% and 0.12% difference was observed between TS EN 1097-6 and ASTM C127 and ASTM C127 and AASHTO T85 standards in water absorption of coarse aggregates, respectively. It is clearly seen in Fig. 4 that the highest WA value of coarse aggregate is calculated according to the ASTM standard. These results prove that some differences in obtained values can be seen due to the differences in methods of different standards applied on the same aggregates.

3.2. The Specific Gravity of Fine Aggregates and Filler

Just as used to calculate the specific gravity values of coarse aggregates, the mentioned three standards were applied to find out the SG values of fine aggregates. The results of SG of fine aggregates are given in Figure 5. Due to the fact that the fine aggregates were kept for 24 hours in ASTM C128 standard and for 15-19 hours in AASHTO T84 standard, 0.03 g/cm^3 difference has occurred in the specific bulk gravity (saturated-surface-dry) of fine aggregates. The difference between TS EN 1097-6 and ASTM C128 standards is that the fine aggregates are kept in the pycnometer and tray, respectively. Due to the difference in the places where the fine aggregates are kept in water, 0.025 g/cm^3 difference has occurred in the specific bulk gravity (saturated-surface-dry) of the fine aggregates.

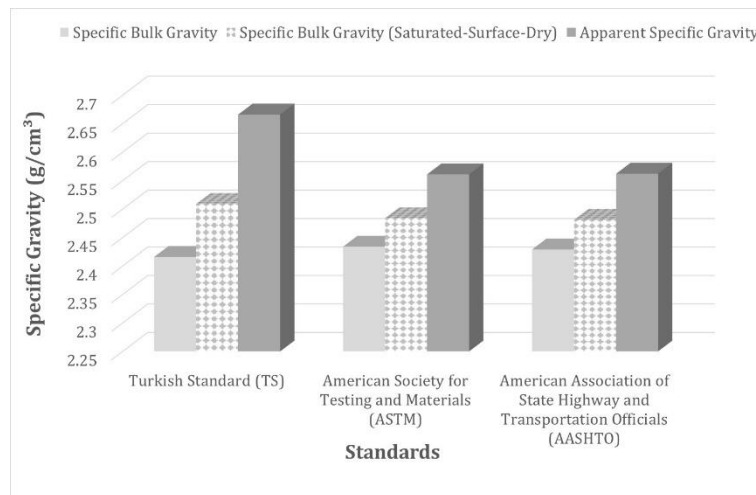


Figure 5. Specific gravity values of fine aggregates

The Figure 5 showed that the opposite result that found for coarse aggregates. Since, the lowest value of apparent specific gravity for fine aggregates was obtained from the test applied based on AASHTO T 84 standard. But the results are close to the results found for ASTM C128. On the other hand, the highest value of specific gravity was obtained with TS EN 1097-6 standard. Being low of specific gravity values of fine aggregates has meant increasing contribution rate in volume in HMA. The usage of fine aggregates, which have low values of specific gravity, can decrease the air void ratio of mixture.

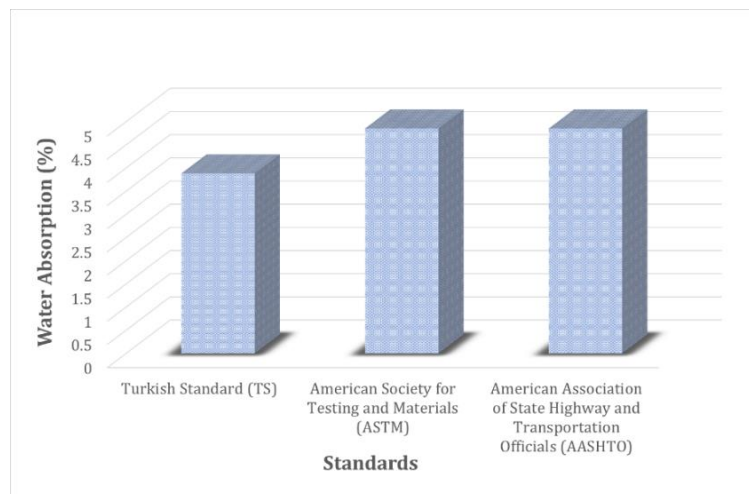


Figure 6. Values of water absorption of fine aggregates

When Fig. 6 is examined water absorption values of fine aggregates have the same value in ASTM and AASHTO standards but this value is lower in TS. Due to the differences between the standards mentioned above, 0.97% difference was observed between TS EN 1097-6 and ASTM C128 in water absorption of fine aggregates. Difference wasn't observed in water absorption values of fine aggregates calculated according to ASTM C128 and AASHTO T84 standards.

The apparent specific gravity value of filler was calculated as 2.625 g/cm³ by taking into consideration TS EN 1097-7, AASHTO T 84 and ASTM C128 standards. In the optimum bitumen content and strength calculations of all standards, the apparent specific gravity of filler was considered as 2.625 g/cm³.

3.3. Determination of Optimum Bitumen Content

In order to provide 4% air void criteria of the mixtures prepared by using Superpave volumetric mix design method, bitumen at different contents were added to aggregates and they were mixed until aggregates completely coated. The bitumen contents determined using SG values obtained following the TS EN 1097-6 and TS EN 1097-7 were 4.5%, 5%, 5.5% and 6%. On the other hand, 4%, 4.5%, 5% and 5.5% bitumen content are obtained as using the aggregate SG values found according to AASHTO and ASTM standard methods. Then the mixtures were compacted with the Superpave Gyrotory Compactor (SGC) which has a constant speed of 30 revolutions per minute, 0.820 °C compaction angle and 600 kPa stress using the volumetric mixing method.

The procedure given below were followed to analyze the HMA samples:

- The content of bitumen, corresponding to 4% air void, was determined from the air void graph.
- It was checked whether the determined content of bitumen satisfies the conditions of a minimum value of 14% on the VMA graph,
- The bitumen content was checked for the criteria of VFA that is 65-75%. This was done form the VFA/bitumen content graph.
- After all these steps were finished, the optimum bitumen content of mixtures prepared by using the SG values of the aggregates found according to the TS, ASTM and AASHTO Standards were determined.

The above-mentioned steps were implemented for the HMA samples prepared by considering aggregate SG values determined by TS, ASTM and AASHTO standards. The graphs for each case are given in Figure 7-9 and it can be seen the figures that the bitumen contents are determined as 5.03%, 4.75% and 4.59%, respectively in the figures.

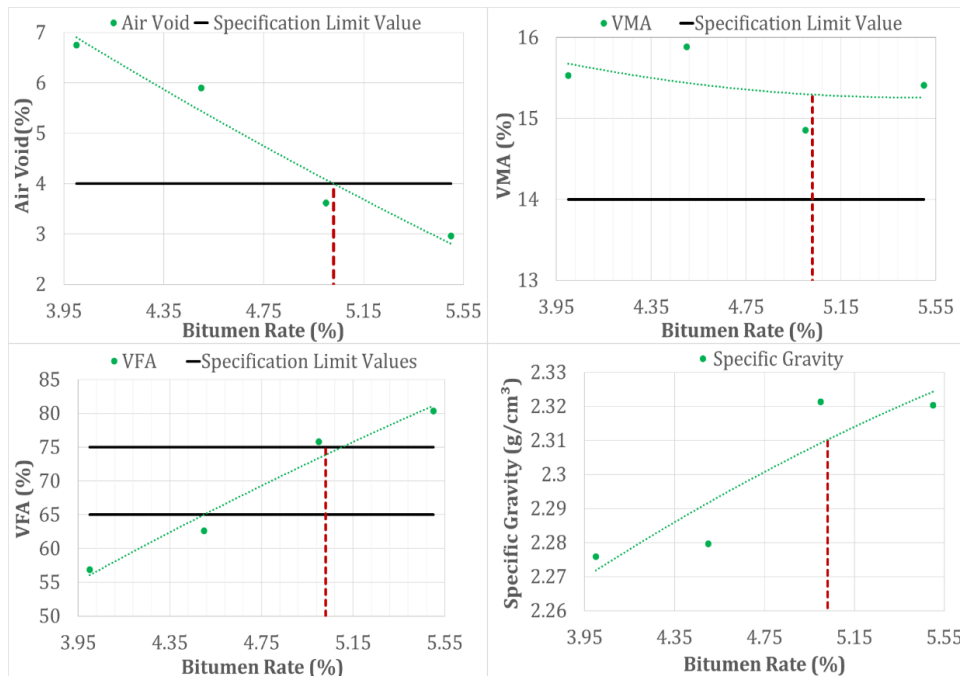


Figure 7. Graphs obtained by using specific gravity values found according to TS standards

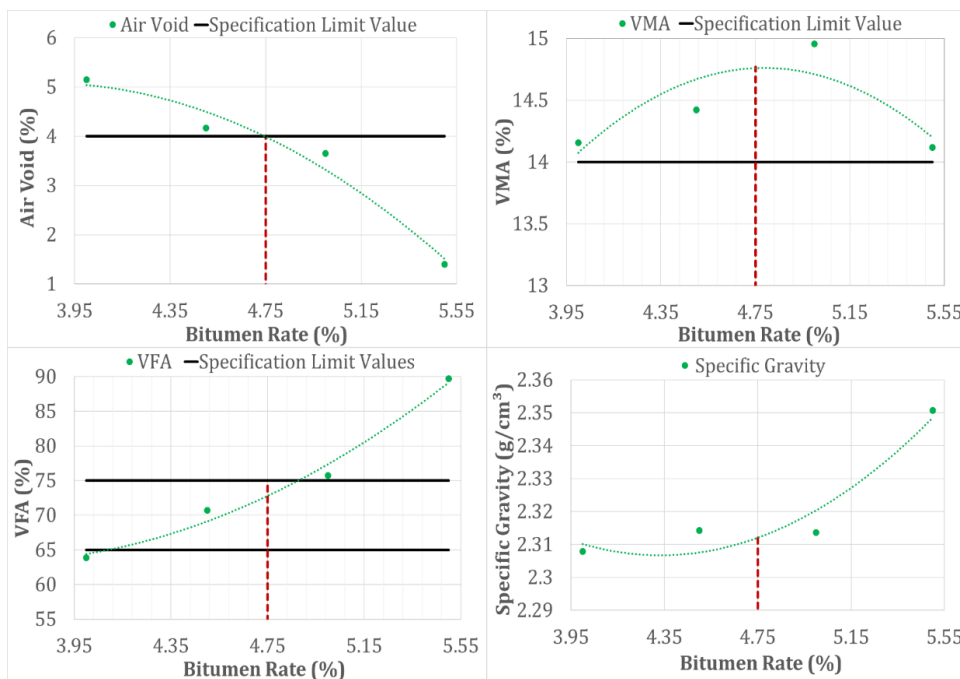


Figure 8. Graphs obtained by using specific gravity values found according to ASTM Standards

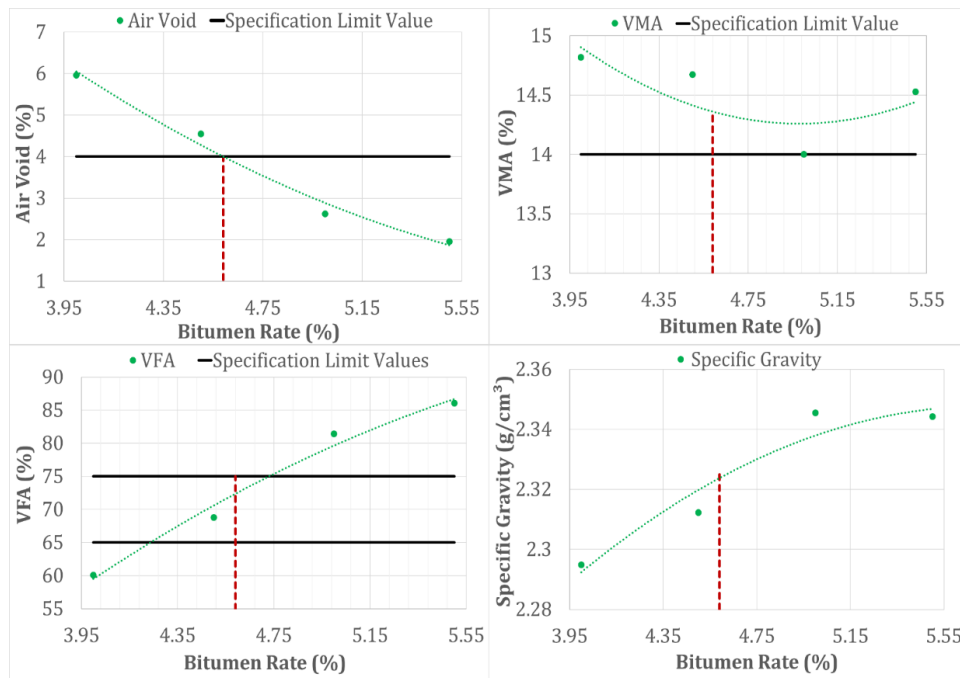


Figure 9. Graphs obtained by using specific gravity values found according to AASHTO Standards

It can be indicated that the highest value of specific bulk gravity for coarse aggregates was found based on AASHTO T 85 standard. The meaning of it is that the volumetric ratio of coarse aggregates in the total volume of hot mix asphalt will decrease. With this decrease, it is expected a decrease in the volume of voids filled among the coarse aggregate grains. The amount of aggregates whose surface will be covered with bitumen will also decrease. In addition, it was seen that the lowest value of specific gravity for fine aggregates was obtained with the AASHTO T 84 standard. Using of fine aggregates with low SG values make an increase in their volume in HMA. Thus, fine aggregates can further fill voids between coarse aggregates. The usage of fine aggregates with low SG values may decrease the air void ratio of mixture. Determining the lowest optimum bitumen content with coarse and fine aggregate SG values found according to the AASHTO Standards has proved all of the mentioned statements. Therefore, it can be said that the usage of coarse and fine aggregate specific gravity values obtained according to the AASHTO standards may be effective in decreasing the optimum bitumen content. Optimum bitumen contents of samples prepared by using aggregates that have SG values which were determined according to TS, ASTM and AASHTO standards are given in Fig. 10. As can be seen from the graph, while the highest optimum bitumen content was obtained by using aggregate specific gravity values determined according to TS standard, the lowest optimum bitumen content was obtained by using aggregate specific gravity values determined according to AASHTO standard.

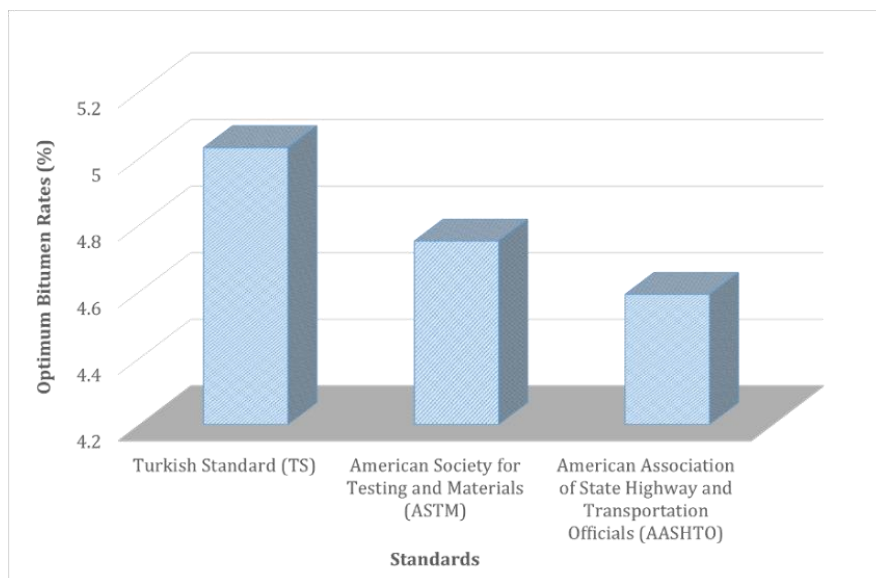


Figure 10. Optimum bitumen contents according to standards

3.4. Cost - Benefit Analysis According to the Optimum Bitumen Content

A cost – benefit analysis was done for 1 km road section which has 8 m width and 5 cm pavement thickness (Table 4). Also, cost of HMA for 1 m³ was calculated. When the optimum bitumen content decreases in 8.8%, the cost for 1 m³ of hot mix asphalt decreases approximately 16.7%. The lower optimum bitumen content provides economic and environmental benefits.

Table 4. Cost – benefit analysis according to optimum bitumen contents

| Properties | TS | ASTM | AASHTO |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Amount of bituminous binder (g) | 60.36 | 57.00 | 55.08 |
| Weight of the sample (g) | 1260.36 | 1257 | 1255.08 |
| Volume of the sample (m ³) | 0.0020 | 0.0020 | 0.0020 |
| Volume of platform (m ³) | 400 | 400 | 400 |
| Cost of bituminous binder (\$/ton) | 290,47 | 290,47 | 290,47 |
| Total cost (\$/m³) | 8,76 | 8,03 | 7,3 |
| Total cost (TL/m³) | 69,38 | 63,60 | 57,82 |

3.5. Determination of Moisture Sensitivity

So far it was understood that aggregate SG values obtained by using different standards are effective on optimum bitumen content. The content of optimum bitumen is an effective parameter on mixture strength, as well. To investigate the unconditioned and conditioned indirect tensile strengths, 18 HMA samples were prepared with each optimum bitumen content. The test results are given in Figure 11.

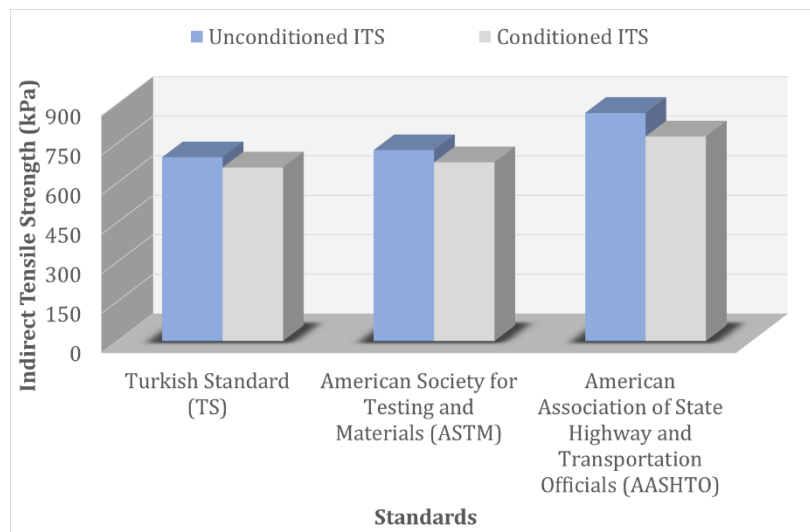


Figure 11. Indirect tensile strengths of samples

It has been observed that the best conditioned and unconditioned strength of bituminous hot mixes calculated using the highest coarse aggregate specific gravity and the lowest fine aggregate specific gravity determined according to AASHTO standard provided. The lowest conditioned and unconditioned strengths of bituminous hot mixes calculated using the lowest coarse aggregate specific gravity and the highest fine aggregate specific gravity determined according to TS standard were obtained.

It can be highlighted from the results presented in Figure 11, the samples prepared with SG value determined according to the AASHTO standards that ensures the lowest optimum bitumen content has the highest unconditioned and conditioned indirect tensile strength among the others. With respect to the results, the tensile strength ratios (TSR) of the samples are calculated and the results given in Figure 12.

As mentioned before that, the tensile rate should be at 80 in percentage. As examining the Figure 12, it can be clearly seen all samples provided the specification limit value. However, the samples prepared with the SG values, which were determined by AASHTO standards, showed the lowest resistance to moisture damage.

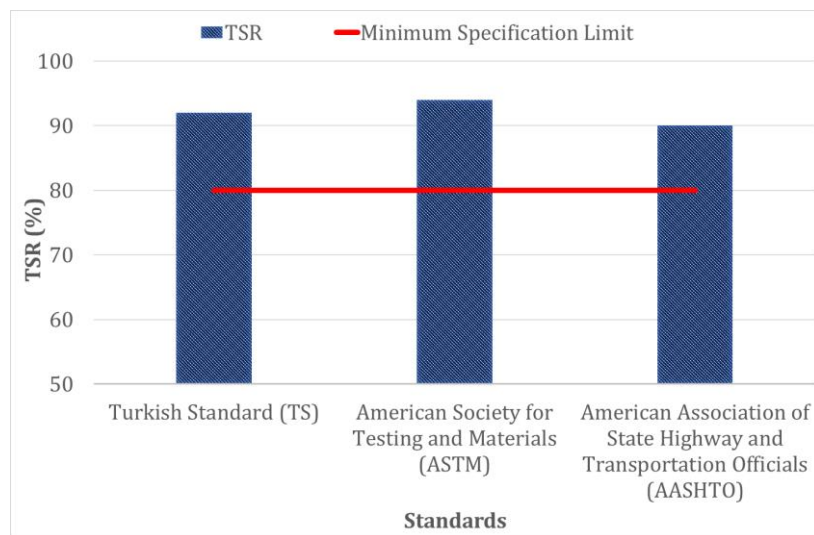


Figure 12. Tensile strength ratios of samples

4. Conclusions and Recommendations

It is known that the differences in the properties of the aggregates and bitumen that formed the hot mix asphalt affect significantly the properties of the hot mix asphalt. Therefore, when the studies in the literature are examined, while the properties of the bitumen are generally evaluated in order to improve the properties of the hot mix asphalt, the properties of aggregates have been examined in a limited number of studies. However, it has not been examined whether there is a difference between different standards used to calculate the specific gravity of the same type of aggregate. In this study, the specific gravity values of one kind of limestone aggregate which have three different sizes (coarse, fine aggregate and filler) were calculated according to TS, ASTM and AASHTO standards. In this study, it has been observed that small differences between the procedure steps of the standards can affect the specific gravity values of limestone aggregates which have three different sizes (coarse, fine aggregate and filler). According to the results, the highest and the lowest values of specific bulk gravity for coarse aggregates were found for the AASHTO T 85 and TS EN 1097-6 standards, respectively. The highest and the lowest values of SG for fine aggregates were found for the TS EN 1097-6 and AASHTO T 84 standards, respectively. The apparent specific gravity value of filler was calculated as 2.625 g/cm^3 according to all three standards. The effect of specific gravity of limestone aggregates on the optimum bitumen content, tensile strength and tensile strength ratio of hot mix asphalt was investigated. The optimum bitumen contents of the hot mix asphalts prepared using the aggregate specific gravity values calculated according to TS, ASTM and AASHTO standards were found to be 5.03%, 4.75% and 4.59%, respectively. Analysis based on SG values of aggregates that can be unique for each type of aggregates might be an alternative method for determination of optimum bitumen content in HMA. According to the cost - benefit analysis performed depending on the optimum bitumen content, it has been thought that the determination of bitumen content based on SG values can provide significant economic benefits. Thanks to this study, it has been determined that the specific gravity values of the aggregates used in hot mix asphalts are effective on the optimum bitumen content, indirect tensile strength and moisture sensitivity. In addition to this, specific gravity values of different types of aggregates can be calculated and the effects of them on mixture design can be examined.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Adishesu, G.N.P., Naidu, G., 2011. Influence of Coarse Aggregate Shape Factors on Bituminous Mixtures. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1 (4), 2013-2024.
- Afaf, A.H.M., 2014. Effect of Aggregate Gradation and Type on Hot Asphalt Concrete Mix Properties. *Journal of Engineering Sciences*, 42(3), 567-674.
- Al-Khateeb, G.G., Khedaywi, T.S., Obaidat, T.I.A.S., et al., 2013. Laboratory Study for Comparing Rutting Performance of Limestone and Basalt Superpave Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (1), 21-29.
- Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., et al., 2016. A Study on Fatigue Modeling of Hot Mix Asphalt Mixtures Based on the Viscoelastic Continuum Damage Properties of Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*, 106, 243-252.
- Arabani, M., Hamedi G.H., 2011. Using the Surface Free Energy Method to Evaluate the Effects of Polymeric Aggregate Treatment on Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (6), 802-811.

- Arabani, M., Tahami S.A., Taghipoor, M., 2017. Laboratory Investigation of Hot Mix Asphalt Containing Waste Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 18 (3), 713-729.
- Behiry, A.E.A.E.M., 2013. Laboratory Evaluation of Resistance to Moisture Damage in Asphalt Mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, 4 (3), 351-363.
- Bessa, I.S., Branco, V.T.C., Soares, J.B., et al., 2015. Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (7), 04014212.
- Cui, S., Blackman, B.R., Kinloch A. J., et al., 2014. Durability of Asphalt Mixtures: Effect of Aggregate Type and Adhesion Promoters. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 54, 100-111.
- Federal Highway Administration, 2000. *Superpave Fundamentals: Reference Manual (FHWA, NHI Course # 131053, 2000)*.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., et al., 2012. Effects of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 440-449.
- Haghshenas, H.F., Khodaii, A., Khedmati, M., et al., 2015. A Mathematical Model for Predicting Stripping Potential of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 75, 488-495.
- Hamed, G.H., Tahami, S.A., 2018. The Effect of Using Anti-stripping Additives on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 81, 90-97.
- Hesami, S., Roshani, H., Hamed, G.H., et al., 2013. Evaluate the Mechanism of the Effect of Hydrated Lime on Moisture Damage of Warm Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 47, 935-341.
- Kök, B.V., Çolak, H., 2011. Laboratory Comparison of the Crumb-Rubber and SBS Modified Bitumen and Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 25 (8), 3204-3212.
- Li, J., Zhang, J., Qian, G., et al., 2019. Three-Dimensional Simulation of Aggregate and Asphalt Mixture using Parameterized Shape and Size Gradation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (3), 04019004.
- Mahmoud, E., Masad, E., Nazarian, S., 2010. Discrete Element Analysis of the Influence of Aggregate Properties and Internal Structure on Fracture in Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (1), 10-20.
- Moreno, F., Rubio, M.C., 2013. Effect of Aggregate Nature on the Fatigue-Cracking Behavior of Asphalt Mixes. *Materials & Design*, 47, 61-67.
- Muniandy, R., Aburkaba, E., 2011. The Effect of Type and Particle Size of Industrial Wastes Filler on Indirect Tensile Stiffness and Fatigue Performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5 (11), 297-308.
- Nejad, F.M., Arabani, M., Hamed, G.H., et al., 2013. Influence of using Polymeric Aggregate Treatment on Moisture Damage in Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 47, 1523-1527.
- Nejad, F.M., Azarhoosh, G.H., Hamed, G.H., et al., 2012. Influence of using Nonmaterial to Reduce the Moisture Susceptibility of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 31, 384-388.
- Ramli, I., Yaacob, H., Hassan, N.A., et al., 2013. Fine Aggregate Angularity Effects on Rutting Resistance of Asphalt Mixture. *Journal Teknologi*, 65 (3), 105-109.



BULANIK CPM İLE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA: İNŞAAT ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

Güllü DEĞİRMENCİ¹, Mehmet N. UĞURAL^{2*}

¹ OYAK İnşaat, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Bulanık CPM,
İnşaat Mühendisliği,
Lineer Programlama,
Yapım Yönetimi,
Proje Yönetimi.*

Öz

İnşaat sektöründe karmaşık projelerin planlanması ve kontrolü için Kritik Yol Metodunun (KYM), yaygın olarak kullanılan yararlı bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Ancak, faaliyetlerin süresi net sayılarla temsil edildiğinden, kritik yol analizinde faaliyet sürelerini kesin olarak tahmin etmek zorlaşır. Buna ek olarak, vakaların çoğu, görev sürelerinin subjektif olarak hesaplanmasını gerektirir ve bu da faaliyetlerin süresi hakkında belirsizliğe neden olur. Bu makale, bulanık kümelerle dayalı bir yaklaşım önererek bu sorunları ele almaktadır. Bu çalışmanın amacı, bir inşaat projesinin kritik yolunu ve tamamlanma süresini hesaplamak için bulanık sayıların nasıl kullanılacağını göstermektir. Çalışma kapsamında proje faaliyetlerine üçgen bulanık süreler verilerek iki ayrı çözüm algoritması oluşturulmuştur. Örnek bir inşaat projesinin kritik yolu ve proje süresi ilk çözüm algoritmasında proje faaliyetlerine üçgen bulanık süreler atanarak ve doğrusal programlama modeli kullanılarak hesaplanırken, ikinci çözüm algoritmasında bulanık proje süresi ve kritik yol Alfa kesme yöntemi (α -Kesme Yöntemi) kullanılarak hesaplanmış ve daha sonra Centroid yöntemi (Alanların Merkezi Yöntemi) kullanılarak netleştirilmiştir. Bu proje için kritik yol ve tamamlanma süresi önceden bilindiğinden, iki çözüm algoritması karşılaştırılmıştır. Kritik yol yöntemi yerine Bulanık kritik yol yönteminin kullanılmasının bu çalışmanın önemini vurgulayacağı umulmaktadır.

LINEAR PROGRAMMING WITH FUZZY CPM: A CASE STUDY IN CONSTRUCTION SECTOR

Keywords

*Fuzzy CPM (FCPM),
Civil Engineering,
Linear Programming,
Construction Management,
Project Management.*

Abstract

The Critical Path Method (CPM) has been demonstrated to be a useful tool that is widely used in the construction industry for the planning and control of complex projects. However, because the duration of activities is represented as crisp numbers, it becomes difficult to precisely estimate the activity times in the critical path analysis. In addition, the majority of cases necessitate the subjective calculation of task duration times, resulting in ambiguity about the duration of the activities. This paper addresses these issues by proposing an approach based on fuzzy sets. The purpose of this study is to demonstrate how to use fuzzy numbers to calculate the critical path and completion time of a construction project. Two distinct solution algorithms were constructed by giving triangular fuzzy durations to the project activities within the scope of the study. The critical path and project duration of a sample construction project were calculated in the first solution algorithm by assigning triangular fuzzy durations to project activities and using the linear programming model, whereas the fuzzy project time and critical path were calculated in the second solution algorithm by using the Alpha cutting method (α -Cutting Method) and then clarified using the Centroid method (COA- Center of Area). Because the critical path and completion time for this project are known ahead of time, the two solution algorithms were compared. It is hoped that using the FCPM method rather than the CPM method will highlight the significance of this study.

* İlgili yazar / Corresponding author: m.ugural@iku.edu.tr, +90 506 598 11 00

Alıntı / Cite

Değirmenci, G., Uğural, M.N., (2022). Bulanık CPM ile Doğrusal Programlama: Türkiye İnşaat Endüstrisinde Bir Vaka Çalışması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 466-481.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Değirmenci, 0000-0003-0993-0960
M.N. Uğural, 0000-0002-8037-7603

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 09.06.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 15.10.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 29.12.2021 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Günümüzün rekabetçi iş ortamında, şirketler kaynak kullanımını en üst düzeye çıkarmaya, zamanı en iyi şekilde yönetmeye ve maliyetleri en aza indirmeye çalışmaktadır. Rekabet ortamında sektörde kalıcı olabilmek isteği, yönetim sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Dolayısıyla proje yönetim sistemleri sürekli iyileştirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Özellikle inşaat projeleri için, süre uzunluğu ve bu sürece eşlik eden riskler nedeniyle, faaliyetlerin süresini doğru veya net bir şekilde tahmin etmek genellikle zor veya neredeyse imkânsız oluşu proje yönetiminin önemini arttırmıştır (Kuriş, vd., 2014). Projelerde yönetim ihtiyacı, bir dizi faaliyetin bir amaca hizmet ederek sıralama ve bir an önce nihai ürüne ulaşma talebinden doğmuştur (Özköse ve Gencer, 2019). Ağ diyagramları, projenin kritik ve kritik olmayan faaliyetlerini açıkça göstererek yönetim sürecinin verimliliğinin artmasını sağlayabilmektedir (Temiz Kutlu, 2001). Etkili bir yönetim sistemi için 1950'lerde proje planlama yöntemlerinden CPM (Critical Path Method) ve PERT (Program Evaluation and Review Technique)'in kullanıldığı görülmektedir (Çolak, vd., 2018). Amerikan donanması için bir denizaltı projesi sırasında Booz Allen Hamilton tarafından program değerlendirme ve gözden geçirme tekniği (PERT) uygulanmış ve proje, iki yıl erken bitirilmiştir (Hajdu ve Isaac, 2017). Literatüre bakıldığında CPM ve PERT yöntemleri proje çizelgeleme ile proje kontrolü için popüler teknikler olmaya ve kullanılmaya devam etmektedir (Liberatore, 2008). Geliştirilen her iki tekniğin temelinde şebeke diyagramları kullanılmakta olup, şebeke diyagramları projenin bütünü oluşturarak faaliyetlerin ve bu faaliyetlerin aralarındaki mantıksal bağlantıların grafik şeklinde ifade edilmesine dayanmaktadır (Karahana ve Ezin, 2014). Her iki yöntem için temel amaç, kısıtlı kaynaklar kullanılarak istenilen zamanda projeyi tamamlamaktır (Karahana ve Ezin, 2014; Uğural ve Şahin, 2020). Toplam proje süresinin hesaplanması ve faaliyet sürelerinin belirlenmesi aşamaları iki teknik arasındaki en belirgin farktır (Karahana ve Ezin, 2014; Temiz Kutlu, 2001).

Faaliyetlerin süresi belirlenirken uzmanların deneyimlerinden, bilgilerinden ve tahminlerinden yararlanmak sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir. Aynı proje için pek çok uzman tarafından yapılan süre tahminleri farklılık gösterebilir (Durucasu vd., 2015). Bu tip öznelliğe sahip belirsizlik durumları için önerilen bir yaklaşım, bulanık küme teorisine dayanan bulanık mantık yaklaşımıdır. Temel fikir, Zadeh tarafından geliştirilen bulanık küme teorisinin klasik proje çizelgeleme yöntemlerine uygulanmasına dayanmaktadır (Chen, 2006). Böylece klasik yöntemlerle tam anlamıyla tanımlanamayan belirsizlik probleminin üstesinden gelinmeye çalışılır (Chanas ve Zielinski, 2001).

Bu çalışmanın konusunu, bulanık CPM (FCPM- Fuzzy Critical Path Method) ve Yager sıralama yöntemlerinin LP (Linear Programming) modellemesi, Alfa kesim yöntemi ile durulaştırma yöntemlerinden Alanların merkezi yöntemi oluşturmaktadır. İncelenen ve değerlendirilen bulanık yöntemler ile iki farklı çözüm algoritması oluşturulmuştur. Algoritmalar proje süresi ile kritik yolunun bulanık olarak elde edilmesini daha sonra net değer dönüşümünü içermektedir. Proje faaliyet süreleri sıklıkla tercih edilmekte olan üçgen bulanık sayılarla temsil edilmiştir.

Birinci çözüm algoritmasında, FCPM-LP model kullanılarak proje süresi ve kritik yolu belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen bulanık sonuçların net değer dönüşümü Yager sıralama metodu LP modeli kullanılarak yapılmış ve proje toplam süresi ile kritik yolu belirlenmiştir. Böylece proje toplam süresi net bir değere dönüştüğünde oluşan süre farkı ve proje kritik yolundaki değişim sınırlanmıştır. Üyelik fonksiyonları, "Bulanık kümeler, üyelik derecelerinin sürekliliği olan bir nesne sınıfıdır. Böyle bir küme, her bir nesneye sıfır ile bir [0,1] arasında değişen bir üyelik derecesi atayan bir üyelik (karakteristik) işlevi ile karakterize edilir" (Zadeh, 1965). Üyelik fonksiyonları küme elemanlarının kümeye olan aitlik derecelerinin atanması işlemidir. Özetle faaliyetlerin ve elemanların kümeye olan aitlik derecelerinin yani üyeliklerinin belirlenmesidir. Zadeh (1965) tarafından yapılmış olan tanım ışığında; bu çözüm algoritmasında Yager sıralama yöntemi kullanılmasının nedeni bu yöntemin üyelik fonksiyonlarının bilinmesini gerektirmemesidir.

İkinci çözüm algoritması olarak üyelik fonksiyonları atanmış proje için alfa (α) kesim yöntemiyle bulanık proje toplam süresi ve kritik yolu belirlenmiştir. Alfa (α) kesim yönteminden elde edilmiş olan bulanık sonuçların net değer dönüşümü durulaştırma yöntemlerinden olan alanların merkezi yöntemi kullanılarak yapılmış ve net proje toplam süresi ile kritik yolu belirlenmiştir. Bu çözüm algoritmasında alfa (α) kesim yöntemi kullanılmasının nedeni bu yöntemin belirlenen kesim aralıklarıyla bulanıklığın korunmasına imkân vermesidir. Böylece bulanıklık özelliğinin kaybedilmemiş olması, projeye ait her bir yolun belirlenen seviyeler doğrultusunda projeye olan bağlılığını, başka bir deyişle üyeliğini göstermiştir. Çözümde kesim (olasılık) seviyeleri [0,1] aralığında 0.1 artırımlarla gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte alanların merkezi yöntemiyle net değer dönüşümü yapılmıştır. Ayrıca net değer dönüşümü yapılan proje toplam süresinin net değer kesim aralığı belirlenmiştir. Her iki çözüm algoritması ile bulanık proje toplam süresinin, söz konusu net bir değerle temsil edilmesi gerektiğinde meydana geldiği belirlenmiştir.

Çalışmanın amacı, önerilen iki farklı çözüm algoritması kullanarak, bulanık ve net proje süresi ile kritik yolun tespitinde toplam süre ve kritik yoldaki olası değişimlerin gösterilmesidir. Çözümde lineer programlama (LP) tekniği yardımcı araç olarak kullanılmıştır. Önerilen çözüm algoritmaları yapımı tamamlanmış bir inşaat projesi üzerinde örneklendirilecek ve çalışmanın özgünlüğünü oluşturacaktır. Sonuç olarak çalışmada önerilen çözüm algoritmalarıyla elde edilecek sonuçların karşılaştırılması, bulanık yöntemlerin kıyaslanması ve uygulanabilirliğinin test edilmesi amaçlanmakta, destekleyici sonuçların elde edilmesi ümit edilmektedir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Review)

Bulanık mantık yaklaşımı ilk defa Amerika Birleşik Devletleri'nde düzenlenen bir konferansta 1956 yılında duyurulmuştur. Ancak bu yaklaşıma California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A. Zadeh'in 1965 tarihli "Fuzzy Sets (bulanık kümeler)" isimli makale çalışması öncülük etmiş ve Zadeh, yaklaşımın ilk kurucusu olarak kabul edilmiştir (Karasakal, 2012; Zadeh, 1965). Zadeh (1965), bu çalışmada insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. 1970'lerin ikinci yarısından itibaren bulanık PERT ve bulanık CPM olarak adlandırılan proje ağı analizi yaklaşımları geliştirilmiştir (Chanas ve Zielinski, 2001). 1975 yılında, bulanık kontrol sistemi ilk kez Mamdani ve Assilian tarafından modellenmiştir (Özcan, 2018). 1979'da Prade, "Zamanlama probleminde bulanık küme teorisini kullanma" adlı çalışmasıyla bulanık küme teorisini proje çizelgeleme problemine ilk kez uygulamıştır (Prade, 1979). Chanas ve Zielinski (2001), bulanık CPM problemi üzerine bir dizi çalışma önermişler ve kritik aktiviteler üzerinde çalışarak kritikliğin karmaşıklığını tartışmış; Zadeh (1965)'in genişleme ilkesinin, ağdaki etkinlik zamanlarının bir fonksiyonu olarak klasik kritiklik kavramına doğrudan uygulanabileceğini varsayarak kritik yolu hesaplamak için iki etkili yöntem önermişlerdir. Chanas ve Zielinski (2001), L-L tipi bulanık sayıları kullanarak, yolun kritiklik derecesinin projenin en uzun yolunu bulmak için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır (Chanas ve Zielinski, 2001). Chen vd. (2006, 2007, 2008) FCPM hakkında farklı tarihlerde çeşitli çalışmalar yayınlamış ve çeşitli yaklaşımlar önermişlerdir. Chen 2006 yılında; çalışmalarını doğrusal programlama formülasyonu ve bulanık CPM problemini bir çift parametrik doğrusal programa dönüştürmek için Zadeh (1965)'in genişleme ilkesine dayandırmıştır. Bulanık sayılar ve alfa kesim aralıkları ile toplam proje süresinin L-R tipi bulanık sayıları ve alfa kesim yöntemini kullanarak toplam proje süresinin üyelik fonksiyonunu tanımlamıştır. Çözümü destekleyici bir yaklaşım olarak ise Yager sıralama yöntemini kullanmıştır. Sonuç olarak, proje toplam süresinin net değerler yerine üyelik fonksiyonlarıyla temsil edilmelerinin değerli sayılabilecek bilgi kayıplarını önlediğini savunmuştur (Chen, 2006). Chen ve Huang 2007 yılında; önceki çalışmalardan farklı olarak FPERT yöntemini kullanmışlar. Faaliyet zamanlarını üçgen bulanık sayılarla temsil ederek, etkinliklerin başlangıç ve bitiş zamanlarını hesaplamışlardır. Kritik aktivitelerin ve yolun belirlenmesinde alfa seviyeleri dışında ikinci bir indeks kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen model ile, proje ağının durumuna ilişkin bilgilerin anında kullanılabilir olduğunu ve kritik yoldaki faaliyetlerin süresi değiştirilerek duyarlılık analizi yapılabileceği tartışılmıştır (Chen ve Huang, 2007). Chen ve Hsueh 2008 yılında, üyelik fonksiyonları bilinmediğinde bulanık kritik yol problemini bir LP modeli olarak formüle ederek bu tür sorunların çözümüne yönelik yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Amaç, bulanık aktivite sürelerinin doğrusal bir kombinasyonu olan bulanık bir sayıyı maksimize etmektir. Bu çalışmada bulanık CPM probleminin net sayı dönüşümü için uygun bir bulanık sıralama yöntemi olan Yager'in sıralama yöntemi benimsenmiştir (Chen ve Hsueh, 2008). Tüm bu çalışmalarda önerilmiş olan lineer programlama formülasyonlarında, bulanık aktivite sürelerinin doğrusal bir kombinasyonu olan bir bulanık sayının en üst düzeye çıkarılması amaçlanmıştır (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008).

Duruca vd., (2015) çalışmada gerçek bir inşaat projesinin kritik yolunun ve tamamlanma süresinin bulanık faaliyet süreleri söz konusu olduğunda nasıl hesaplanabileceği konusunda literatürde sık kullanılan yöntemlerden α -kesim ve ağırlık merkezi yöntemlerini kullanmış ve Yager sıralama yöntemiyle elde edilen çözümleme sonuçlarının doğruluğunu sınamıştır. Yöntemler inşaat projesine başarıyla uygulanmış ve Yager sıralama yöntemiyle sonuçlar desteklenmiştir. Sonuç olarak proje öngörülen süreler dâhilinde tamamlanmış ve bu tarz bilimsel yaklaşımların avantajlı olabileceği sonucuna varmışlardır (Duruca vd., 2015).

Kritik yol yöntemi, çalışmaya başladığı tarihten günümüze kadar pratikte kullanımının kolay olması yönüyle karmaşık projelerin planlanması ve çizelgelenmesinde, projelerin kontrol çalışmalarında etkin olarak kullanılan bir araçtır. Kritik yol yöntemi kullanılarak çözüme yönelik oluşturulan modelin en temel amacı proje tamamlanma süresinin tespitidir. Bu amaçla kullanılan ve popüler olan diğer bir proje planlama ve çizelgeleme yöntemi ise bilindiği gibi program değerlendirme ve gözden geçirme yöntemidir. Her iki yöntemine ait çözüm modeli, ağdaki kritik yolların, kritik faaliyetlerin ve kritik olayların tanımlanmasından oluşmaktadır (Chanas ve Zielinski, 2001).

İncelenen çalışmalarda, CPM ile PERT yöntemleri arasındaki en temel fark faaliyet sürelerinin tahmin edilmesi aşamasında ortaya çıkmaktadır. CPM yönteminde kullanılan zaman değerleri belirlilik (deterministik) yaklaşımı içerirken, PERT yönteminde zaman (probabilistik) olasılıksaldır (Gencer ve Türkbey, 2001). CPM ve PERT yöntemleri kullanılarak belirlenen faaliyet sürelerindeki bazı eksiklikler, bulanık proje planlama yöntemleri kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Gerçek yaşamda karşılaşılan belirsizlik problemi, projelerin modellenmesinde çeşitli zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle bulanık küme teorisi, CPM ve PERT yöntemlerine yardımcı bir araç olarak kabul edilmiş ve bu yöntemlerle birlikte çeşitli araştırmalarda uygulanmıştır (Buckley, 1989; Madhuri vd., 2014; Chen ve Hsueh, 2008).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Hakkında Genel Bilgiler (General Information About the Study)

Çalışmaya konu olan proje İstanbul ili Avcılar ilçesinde 2017 yılında yapımına başlanmış ve 2018 yılı içerisinde daire teslimleri yapılmış bir konut projesidir. İki bodrum, bir zemin ve bir normal kattan oluşan projede katlara çift daire konumlandırılmıştır. Normal katta bulunan daireler dubleks tipi dairelerden oluşmaktadır. Ayrıca yönetmelik gereği ikinci bodrum kat sığınak olarak planlanmıştır. Proje toplam konut alanı 530,90 m², toplam ortak kullanım alanları 192,10 m², toplam inşaat alanı 723,00 m²'dir. Katlarda bulunan daireler, 2. bodrum kat 103,90 m², 1. bodrum kat daireleri 68,53 m² ve 59,40 m², zemin kat daireleri 68,53 m² ve 59,47 m², 1. normal kat daireleri 142,07 m² ve 132,83 m², brüt alanları üzerine projelendirilmiştir. Projeye ait tüm faaliyetler, faaliyet süreleri ve öncüllük ilişkileri proje yöneticisi tarafından uygulamada yapıldığı şekliyle sunulmuştur. Yapımı tamamlanmış bir proje olmasından dolayı proje tamamlanma süresi bilinen bir projedir. Bu bağlamda çalışmaya konu olan proje, klasik ve bulanık mantık yöntemleri kullanılarak hesaplanan proje tamamlanma süresinin karşılaştırılmasına imkân sağlamaktadır.

3.2. Çalışmanın Amacı (The Aim of the Study)

Çalışmanın amacı, belirsizlik durumları söz konusu olduğunda alternatif bir çözüm yolu sunduğu düşünülen bulanık proje planlama yönteminin, önerilen iki farklı çözüm algoritması kullanarak, bulanık ve net proje süresi ile kritik yolun tespitinde toplam süre ve kritik yoldaki olası değişimlerin gösterilmesidir. Böylece önerilen çözüm algoritmalarıyla bulanık yöntemlerin karşılaştırılması ve uygulanabilirliğinin test edilmesi amaçlanmıştır. Çözümde lineer programlama (LP) tekniği yardımcı araç olarak kullanılmıştır. Önerilen çözüm algoritmalarının tamamlanmış gerçek bir inşaat projesi üzerinde örneklendirilmesi çalışmanın özgünlüğünü sağlamıştır. Bu çalışma, Chen vd. (2006, 2008) tarafından yapılan çalışmaların devamı niteliğinde düşünülmüştür. Temel fikir, Zadeh (1965)'in genişleme prensibi ile uyumlu bir LP modeli oluşturulmasına dayanmaktadır. Her bir çözüm algoritmasıyla proje toplam süresi ve kritik yolu; ilk olarak bulanık olarak elde edilecek, daha sonra bulanık değerlerin net değer dönüşü yapılacaktır. Böylece proje toplam süresi net bir değer olduğunda ne kadarlık bir süre farkı oluşturduğu ve proje kritik yolundaki değişimin sınırlanması sağlanacaktır.

3.3. Bulanık Küme Teorisi (Fuzzy Set Theory)

Klasik mantık olarak bilinen Aristo mantığı, matematiksel yaklaşımda durumların 0 ve 1 değerlerinden biriyle temsilini içermektedir (Tiryaki ve Kazan, 2007). Zadeh (1965), bu noktada ikili üyelik fonksiyonu ile ifade edilen klasik kümeler yerine dereceli üyelik fonksiyonuyla ifade edilen bulanık kümelerin tanımlanmasını öne sürmüştür (Zadeh, 1965). Bulanık mantıkta bulanık küme elemanları $[0, 1]$ aralığında herhangi bir değerle temsil edilebilir. Bu durum bulanık mantığı klasik mantıktan ayıran noktadır ve sınırlar klasik kümelerle göre daha esnek olmaktadır. Bulanık mantık bu esnekliği sayesinde uygulandığı her alanda çok daha hassas sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir (Koçak ve Yiğit, 2020). Klasik küme teorisini savunan Aristo mantığının aksine bulanık mantık yaklaşımı L.R. Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisine dayanmaktadır (Zhang ve Huang, 1994; Zadeh, 1965). Bulanık küme teorisi kesin bilginin olmadığı ve özelliğinin bulunduğu durumların modellenerek çözümlenmesini hedefleyen bir yöntemdir (Atlı ve Kahraman, 2013). Zadeh (1965) bulanık kümeleri şöyle tanımlamıştır; "Bulanık küme, üyelik derecelerinin sürekliliği olan bir nesne sınıfıdır. Böyle bir küme, her bir nesneye sıfır ile bir arasında değişen bir üyelik derecesi atayan bir üyelik (karakteristik) işlevi ile karakterize edilir" (Zadeh, 1965).

Bulanık sayılar, x 'de aralıklı süreklilik, dışbükeylik ve normallik koşullarını sağlayabilen sayılardır. X 'in en az bir eleman için üyelik işlevi 1'e eşitse ($\mu_{\bar{A}}(x)=1$) normal bulanık küme olarak tanımlanır (Chen & Huang, 2007; Karasakal, 2012). $\mu_{\bar{A}}(x)=1$ durumu x 'in gerçel sayı olması koşuluyla sağlanabilir (Chen & Hsueh, 2008; Durucasu vd., 2015). \bar{A} bulanık kümesine ait $x \in X$ bulanık sayısının üyelik fonksiyonu $\mu_{\bar{A}}: X \rightarrow [0,1]$ olarak tanımlanırken, bulanık \bar{A} kümesi tanımı ise, $\bar{A} = \{x, \mu_{\bar{A}}(x), x \in X\}$ şeklindedir. \bar{A} bulanık kümesine ait α kesim kümesi ${}^{\alpha}\bar{A} = \{x \in X : \mu_{\bar{A}} \geq \alpha\}$ ile tanımlanmaktadır (Dutta vd., 2011).

Bulanık mantık konusunda yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, bulaşık makinesi, çamaşır kurutma makinesi ve çimento harç makineleri kontrol örnekleri karşımıza çıkan en popüler örneklerden olmakta ve yaklaşımın anlaşılmasında fayda sağlamaktadır (Tiryaki ve Kazan, 2007).

3.3.1. Üçgen Bulanık Sayılar (Triangular Fuzzy Numbers)

Üçgen bulanık sayılar kümesi, $\bar{A} = (a, m, b)$ şeklinde tanımlanmış bir bulanık kümede, m tam üyelikli küme elemanını göstermek üzere a değeri en küçük olası değer, b değerleri ise en büyük olası değeri temsil etmekte ve üyelik fonksiyonlarının aşağıdaki gibi tanımlandığı kümeler üçgen bulanık sayılar denilmektedir (Erdin, 2019).

Üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonu tanımı denklem (1)'de verildiği gibidir (Elizabeth & Sujatha, 2013);

$$\mu_{\bar{A}}(x; a, m, b) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a} & , x \in [a, m) \\ 1 & , x = m \\ \frac{b-x}{b-m} & , x \in (m, b] \\ 0 & , x \notin [a, b] \end{cases} \quad (1)$$

3.3.2. Bulanık CPM ve Doğrusal Programlama (Fuzzy Critical Path Method and Linear Programming)

CPM, projenin planlanması ve kontrolüne yardımcı olmak için tasarlanmış ağ tabanlı bir yöntemdir. Amacı, proje için zaman çizelgesi oluşturmak, projeyi tamamlamak için gereken toplam süreyi ve kritik yolu belirlemektir. Bir projenin birden fazla kritik yola sahip olabileceği unutulmamalıdır. Toplam süreyi belirlemenin ve kritik yolları bulmanın alternatif bir yolu LP tekniğini kullanmaktır (Chen, 2006).

Genel olarak klasik CPM probleminin amacı, bazı kısıtlara maruz kalan faaliyet sürelerinin doğrusal bir kombinasyonunun sağlanmasıdır. Bunu işlemde, aktivite süreleri için bulanık sayılar söz konusu olduğunda bulanık CPM problemi için bir LP formüle edilebilir, burada amaç, bulanık aktivite sürelerinin doğrusal bir kombinasyonu olan bir bulanık sayıyı belirleyebilmektir (Chen & Hsueh, 2008).

N düğümlü bir şebeke diyagramına sahip klasik CPM problemi Model 1'de, bulanık CPM problemi ise Model 2'deki gibi formüle edilmektedir. Amaç, proje ağının 1 nolu düğümünden n nolu düğümüne kadar proje ağının maksimum (en uzun) süresine ulaşmaktır.

$$D = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1 \quad (5)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i, j) \in A \quad (6)$$

Model 1: Klasik CPM LP Modeli (Chen, 2006)

Burada;
 $N = n$ düğümlerinin kümesi
 $(i,j) \in A$ = klasik serim kümesi
 $T_{ij} = (i,j) \in A$ kümesinde tanımlanmış deterministik faaliyet süresi,
 x_{ij} = Bağımsız değişken

$$\bar{D} = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1 \quad (10)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i,j) \in \bar{A} \quad (11)$$

Model 2: Bulanık CPM LP Modeli (Chen, 2006)

Burada;
 $N = n$ düğümlerinin kümesi
 $(i,j) \in \bar{A}$ = bulanık serim kümesini,
 $\bar{T}_{ij} = (i,j) \in \bar{A}$ kümesinde tanımlanmış bulanık faaliyet sürelerini
 x_{ij} = Bağımsız değişken

3.3.3. Yager Sıralama Yöntemi (Yager Ranking Method)

Bulanık sayıların sıralanması için önerilen prosedür bulanık sayıların durulaştırmasını temel almaktadır (Atlı ve Kahraman, 2013). Yöntem, bulanık kritik yol problemini kesin faaliyet süreli geleneksel kritik yol problemine dönüştürme temeline dayalıdır. Uygulanması basittir ve bulanık etkinlik sürelerinin üyelik işlevlerinin açık biçimini bilmeyi gerektirmemektedir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008). Yager "alan telafisi" kavramına dayanarak, bulanık kümeleri temsil etmek için alfa kesiminden konveks bulanık \bar{t} sayısı için sıralama indeksi $I(\bar{t})$ Denklem (12) ile elde edilmektedir.

$$I(\bar{t}) = \int_0^1 \frac{1}{2} (t_a^L + t_a^U) d\alpha, \quad (12)$$

\bar{t} ; bulanık sayılarının ortalama değerinin merkezidir.

Kritik yolun bulunması probleminde m adet yoldan oluşan Model 2 için $p_k, k = 1, 2, \dots, m$ 'e kadar proje ağ diyagramına ait yollardan oluşsun. $x_{ij}^{(k)}, (i,j) \in \bar{A}$ bulanık kümesinde her bir bulanık yol için karar değişkenini temsil etmek üzere tanımlandığında; $\bar{D}^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)}$, formülü her bir k . yol için toplam bulanık süreyi verecektir. Burada $k=1, 2, \dots, m$ 'e kadar olan tüm yollar için maksimum süreyi veren yol, $\bar{D}^* = \max \{ \bar{D}^{(k)}, k = 1, 2, \dots, m \}$ formülü ile tanımlanabilir. Maksimum süreyi yani kritik yolu veren $\max \bar{D}^{(k)} = \max \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)} \right\}$ formülü Yager sıralama yöntemine uygulandığında, $I(\bar{D}^*) = \max \{ I(\bar{D}^{(k)}), k = 1, 2, \dots, m \}$ dönüşecektir.

Özetlemek gerekirse net formüller aşağıdaki gibi olacaktır. k . yola ait sıralama indeksi Denklem (13) ile elde edilmektedir.

$$I(\bar{D}^{(k)}) = I\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}^{(k)} \quad (13)$$

Proje tamamlanma süresine (maksimum süreli yol) ait yolun sıralama indeksi ise Denklem (14) ile elde edilmektedir.

$$I(\bar{D}^*) = \max_k \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}^{(k)} \right\} \quad (14)$$

Yager'in sıralama yöntemi kullanılarak bulanık sayıların net sayılara dönüşüm formülü LP ile modellendiğinde ise Model 2'de Denklem (14) yerine konularak Model 3 elde edilmektedir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008).

$$I(\bar{D}^*) = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij} \quad (15)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ki} = 1 \quad (18)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i, j) \in \bar{A} \quad (19)$$

Model 3: Yager Sıralama LP Modeli (Chen ve Hsueh, 2008)

Burada;

$I(\bar{T}_{ij}) = \bar{T}_{ij}$ bulanık sayısının sıralama indeksi

x_{ij} = Bağımsız değişken

$x_{ij}^{(k)}$ = k. yol bağımsız değişkeni

Not: k. yol üzerindeki faaliyetler için $x_{ij} = 1$, k. yola ait olmayan faaliyetler için $x_{ij} = 0$ değerini almaktadır.

3.3.4. Alfa Kesim Yöntemi (Alpha Cutting Method)

$\bar{T}_{ij} = (a, m, b)$ üçgen sayılı bulanık bir küme olsun. α -kesim parametrelerinden elde edilecek yeni bulanık sayılar kümesi Denklem (20) ile tanımlanır (Elizabeth ve Sujatha, 2013; Chen, 2006).

$$(\bar{T}_{ij})_{\alpha} = [a^{\alpha}, b^{\alpha}] = [(m-a)\alpha + a, (m-b)\alpha + b], \quad \alpha \in [0, 1] \quad (20)$$

Proje süresi, her bir alfa kesim seviyesi için farklı şekilde tanımlanır. Bu nedenle, her bir kesim seviyesi için projenin toplam süresi de farklı olacaktır (Chen, 2006). Her bir belirsiz proje yolu \bar{D} için bu üyelik işlevi tanımı, $\mu_{\bar{D}}((\bar{T}_{ij})_{\alpha}) \geq \alpha$ şeklinde ifade edilir (Chen, 2006).

3.3.5. Alanların Merkezi Yöntemi (Center of Area Method)

Bulanıklaştırma biriminde giriş değişkenlerinin veya bulanık küme elemanlarının üyelik fonksiyonları 0 ile 1 aralığındaki üyelik dereceleri ile belirlenir (Kuzugüdenli, 2018). Bulanık değerlerin net değerlere dönüştürülmesi, durulama veya durulaştırma olarak tanımlanır. Durulaştırma biriminde kural tabanından çıkarım mekanizmasına gelen bulanık ifadeler, sayısal ifadelere dönüştürülmektedir (Kuzugüdenli, 2018). Alanların merkezi yöntemiyle net sayı dönüşümü ise, Denklem (21) ile çıkarım biriminde elde edilen bulanık değerler ve üyelik fonksiyonları kullanılarak yapılmaktadır (Güvenç, vd., 2007).

$$z^* = \frac{\sum \mu_C(z).z}{\sum \mu_C(z)} \quad (21)$$

Burada;

$\mu_C(z)$ = üyelik derecesini,

z = her bir etkinliğin bulanık süresi

z^* = durulanan çıkarım değeri göstermektedir.

3.4. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

3.4.1. Çözüm Algoritmaları ve Yöntemleri (Solution Algorithms and Methods)

İncelenen inşaat projesinde; projenin toplam süresi ve kritik yolunun bulunmasına ilişkin iki farklı çözüm algoritması sunulmuştur. Önerilen algoritmalar proje süresi ve kritik yolunun ilk olarak bulanıklaştırılmasını daha sonra elde edilen bulanık sonuçların net değer dönüşümünün yapılmasını içermektedir. Bulanık kritik yol ve süre hesaplamalarına, proje faaliyetlerine üçgen bulanık sayılar atanarak başlanacaktır. Üçgen bulanık sayılar, proje için iyimser, kötümser ve muhtemel durumları değerlendirebilmeye imkân vermektedir. Aktivitelerin süreleri, $(i, j) \in \bar{A}$ kümesinde üçgen tipi bulanık sayılarla tanımlanmıştır. Üçgen bulanık sayılarla temsil edilen faaliyetler kullanılarak projenin bulanık kritik yolu ve toplam süresi, bulanık CPM-LP modeli kullanılarak hesaplanacaktır. Daha sonra Yager sıralama yöntemi, alfa kesim yöntemi ve durulaştırma yöntemlerinden alanların merkezi yöntemlerini içeren önerilmiş iki farklı çözüm algoritması uygulanacaktır. Birinci çözüm algoritması; bulanık CPM-LP modelinden elde edilmiş olan bulanık değerlerin Yager sıralama yöntemi (Yager Ranking Method) kullanarak proje süresi ve kritik yolunun net değer dönüşümünün yapılmasıdır. İkinci çözüm algoritması; Alfa (α) kesim yöntemi (α -Cutting Method) kullanılarak bulanık proje toplam süresinin ve kritik yolunun hesaplanmasını ve durulaştırma yöntemlerinden Alanların merkezi yöntemi (COA- Center of Area) kullanılarak alfa kesim yönteminden elde edilen bulanık proje toplam süresi ve kritik yolun net değer dönüşümünün yapılmasıdır. Alfa (α) kesim aralık değerleri $\alpha \in [0,1]$ aralığında 0'dan 1'e doğru 0,1 artırımlarla monoton şekilde yapılacaktır. Net değer dönüşümüyle elde edilen proje toplam süresi ve kritik yolu; ilk olarak bulanık olarak elde edilecek, daha sonra bulanık değerlerin net değer dönüşümü yapılacaktır. Böylece proje toplam süresi net bir değer olduğunda ne kadarlık bir süre farkı oluşturduğu ve proje kritik yolundaki değişimin sınılanması hedeflenmiştir.

Çözüm algoritmaları özetle şöyledir;

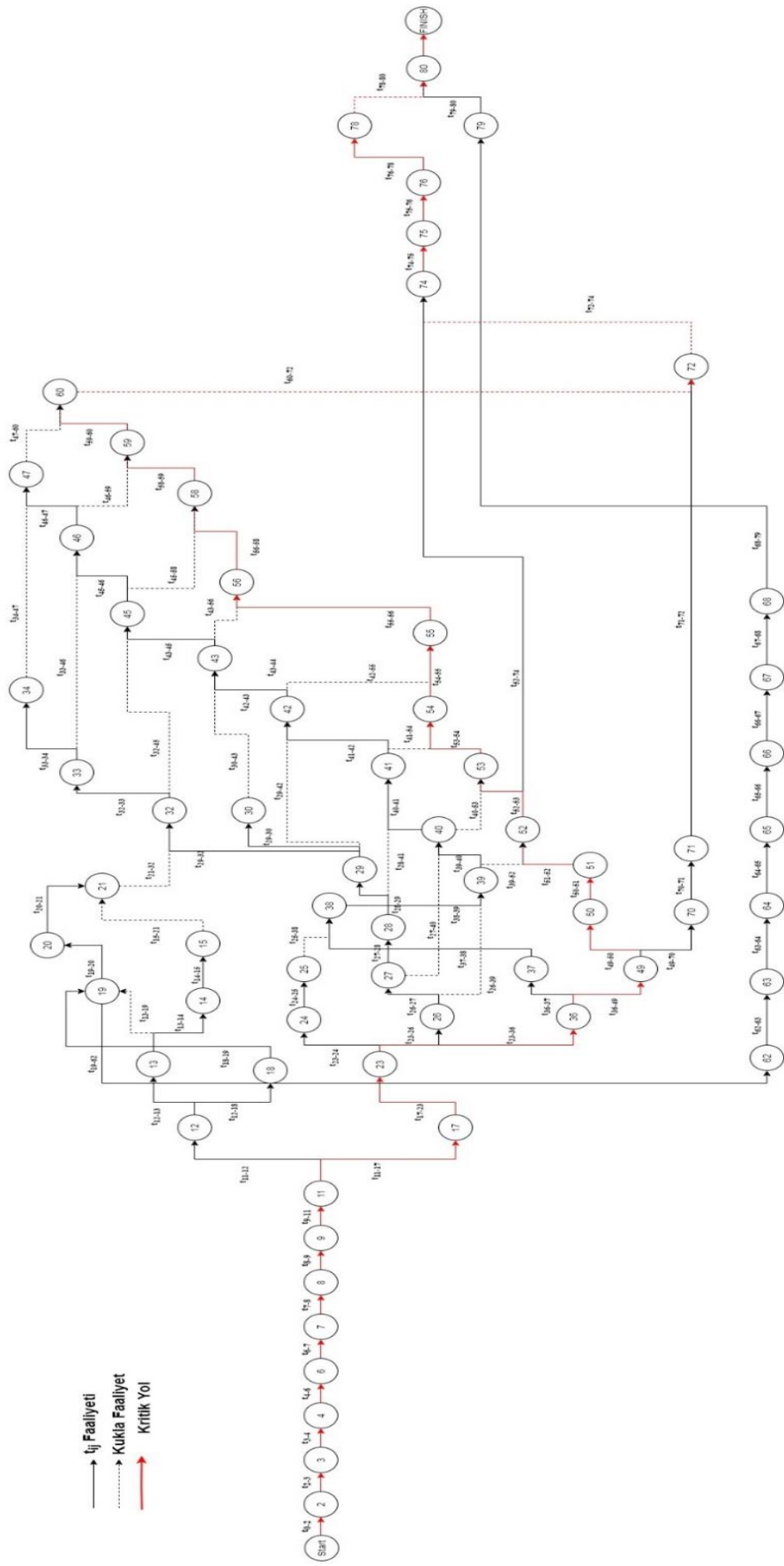
1. Çözüm Algoritması

- Bulanık FCPM ile bulanık proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi
- Yager sıralama yöntemiyle net proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi

2. Çözüm Algoritması

- Alfa (α) kesim yöntemiyle bulanık proje sürelerinin ve kritik yolunun tespit edilmesi
- Alanların merkezi yöntemiyle net proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi

İnşaat projesi için proje ağ şeması Drawio programı ile görselleştirilmiştir (Şekil 1). Proje ağ diyagramı, toplam 66 adet düğüm ve 23 adet kukla faaliyetten oluşmaktadır. Amaç fonksiyonları POM-QM for Windows programı kullanılarak çözümlenmiştir. Hesaplamalara her bir faaliyet için üçgen bulanık sürelerinin atanması, öncüllük ilişkilerinin kurulması ve ağ diyagramının görselleştirilmesi ile başlanmıştır. Daha sonra proje kısıtları belirlenmiştir. Ağ diyagramı değişim göstermediği için LP modellerine ilişkin kısıtlar Model 1, Model 2 ve Model 3 içinde değişim göstermemiştir.



Şekil 1. Proje Şebeke (Ağ) Diyagramı (Project Network Diagram)

Tablo 1. Proje Faaliyet Süreleri ve Öncüllük İlişkileri (Project Activity Times and Precedence Relationships)

| FCPM-FAALİYET TABLOSU | | | | | | |
|------------------------------|----------|--|----------|----------------|------------------|-----------------|
| t _{ij} | Faal. No | Faaliyet Adı | Öncüller | En İyi (a) gün | Muhtemel (m) gün | En Kötü (b) gün |
| | 1 | Hafriyat Öncesi İşlemler | | | | |
| t ₀₋₂ | 2 | Aplikasyon | | 1,50 | 2,00 | 4,00 |
| t ₂₋₃ | 3 | Zemin Etüdü | 2 | 1,00 | 1,00 | 2,00 |
| t ₃₋₄ | 4 | Proje Çizim ve Onayı | 3 | 20,00 | 30,00 | 45,00 |
| | 5 | Toprak ve Temel Altı İşleri | | | | |
| t ₄₋₆ | 6 | Hafriyat alınması | 4 | 3,00 | 5,00 | 8,00 |
| t ₆₋₇ | 7 | Toprak Sıkıştırma ve Dolgu | 6 | 1,00 | 2,00 | 4,00 |
| t ₇₋₈ | 8 | Blokaj | 7 | 1,00 | 1,00 | 2,00 |
| t ₈₋₉ | 9 | Grobeton 10 cm | 8 | 1,00 | 2,00 | 3,00 |
| | 10 | Radye Temel | | | | |
| t ₉₋₁₁ | 11 | Kalıp işleri (Çakılması+Söküm) | 9 | 3,00 | 5,00 | 9,00 |
| t ₁₁₋₁₂ | 12 | Demir Bağlama işleri | 11 | 3,00 | 4,00 | 7,00 |
| t ₁₂₋₁₃ | 13 | Beton işleri (Yapı Denetim+Beton Dökülmesi+Priz süresi) | 12 | 4,00 | 5,00 | 11,00 |
| t ₁₃₋₁₄ | 14 | Su Yalıtımı (Kanalizasyon Bağlantıları) | 13 | 1,00 | 2,00 | 4,00 |
| t ₁₄₋₁₅ | 15 | Şap (Hatıl+Beton) | 14 | 1,00 | 1,00 | 3,00 |
| | 16 | 2.Bodrum (Sığınak) | | | | |
| t ₁₁₋₁₇ | 17 | Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü) | 11 | 6,00 | 10,00 | 19,00 |
| t ₁₂₋₁₈ | 18 | Demir Bağlama işleri | 12 | 7,00 | 9,00 | 13,00 |
| t ₁₈₋₁₉ | 19 | Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi) | 13*;18 | 7,00 | 10,00 | 18,00 |
| t ₂₀₋₁₉ | 20 | Dolgu (Kenarların doldurulması) | 19 | 1,00 | 3,00 | 5,00 |
| t ₂₀₋₂₁ | 21 | Zemin Kaplama | 15*;20 | 3,00 | 5,00 | 8,00 |
| | 22 | 1.Bodrum Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo) | | | | |
| t ₁₇₋₂₃ | 23 | Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü) | 17 | 15,00 | 20,00 | 28,00 |
| t ₂₃₋₂₄ | 24 | Demir Bağlama işleri | 23 | 12,00 | 15,00 | 20,00 |
| t ₂₄₋₂₅ | 25 | Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi) | 24 | 16,00 | 24,00 | 32,00 |
| t ₂₃₋₂₆ | 26 | Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar) | 23 | 7,00 | 10,00 | 15,00 |
| t ₂₆₋₂₇ | 27 | Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz) | 26 | 26,00 | 33,00 | 45,00 |
| t ₂₇₋₂₈ | 28 | İç Sıva işleri (Çimento+Alçı) | 27 | 8,00 | 10,00 | 15,00 |
| t ₂₈₋₂₉ | 29 | Şap işleri | 28 | 1,00 | 3,00 | 5,00 |
| t ₂₉₋₃₀ | 30 | Kapıların ve Pencerelemlerin Takılması | 29 | 11,00 | 18,00 | 29,00 |
| t ₂₉₋₃₂ | 32 | Kaplama (Zemin+Duvar) | 29;21* | 7,00 | 10,00 | 15,00 |
| t ₃₂₋₃₃ | 33 | Boya İşleri (Astar+2 kat boya) | 32 | 3,00 | 5,00 | 9,00 |
| t ₃₃₋₃₄ | 34 | Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları) | 33 | 11,00 | 15,00 | 18,00 |
| | 35 | Zemin Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo) | | | | |
| t ₂₃₋₃₆ | 36 | Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü) | 23 | 15,00 | 20,00 | 28,00 |
| t ₃₆₋₃₇ | 37 | Demir Bağlama işleri | 36 | 12,00 | 15,00 | 20,00 |
| t ₃₇₋₃₈ | 38 | Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi) | 37;25* | 16,00 | 24,00 | 32,00 |
| 8-39 | 39 | Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar) | 38;26* | 7,00 | 10,00 | 15,00 |
| t ₃₉₋₄₀ | 40 | Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz) | 39;27* | 26,00 | 33,00 | 45,00 |
| t ₄₀₋₄₁ | 41 | İç Sıva işleri (Çimento+Alçı) | 40;28* | 8,00 | 10,00 | 15,00 |
| t ₄₁₋₄₂ | 42 | Şap işleri | 41;29* | 1,00 | 3,00 | 5,00 |
| t ₄₂₋₄₃ | 43 | Kapıların ve Pencerelemlerin Takılması | 42;30* | 14,00 | 18,00 | 32,00 |
| t ₄₃₋₄₅ | 45 | Kaplama (Zemin+Duvar) | 43;32* | 4,00 | 10,00 | 12,00 |
| t ₄₅₋₄₆ | 46 | Boya İşleri (Astar+2 kat boya) | 45;33* | 3,00 | 5,00 | 9,00 |
| t ₄₆₋₄₇ | 47 | Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları) | 46;34* | 11,00 | 15,00 | 18,00 |
| | 48 | Normal Kat (Çatı Piyeli 3 oda+1 salon+2 banyo) | | | | |
| t ₃₆₋₄₉ | 49 | Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü) | 36 | 21,00 | 9,00 | 34,00 |
| t ₄₉₋₅₀ | 50 | Demir Bağlama işleri | 49 | 15,00 | 9,00 | 23,00 |
| t ₅₀₋₅₁ | 51 | Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi) | 50 | 22,00 | 30,00 | 38,00 |
| t ₅₁₋₅₂ | 52 | Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar) | 51;39* | 10,00 | 13,00 | 18,00 |
| t ₅₂₋₅₃ | 53 | Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz) | 52;40* | 35,00 | 42,00 | 54,00 |
| t ₅₃₋₅₄ | 54 | İç Sıva işleri (Çimento+Alçı) | 53;41* | 11,00 | 13,00 | 18,00 |
| t ₅₄₋₅₅ | 55 | Şap işleri | 54;42* | 4,00 | 6,00 | 8,00 |
| t ₅₅₋₅₆ | 56 | Kapıların ve Pencerelemlerin Takılması | 55;43* | 20,00 | 27,00 | 38,00 |
| t ₅₆₋₅₈ | 58 | Kaplama (Zemin+Duvar) | 56;45* | 10,00 | 13,00 | 18,00 |
| t ₅₈₋₅₉ | 59 | Boya İşleri (Astar+2 kat boya) | 58;46* | 6,00 | 8,00 | 12,00 |
| t ₅₉₋₆₀ | 60 | Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları) | 59;47* | 14,00 | 18,00 | 21,00 |
| | 61 | Merdiven | | | | |
| t ₁₉₋₆₂ | 62 | Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü) | 19 | 19,00 | 20,00 | 32,00 |
| t ₆₂₋₆₃ | 63 | Demir Bağlama işleri | 62 | 18,00 | 20,00 | 24,00 |
| t ₆₃₋₆₄ | 64 | Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi) | 63 | 57,00 | 65,00 | 75,00 |
| t ₆₄₋₆₅ | 65 | İç Sıva işleri (Çimento+Alçı) | 64 | 17,00 | 20,00 | 24,00 |
| t ₆₅₋₆₆ | 66 | Şap işleri | 65 | 7,00 | 10,00 | 15,00 |

Tablo 1. Devam (Continued)

| | | | | | | |
|--------------------|----|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| t ₆₆₋₆₇ | 67 | Boya İşleri | 66 | 13,00 | 15,00 | 20,00 |
| t ₆₇₋₆₈ | 68 | Basamak Kaplama+Korkuluk | 67 | 31,00 | 35,00 | 41,00 |
| | 69 | Çatı | | | | |
| t ₄₉₋₇₀ | 70 | Karkas İmalatı | 49 | 12,00 | 15,00 | 19,00 |
| t ₇₀₋₇₁ | 71 | İzolasyon | 70 | 17,00 | 20,00 | 24,00 |
| t ₇₁₋₇₂ | 72 | Kaplama | 71;60* | 8,00 | 10,00 | 15,00 |
| | 73 | Dış Cephe | | | | |
| t ₅₂₋₇₄ | 74 | Sıva İşleri | 52;72* | 13,00 | 15,00 | 19,00 |
| t ₇₄₋₇₅ | 75 | Yalıtım işleri | 74 | 12,00 | 15,00 | 19,00 |
| t ₇₅₋₇₆ | 76 | Boya işleri | 75 | 8,00 | 10,00 | 14,00 |
| | 77 | Bitim İşleri | | | | |
| t ₇₆₋₇₈ | 78 | Korkuluklar (Balkon) | 76 | 8,00 | 10,00 | 13,00 |
| t ₆₈₋₇₉ | 79 | Dış Kapılar | 68 | 11,00 | 13,00 | 15,00 |
| t ₇₉₋₈₀ | 80 | Çevre Düzenlemesi | 79;78* | 23,00 | 26,00 | 29,00 |

Projeye ait kısıtlar aşağıdaki gibidir ve denklemler yukarıda Şekil 1'de gösterilen ağ diyagramı kullanılarak elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
X_{79-80} + X_{78-80} &= 1 & X_{58-59} + X_{46-59} - X_{59-60} &= 0 & X_{36-37} - X_{37-38} &= 0 & X_{11-17} - X_{17-23} &= 0 \\
X_{68-79} - X_{79-80} &= 0 & X_{56-58} + X_{45-58} - X_{58-59} &= 0 & X_{23-36} - X_{36-37} - X_{36-49} &= 0 & X_{14-15} - X_{15-21} &= 0 \\
X_{76-78} - X_{78-80} &= 0 & X_{55-56} + X_{43-56} - X_{56-58} &= 0 & X_{33-34} - X_{34-47} &= 0 & X_{13-14} - X_{14-15} &= 0 \\
X_{75-76} - X_{76-78} &= 0 & X_{54-55} + X_{42-55} - X_{55-56} &= 0 & X_{32-33} - X_{33-34} - X_{33-46} &= 0 & X_{12-13} - X_{13-14} - X_{13-19} &= 0 \\
X_{74-75} - X_{75-76} &= 0 & X_{53-54} + X_{41-54} - X_{54-55} &= 0 & X_{29-32} + X_{21-32} - X_{32-33} - X_{32-45} &= 0 & X_{11-12} - X_{12-13} - X_{12-18} &= 0 \\
X_{52-74} + X_{72-74} - X_{74-75} &= 0 & X_{51-52} + X_{39-52} - X_{52-53} - X_{52-74} &= 0 & X_{29-30} - X_{30-43} &= 0 & X_{9-11} - X_{11-12} - X_{11-17} &= 0 \\
X_{71-72} + X_{60-72} - X_{72-74} &= 0 & X_{50-51} - X_{51-52} &= 0 & X_{28-29} - X_{29-30} - X_{29-32} - X_{29-42} &= 0 & X_{8-9} - X_{9-11} &= 0 \\
X_{70-71} - X_{71-72} &= 0 & X_{49-50} - X_{50-51} &= 0 & X_{27-28} - X_{28-29} - X_{28-41} &= 0 & X_{7-8} - X_{8-9} &= 0 \\
X_{49-70} - X_{70-71} &= 0 & X_{36-49} - X_{49-50} - X_{49-70} &= 0 & X_{26-27} - X_{27-28} - X_{27-40} &= 0 & X_{6-7} - X_{7-8} &= 0 \\
X_{67-68} - X_{68-79} &= 0 & X_{46-47} + X_{34-47} - X_{47-60} &= 0 & X_{23-26} - X_{26-27} - X_{26-39} &= 0 & X_{4-6} - X_{6-7} &= 0 \\
X_{66-67} - X_{67-68} &= 0 & X_{45-46} + X_{33-46} - X_{46-47} - X_{46-59} &= 0 & X_{24-25} - X_{25-38} &= 0 & X_{3-4} - X_{4-6} &= 0 \\
X_{65-66} - X_{66-67} &= 0 & X_{43-45} + X_{32-45} - X_{45-46} - X_{45-58} &= 0 & X_{23-24} - X_{24-25} &= 0 & X_{2-3} - X_{3-4} &= 0 \\
X_{64-65} - X_{65-66} &= 0 & X_{42-43} + X_{30-43} - X_{43-45} - X_{43-56} &= 0 & X_{17-23} - X_{23-24} - X_{23-26} - X_{23-36} &= 0 & X_{0-2} - X_{2-3} &= 0 \\
X_{63-64} - X_{64-65} &= 0 & X_{41-42} + X_{29-42} - X_{42-43} - X_{42-55} &= 0 & X_{15-21} + X_{20-21} - X_{21-32} &= 0 & X_{0-2} &= 1 \\
X_{62-63} - X_{63-64} &= 0 & X_{40-41} + X_{28-41} - X_{41-42} - X_{41-54} &= 0 & X_{19-20} - X_{20-21} &= 0 & & \\
X_{19-62} - X_{62-63} &= 0 & X_{38-39} + X_{26-39} - X_{39-40} - X_{39-52} &= 0 & X_{13-19} + X_{18-19} - X_{19-20} &= 0 & & \\
X_{59-60} + X_{47-60} - X_{60-72} &= 0 & X_{37-38} + X_{25-38} - X_{38-39} &= 0 & X_{12-18} - X_{18-19} &= 0 & &
\end{aligned}$$

Çözümlemelere ilişkin izlenmiş olan adımlara şöyle devam edilmiştir;

Adım 1: Bulanık CPM-LP model çözümü

Kısıtları belirlenmiş olan proje için, POM-QM for Windows programında Model 2 çalıştırılarak en iyi, muhtemel ve en kötü bulanık faaliyet süreleri kullanılarak proje kritik yolu ve süresi elde hesaplanmıştır. Daha sonra tüm veri girişleri lineer programlama modülü üzerinden girilerek ve modül çalıştırılmıştır. Model çözümünde kritik yol üzerinden bulunan faaliyetler için $x_{ij}=1$, kritik yol üzerinde olmayan faaliyetler için $x_{ij}=0$ olmaktadır. Sırasıyla en iyi, muhtemel ve en kötü bulanık süreler için amaç fonksiyonları aşağıda verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\text{Max } \bar{D}_{(\text{en iyi})} = 1.5x_{0-2} + x_{2-3} + 20x_{3-4} + 3x_{4-6} + x_{6-7} + x_{7-8} + x_{8-9} + 3x_{9-11} + 3x_{11-12} + 4x_{12-13} + x_{13-14} + x_{14-15} + 6x_{11-17} + 7x_{12-18} + 7x_{18-19} + 7x_{19-20} + 3x_{20-21} + 15x_{17-23} + 12x_{23-24} + 16x_{24-25} + 7x_{23-26} + 26x_{26-27} + 8x_{27-28} + x_{28-29} + 11x_{29-30} + 7x_{29-32} + 3x_{32-33} + 11x_{33-34} + 15x_{23-36} + 12x_{36-37} + 16x_{37-38} + 7x_{38-39} + 26x_{39-40} + 8x_{40-41} + x_{41-42} + 14x_{42-43} + 4x_{43-45} + 3x_{45-46} + 11x_{46-47} + 21x_{36-49} + 15x_{49-50} + 22x_{50-51} + 10x_{51-52} + 35x_{52-53} + 11x_{53-54} + 4x_{54-55} + 20x_{55-56} + 10x_{56-58} + 6x_{58-59} + 14x_{59-60} + 19x_{19-62} + 18x_{62-63} + 57x_{63-64} + 17x_{64-65} + 7x_{65-66} + 13x_{66-67} + 31x_{67-68} + 12x_{49-70} + 17x_{70-71} + 8x_{71-72} + 13x_{52-74} + 12x_{74-75} + 8x_{75-76} + 8x_{76-78} + 11x_{68-79} + 23x_{79-80}$$

$$\text{Max } \bar{D}_{(\text{muhtemel})} = 2x_{0-2} + x_{2-3} + 30x_{3-4} + 5x_{4-6} + 2x_{6-7} + x_{7-8} + 2x_{8-9} + 5x_{9-11} + 4x_{11-12} + 5x_{12-13} + 2x_{13-14} + x_{14-15} + 10x_{11-17} + 9x_{12-18} + 10x_{18-19} + 3x_{19-20} + 5x_{20-21} + 20x_{17-23} + 15x_{23-24} + 24x_{24-25} + 10x_{23-26} + 33x_{26-27} + 10x_{27-28} + 3x_{28-29} + 18x_{29-30} + 10x_{29-32} + 5x_{32-33} + 15x_{33-34} + 20x_{23-36} + 15x_{36-37} + 24x_{37-38} + 10x_{38-39} + 33x_{39-40} + 10x_{40-41} + 3x_{41-42} +$$

$18x_{42-43} + 10x_{43-45} + 5x_{45-46} + 15x_{46-47} + 9x_{36-49} + 9x_{49-50} + 30x_{50-51} + 13x_{51-52} + 42x_{52-53} + 13x_{53-54} + 6x_{54-55} + 27x_{55-56} + 13x_{56-58} + 8x_{58-59} + 18x_{59-60} + 20x_{19-62} + 20x_{62-63} + 65x_{63-64} + 20x_{64-65} + 10x_{65-66} + 15x_{66-67} + 35x_{67-68} + 15x_{49-70} + 20x_{70-71} + 10x_{71-72} + 15x_{52-74} + 15x_{74-75} + 10x_{75-76} + 10x_{76-78} + 13x_{68-79} + 26x_{79-80}$

$\text{Max } \bar{D} (\text{en kötü}) = 4x_{0-2} + 2x_{2-3} + 45x_{3-4} + 8x_{4-6} + 4x_{6-7} + 2x_{7-8} + 3x_{8-9} + 9x_{9-11} + 7x_{11-12} + 11x_{12-13} + 4x_{13-14} + 3x_{14-15} + 19x_{11-17} + 13x_{12-18} + 18x_{18-19} + 5x_{19-20} + 8x_{20-21} + 28x_{17-23} + 20x_{23-24} + 32x_{24-25} + 15x_{23-26} + 45x_{26-27} + 15x_{27-28} + 5x_{28-29} + 29x_{29-30} + 15x_{29-32} + 9x_{32-33} + 18x_{33-34} + 28x_{23-36} + 20x_{36-37} + 32x_{37-38} + 15x_{38-39} + 45x_{39-40} + 15x_{40-41} + 5x_{41-42} + 32x_{42-43} + 12x_{43-45} + 9x_{45-46} + 18x_{46-47} + 34x_{36-49} + 23x_{49-50} + 38x_{50-51} + 18x_{51-52} + 54x_{52-53} + 18x_{53-54} + 8x_{54-55} + 38x_{55-56} + 18x_{56-58} + 12x_{58-59} + 21x_{59-60} + 32x_{19-62} + 24x_{62-63} + 75x_{63-64} + 24x_{64-65} + 15x_{65-66} + 20x_{66-67} + 41x_{67-68} + 19x_{49-70} + 24x_{70-71} + 15x_{71-72} + 19x_{52-74} + 19x_{74-75} + 14x_{75-76} + 13x_{76-78} + 15x_{68-79} + 29x_{79-80}$

Tablo 2' de görüldüğü gibi her üç süreye ilişkin projeye ait tek bir kritik yol tespit edilmiş ve proje süreleri (263,5, 321, 480 gün) olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Bulanık CPM-LP Model Çözümleri (Fuzzy CPM-LP Model Solutions)

| | Proje Süresi | Proje Kritik Yolu |
|--------------------|--------------|--|
| En İyi Sürelerle | 263,5 gün | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| Muhtemel Sürelerle | 321 gün | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| En Kötü Sürelerle | 480 gün | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |

Adım 2: Yager sıralama LP model çözümlemesi

Yöntem, bulanık sürelerin net değer dönüşümlerini elde etmek amacıyla uygulanmıştır. $\bar{A} = (a, m, b)$ üçgen bulanık sayılar kümesi olmak üzere, her faaliyet için sıralama endeksi Denklem (22) ile hesaplanır (Atlı ve Kahraman, 2013). Tablo 1'de verilmiş olan faaliyetlere ait sıralama endeksi $I(\bar{T}_{ij})$ değerleri, Microsoft Excel programı kullanılarak tüm faaliyetler için hesaplanmıştır.

$$I(\bar{T}_{ij}) = \frac{a + m + b}{3} \quad (22)$$

Burada;

\bar{T}_{ij} = ij faaliyetinin bulanık süresi

x_{ij} = ij faaliyetinin karar değişkenini ifade etmektedir.

Model 3 kullanılarak POM-QM for Windows programına kısıtlar ve $I(\bar{T}_{ij})$ değerleri girilerek devam edilmiş modelin lineer programla model çözümü yapılmıştır. Modele ait amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

$\text{Max } I(\bar{D}^*) = 2.5x_{0-2} + 1.33x_{2-3} + 31.67x_{3-4} + 5.33x_{4-6} + 2.33x_{6-7} + 1.33x_{7-8} + 2x_{8-9} + 5.67x_{9-11} + 4.67x_{11-12} + 6.67x_{12-13} + 2.33x_{13-14} + 1.67x_{14-15} + 11.67x_{11-17} + 9.67x_{12-18} + 11.67x_{18-19} + 3x_{19-20} + 5.33x_{20-21} + 21x_{17-23} + 15.67x_{23-24} + 24x_{24-25} + 10.67x_{23-26} + 34.67x_{26-27} + 11x_{27-28} + 3x_{28-29} + 19.33x_{29-30} + 10.67x_{29-32} + 5.67x_{32-33} + 14.67x_{33-34} + 21x_{23-36} + 15.67x_{36-37} + 24x_{37-38} + 10.67x_{38-39} + 34.67x_{39-40} + 11x_{40-41} + 3x_{41-42} + 21.33x_{42-43} + 8.67x_{43-45} + 5.67x_{45-46} + 14.67x_{46-47} + 21.33x_{36-49} + 15.67x_{49-50} + 30x_{50-51} + 13.67x_{51-52} + 43.67x_{52-53} + 14x_{53-54} + 6x_{54-55} + 28.33x_{55-56} + 13.67x_{56-58} + 8.67x_{58-59} + 17.67x_{59-60} + 23.67x_{19-62} + 20.67x_{62-63} + 65.67x_{63-64} + 20.33x_{64-65} + 10.67x_{65-66} + 16x_{66-67} + 35.67x_{67-68} + 15.33x_{49-70} + 20.33x_{70-71} + 11x_{71-72} + 15.67x_{52-74} + 15.33x_{74-75} + 10.67x_{75-76} + 10.33x_{76-78} + 13x_{68-79} + 26x_{79-80}$

$\text{Max } I(\bar{D}^*) = 354,84 \approx 355$ gün, maksimum süreli yol: 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 faaliyetleri kapsayacak şekilde oluşmuştur. Adım 2' de elde edilmiş olan (263,5 321, 480 gün) bulanık değer aralığına bakıldığında, net dönüşüm değeri olan 356 günün muhtemel ve en kötü süre aralığında kaldığı görülmektedir. Yöntem, alfa kesim seviyelerinden elde edilecek yeni faaliyet süreleri içinde uygulanabilmektedir.

Adım 3: Alfa kesim yöntemi çözümlemesi

Alfa kesim yöntemi kullanılarak net olmayan süreler 0 ile 1 arasında farklı seviyelerdeki güven aralıklarında temsil edilebilir. T_{ij} 'nin bulanık bir küme yerine net bir küme olduğu unutulmamalıdır (Chen, 2006). 0,1 artırımlarla [0 1] arası değerler için tüm alfa kesim faaliyet süreleri Denklem (20) ile hesaplanmıştır. Daha sonra her bir faaliyet için ortalama kesim süreleri Denklem (23) ile elde edilmiştir.

$$\bar{T}_{ij\alpha} = \frac{\bar{T}_{ij(1)}^\alpha + \bar{T}_{ij(2)}^\alpha}{2} \quad (23)$$

Ortalama alfa kesim faaliyet süreleri POM-QM for Windows programında proje yönetimi (CPM/PERT) modülü kullanılarak her bir kesim seviyesi için proje süresi ve proje kritik yolu hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

Model çözüm değerlerine bakıldığında [0 1] aralığında alfanın her 0.1 artırımında maksimum sürenin lineer olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca uygulama projesinde alfa kesim aralıkları için kritik yol değişim göstermemiştir. Bu durumlar her örnek vaka için değişkenlik gösterebilir. Her zaman aynı sonuçların elde edilmesi beklenemez (Chen, 2006). Çözümde, alfa kesim seviyelerindeki artırım oranları değiştirilerek daha hassas sonuçlar elde edilebilir.

Tablo 3. Alfa Kesim Yöntemi Hesaplamaları (Alpha Cut Method Calculations)

| α | Proje Süresi /gün | Proje Kritik yolu |
|----------|-------------------|--|
| 0 | 374,75 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,1 | 366,68 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,2 | 361,60 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,3 | 356,53 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,4 | 351,45 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,5 | 346,38 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,6 | 341,30 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,7 | 336,23 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,8 | 331,10 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 0,9 | 326,08 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |
| 1 | 321,00 | 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 |

Adım 4: Alanların merkezi yöntemiyle durulaştırma

Tablo 4'te üyelik dereceleri yani olasılık düzeyleri atanmış olan bulanık süreli proje tamamlanma sürelerinin durulaştırma işlemi Denklem (20) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen veriler Tablo 4'te sunulmuştur. Proje tamamlanma süresi $336,22 \approx 336$ gün olarak elde edilmiştir. Bu değer alfa kesim aralıklarından 0,70-0,80 değeri arasında yer almaktadır. Proje kritik yolu aynı şekilde 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 olmaktadır.

Tablo 4. Durulaştırma Yöntemi Hesaplamaları (Defuzzification Methods Calculation)

| $\mu_{T_{ij}}$ (Üyelik dereceleri) | Proje Çıkış Süreleri /gün | $T_{ij}^* = \frac{\sum \mu_{T_{ij}}(t_{ij})T_{ij}}{\sum \mu_{T_{ij}}(t_{ij})}$ |
|------------------------------------|---------------------------|--|
| 0 | 374,75 | 336,22 \approx 336 gün |
| 0,1 | 366,68 | |
| 0,2 | 361,60 | |
| 0,3 | 356,53 | |
| 0,4 | 351,45 | |
| 0,5 | 346,38 | |
| 0,6 | 341,30 | |
| 0,7 | 336,23 | |
| 0,8 | 331,10 | |
| 0,9 | 326,08 | |
| 1 | 321,00 | |

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Elde edilen bulgular ışığında bulanık ve net değer ile temsil edilen proje süre farkları dikkat çekici nitelikte olduğu görülmüştür. Ele alınan projede proje kritik yolu değişim göstermemiştir fakat bu durum her zaman beklenen bir durum değildir. Araştırma sonuçları incelendiğinde 450 günde yapımı tamamlanmış olan proje için; proje kritik yolunun 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 numaralı faaliyet adımlarından oluştuğu, bulanık proje süresinin maksimum 480 gün olduğu, net proje süresinin ise 336-355 gün arasında değişim gösterebileceği söylenebilir. Bu bağlamda proje yapım süresinin 480 güne daha yakın bir değerde olduğu görülmektedir.

Bulanık yaklaşımların eksik kaldığı noktalardan bazıları; yöntem seçimlerini, faaliyetlere atanması gereken üyelik derecelerinin belirlenmesini ve faaliyet sürelerinin hangi bulanık sayı tipiyle temsil edilmesi gerektiğini karar vericinin seçimine bırakmış olmasıdır. Yöntemin bu tür eksikliklere kesin cevaplar içermiyor oluşu yöntemin geliştirilmeye ihtiyaç duyabileceği gelişimlere açık olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen alternatif tekniklerle bu tür sorunların üstesinden gelinmeye çalışıldığı görülmektedir. Proje planlama alanında çok fazla tekniğin oluşu, optimal çözüm modelinin oluşturulmasında uygun tekniğin seçimi konusunun önemini ortaya koymaktadır. Çalışmada önerilmiş olan çözüm algoritmaları ışığında;

Birinci çözüm algoritması, bulanık CPM-LP için proje süresi 263,5,321,480 gün, kritik yolun ise 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 numaralı faaliyetlerden oluştuğu görülmüştür. Yager sıralama yöntemi belirsizliğin üyelik derecelerinin bilinmediği durumlarda net değer dönüşüne imkân vermektedir. Yager yöntemiyle net sayı dönüşümü yapılan bulanık çıkarım kümesi için proje süresi 355 gün, proje kritik yolu 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 olarak elde edilmiştir. Net sayı dönüşüm değerinin muhtemel ve en kötü süre aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Faaliyetlerin proje içerisinde üyeliğinin belirlenmesi konusunda alternatif teknikler olmasına karşın çoğunlukla geçmiş deneyimlerden yararlanılarak karar vericinin tercihinin ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda Yager sıralama yönteminin faaliyetlerin projeye olan üyeliğinin bilinmediği durumlar için uygulanabilir bir yöntem olduğu söylenebilir. Fakat proje toplam süresi ve kritik yolu için net sonuçlardan bahsediyor oluşu yönetsel süreçte bilgi kayıplarına neden olabilir.

İkinci çözüm algoritması, Alfa kesim yöntemiyle $[0,1]$ aralığında 0,1 artırımla yapılan çözümleme değerleri, α , 0'dan 1'e doğru artarak ilerletilirken proje süresinin de azaldığı görülmektedir. Alfa kesiminden elde edilen bulanık çıkarım kümesine Alanların Merkezi yöntemi uygulanarak net değer dönüşümü yapılmış ve proje süresi 336 gün, proje kritik yolu 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 olarak elde edilmiştir. Bu değer $\alpha = 0,7-0,8$ arasında kaldığı tespit edilmiştir. Alfa (α) kesim yöntemi, bulanıklığı koruyarak atanan her bir kesim seviyesinde projenin toplam süresi ile kritik yolunun durumunu açık olarak gösterebilen bir yöntemdir. Bu durumun yönetim sürecine daha fazla bilgi sağlayabilir olduğu düşünülmektedir. Alanların Merkezi yöntemi durulaştırma yöntemlerinden birisidir ve hesaplama formülünde görüldüğü gibi üyeliklerin (μ) bilinmesini gerektirmektedir. Üyelik dereceleri atanmış olan bulanık proje sürelerinin net değer dönüşümlerinde alternatif bir teknik olarak başarıyla uygulanmıştır.

Tablo 5. Hesaplama Sonuçları (Calculation Results)

| 1. Çözüm Algoritması | | | 2. Çözüm Algoritması | | |
|----------------------------|----------|---------------------------------------|-------------------------|--------------|--|
| Bulanık CPM-LP model / gün | | Yager Sıralama Yöntemi- LP model /gün | Alfa Kesim Yöntemi /gün | | Durulaştırma- Alanların Merkezi Yöntemi /gün |
| En İyi Süre | Muhtemel | En Kötü Süre | α | Proje Süresi | |
| 263,5 | 321 | 480 | 0 | 374,75 | 336,2~336 |
| | | | 0,1 | 366,68 | |
| | | | 0,2 | 361,60 | |
| | | | 0,3 | 356,53 | |
| | | | 0,4 | 351,45 | |
| | | | 0,5 | 346,38 | |
| | | | 0,6 | 341,30 | |
| | | | 0,7 | 336,23 | |
| | | | 0,8 | 331,10 | |
| | | | 0,9 | 326,08 | |
| | | | 1 | 321,00 | |

Uygulanmış olan tüm yöntemlere ait hesaplanan proje toplam süreleri yukarıda Tablo 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar yöntemler arasında karşılaştırma yapabilmeye imkân sağlamaktadır. Tablo 5'te farklı yöntemler kullanılarak proje süresindeki değişimler gösterilmiştir. Farklı yöntemler kullanılarak en optimal proje süresinin hesaplanması proje yönetiminin ana kısıtlarından olan zamanı etkileyerek proje başarısına etki etmektedir. Proje toplam zamanın (en uzun yol süresi) daha gerçekçi hesaplanmasının projeye olan katkısı düşünüldüğünde proje süre ve maliyetini olumlu yönde etkileyebileceği söylenebilir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Proje yönetiminin temel alanlarından birisi olan proje zaman yönetimi, faaliyetlerin (görevlerin) mümkün olan en kısa sürede tamamlanabilecek şekilde programlanması, uygulanması ve kontrolü ile ilgilidir (Karahana ve Ezin, 2014). İnşaat projelerinde her geçen gün artan belirsizlik ve karmaşıklık proje zaman planlamasının da kullanılan klasik yöntemlerin (CPM ve PERT) yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Günümüzde proje yöneticileri, projeler için etkinlik sürelerinin kesin (determinist) bir şekilde belirlenemediği, hatta üç farklı olasılığa dayalı hesaplama yapmaya imkân sağlayan, program değerlendirme ve gözden geçirme tekniğinin bile yetersiz kaldığı birçok durum ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu bağlamda proje yöneticileri gelişebilecek durumları değerlendirebilecekleri alternatif ve gelişmiş planlama yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde yaşanan problemlerdeki zaman parametrelerinin belirsizliği, klasik yöntemlerin yerine bulanık CPM yani FCPM ve bulanıklığı konu alan yöntemlerin gelişmesine yol açmıştır (Elizabeth ve Sujatha, 2013).

Çalışma kapsamında incelenen Chen (2006), Chen ve Hsueh (2008) ve Durucasu vd. (2015)'nin çalışmalarında kullandıkları çözümlemelerin bulanık değerlerin elde edilmesi ve net dönüşüm ile bulanık sonuçların desteklenmesi temeli üzerine kurulduğu görülmüştür. Bu çalışmada öngörülen ve uygulanan bulanık çözüm algoritmaları bahsedilmiş olan çalışmalardan farklı olarak proje süre ile kritik yolun bulunması probleminde ilk olarak bulanık sonuçların elde edilmesi, daha sonra net değer sonuçlarının elde edilmesi yöntemi üzerine kurulmuştur. Böylece bulanık sonuçların desteklenmesi dışında her iki durum için oluşabilecek süre farklılıkları ortaya çıkarılmıştır. Çalışmada maksimizasyon bağlamında çalıştırılan LP modelleri ve önerilen algoritma çözümlerinden elde edilen proje süre sonuçları; net ve bulanık sayılar söz konusu olduğunda proje süresinde oluşabilecek süre farklılığı, proje için söz konusu olabilecek belirsizlik durumlarını açıklayıcı nitelikte olduğu görülmüştür. 450 günde yapımı tamamlanmış olan inşaat projesinde, proje kritik yolu her iki çözüm algoritmasıyla analiz edildiğinde aynı sonucu vermiştir. Kritik yolda bir değişim olmaksızın bulanık proje süresinin maksimum 480 gün, net proje süresinin ise 336-355 gün arasında değişim gösterebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda proje yapım süresinin gerçekte 480 güne daha yakın bir değerde olduğu görülmektedir.

Önerilen çözüm algoritmalarında belirsizlik durumları ile baş edebilmek için kullanılan ve 3'lü süre tahminin yapıldığı klasik yöntemlerden olan PERT tekniğinin yerine daha fazla belirsizlik ve riske sahip olabileceği değerlendirilen inşaat projelerinde daha geniş bir olasılıksal yaklaşım sunan alfa kesim yönteminin daha yararlı olabileceği düşünülmüştür. Müteakip araştırmalarda daha hassas çözümlemeler elde edilebilmesi için Alfa (α) kesim aralıklarının değiştirilerek proje zaman planlamasının yeniden yapılabileceği ve önerilen yaklaşım ve yöntemlerde bulanık sayıların belirsizliğini temsil etmek için üçgen bulanık sayılardan farklı olarak yamuk, Gauss, L-R tipi, farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak araştırma alanının genişletilebileceği düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Altaş, İ.H., 1999. Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı. Enerji, Elektrik, Elektromekanik3e, Vol: 62, s.80-85.
- Athi, Ö., Kahraman, C., 2013. Fuzzy Critical Path Analysis, YTÜ Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Journal of Engineering and Natural Sciences, Vol. 31, No. 2, pp. 128-140,
- Buckley, J.J., 1989. Fuzzy PERT, in Applications of Fuzzy Set Methodologies in Industrial Engineering, Elsevier, 115-125, Amsterdam
- Chanas, S., Zielinski, P., 2001. Critical Path Analysis in the Network with Fuzzy Activity Times. Fuzzy Sets and Systems, 122(2), pp. 195-204.
- Chen, C. T., Huang, S. F., 2007. Applying Fuzzy Method for Measuring Criticality. Information Sciences, 177(12), pp. 2448-2458.
- Chen, S. P., 2006. Analysis Of Critical Paths in A Project Network with Fuzzy Activity Times. European Journal of Operational Research, 183, pp. 442-459.
- Chen, S. P., ve Hsueh, Y. J., 2008. A Simple Approach to Fuzzy Critical Path Analysis in Project Networks. Applied Mathematical Modelling, 32(7), pp. 1289-1297.
- Çolak, M., Kesik, Ş., Mutman, U. Aydın K., G., 2018. A Project Management Model for Investigation of a Construction Project

- International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 4(2), pp. 32-36.
- Durucasu, H., İcan, Ö., Yeşilaydın, G., Gülcan, B., Karamaşa, C., 2015. Bulanık CPM Yöntemiyle Proje Çizelgeleme: İnşaat Sektöründe Bir Uygulama. Ege Akademik Bakış Dergisi, 15(4), s. 449-466.
- Dutta, P., Boruah, H., Ali, T., 2011. Fuzzy Arithmetic with And Without Using α -Cut Method: A Comparative Study. International Journal of Latest Trends in Computing, 2(1), pp. 99-107.
- Elizabeth, S., Sujatha, L., 2013. Critical Path Problem Under Fuzzy Environment. International Journal of Computer Applications, 75(1), s. 7-11.
- Erdin, C., 2019. Bulanık Topsis Yöntemiyle Yönetici Seçimi. Yıldız Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 3(1), s. 37-50.
- Gencer, C. ve Türkbey, O., 2001. "Proje Tamamlanma Zamanının Bulunmasında İstatistiksel Analiz Yardımıyla Bulanık PERT, Klasik PERT ve Gerçek Dağılım Yöntemlerinin Karşılaştırılması, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi,3:29-39
- Güvenç, U., Sönmez, Y., Birgül, S., 2007. Bulanık Mantık Denetimli DA-DA Çeviricileri İçin Geliştirilen Bir Eğitim Seti. Politeknik Dergisi, 10(4), s. 339-346.
- Hajdu, M., Isaac S., 2017."Sixty years of project planning: history and future," Organization, Technology and Management in Construction an International Journal vol 8(1), pp.1-12,
- Karahan, Y. D., Ezin, Ö. G., 2014. PERT-CPM Tekniğiyle Bir İnşaatın Yapım Süresi ve Maliyetlerinin Optimizasyonu. Bartın Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi, 10(5), s. 73-88.
- Koçak, Ç., Yiğit, T., 2020. Teknoloji Bağımlılığının Bulanık Mantık ile Sınıflandırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Special Issue: International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2020), s. 126-132.
- Kurij, K. V., Milajić, A. V., Beljaković, D. D., 2014. Analysis Of Construction Dynamic Plan Using Fuzzy Critical Path Method. Tehnika-Naše Građevinarstvo, 69(2), pp. 209-215
- Kuzugüdenli, E., 2018. Bulanık Mantık Yöntemiyle Kızılçamda Verimliliğin Modellenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6 (3), s. 426-434.
- Liberatore, M. J., 2008. Critical Path Analysis with Fuzzy Activity Times. IEEE Transactions on Engineering Management, 55(2), pp. 329-337.
- Madhuri, U., Saradhi, P. ve Shankar, R., 2014. "Fuzzy Linear Programming Model for Critical Path Analysis", International Journal of Contemporary Mathematical Sciences, 8:93-116
- Özcan, M., 2018. Bulanık Çıkarım Sistemi ile Bireysel Personel Performansının Değerlendirilmesinde Bir Uygulama. Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 19(2), s. 372-388.
- Özköse, H., Gencer, C., 2019. Proje Planlama ve Çizelgelemede Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yöntem ile Kritik Yolun-Proje Tamamlanma Zamanının Tespiti ve Zaman-Maliyet Analizi. Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10(20), s. 278-300.
- Prade, H., 1979. Using Fuzzy Set Theory in a Scheduling Problem: A Case Study. Fuzzy Sets and Systems, 2(2), pp. 153-165.
- Temiz Kutlu, N., 2001. Proje Planlama Teknikleri ve PERT Tekniğinin İnşaat Sektöründe Uygulanması Üzerine Bir Çalışma. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 3(2), s. 164-193.
- Tiryaki, A. E., Kazan, R., 2007. Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık ile Modellemesi. Mühendislik ve Makina, 48(565), s. 3-8.
- Uğural, M. N., Çağrı, Ş. (2020). İnşaat Sektöründe Kalite Maliyeti Entegre Edilmiş Kazanılmış Değer Analizi Üzerine Bir Uygulama. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20), 42-49.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, 8(3), 338-353.
- Zhang, H. C., Huang, S. H., 1994. A Fuzzy Approach to Process Plan Selection. The International Journal of Production Research, 32(6), 1265-1279.



KARMA ÇELİK LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENCİ

Kazım TÜRK*, Nazlı ÇİÇEK, Metin KATLAV, Peki TURGUT

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Makro ve Mikro Çelik Lif,
Karma Lifli KYB,
Elektriksel Özdirenç,
İletkenlik,
Sıcaklık Artışı.*

Öz

Beton yüksek basınç dayanımı yanı sıra çok düşük elektriksel iletkenliği sahiptir. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) elektriksel özdirenci, iletkenliği ve sıcaklık artışı üzerinde uzun ve kısa çelik liflerin etkisini, lif kombinasyonu (tek ve karma) ve kısa çelik liflerin boyuna (6 ve 13 mm) bağlı olarak belirlemek için dört adet karışım tasarlanmıştır. Bu karışımlar, lifsiz referans, sadece uzun tek lif takviyeli ve uzun lif ile iki farklı boya sahip kısa çelik lif içeren iki adet karma çelik lif takviyeli karışım olmak üzere dört farklı karışım tasarlanmıştır. Tüm çelik lif takviyeli KYB karışımları hacimce toplam %1 lif içermektedir. Karışımların belirlenmesinde EFNARC tarafından önerilen işlenebilirlik testleri (Çökme-yayıma, t_{500} ve J-halkası yükseklik farkı) dikkate alınmıştır. Karışımlara ait mekanik özellikler (basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı) ile elektriksel özdirencin belirlenmesi için numuneler üretilmiş ve toplam 90 gün boyunca 23 ± 2 °C'de su içerisinde kür edilmiştir. Sonuçta çelik lif takviyesinin betonun elektriksel özdirencini düşürdüğü ve dolayısıyla iletkenliğini artırdığı tespit edilmiştir. Bunun yanında karma lifli KYB numunelerinin en düşük elektriksel özdirenç ve en yüksek iletkenlik ile sıcaklık artışına sahip olduğu görülürken, narınlığı yüksek olan 13 mm boyunda mikro çelik lifin betonun elektriksel özellikleri üzerinde 6 mm boyunda mikro çelik life göre daha olumlu etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

ELECTRICAL RESISTANCE OF HYBRID STEEL FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING CONCRETE

Keywords

*Macro and Micro Steel Fiber,
Hybrid Fiber Reinforced SCC,
Electrical Resistivity,
Conductivity,
Temperature Rise.*

Abstract

Concrete has high compressive strength as well as very low conductivity. In this study, the effect of long and short steel fibers on electrical resistivity, conductivity and temperature rise of self-compacting concrete (SCC) was investigated depending on fiber combinations (single and binary hybrid) and length of the short steel fibers (6 and 13 mm). For this purpose, four mixtures were designed: non-fiber reference, a single fiber-reinforced mixture with only long fibers and two hybrid steel fiber-reinforced mixtures with long and 6mm or 13 mm short steel fiber. Also, all steel fiber-reinforced mixtures contain a total of 1% steel fiber by volume. The workability tests of slump-flow, t_{500} and J-ring height difference were performed by the EFNARC. The samples were cured for 90 days and then, mechanical properties and electrical resistivity of samples were determined. Finally, the inclusion of steel fiber into SCC dropped the electrical resistivity and thus, increased its conductivity. In addition, hybrid fiber-reinforced SCC samples had the lowest electrical resistivity and highest conductivity and temperature rise. Also, 13 mm long micro steel fiber having high slenderness had a more positive effect on the electrical properties of concrete than 6 mm micro steel fiber.

Alıntı / Cite

Türk, K., Çiçek, N., Katlav, M., Turgut, P., (2022). Karma Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Elektriksel Direnci, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 482-494.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K. Türk, 0000-0002-6314-9465
N. Çiçek, 0000-0002-1605-5212
M. Katlav, 0000-0001-9093-7195
P.Turgut, 0000-0002-3711-4605

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 01.07.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 31.10.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 10.01.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

* İlgili yazar / Corresponding author: kazim.turk@inonu.edu.tr, +90-422-377-3000

1. Giriş (Introduction)

Dünyada ilk defa 1980'lerde Japonya'da geliştirilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB), herhangi bir dahili sıkıştırma işlemi gerektirmeden kendi ağırlığı altında akabilen, dar kesitler ve engeller arasından geçebilme yeteneğine sahip olan ve bu esnada ayrılmaya uğramadan kalıp içerisindeki tüm boşlukları doldurulabilen yüksek performanslı inovatif bir beton türüdür (Okamura ve Quchi, 1999). KYB'nin yeterli kohezyon ve segregasyon direncine sahip olması için hamur hacminin geleneksel betona göre daha fazla olması gerekir. Bu sebeple, karışımda daha fazla toz malzeme miktarına (<125µm) ve dolayısıyla yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip hiper akışkanlaştırıcıya gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla, betonun kendiliğinden yerleşebilirliği için büyük öneme sahip olan toz malzeme, çimento ile yer değiştirilerek karışıma dahil edilen ve genellikle puzolanik özelliğe sahip atık yapay mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vs.) kullanılmaktadır.

Gevrek bir malzeme olan betonun özellikle çekme dayanımının geliştirilmesi amacıyla, ilk çalışmalar 20 yy. ortalarında çelik lif takviyeli betonun mekanik davranışı üzerine yapılmıştır (Bentur ve Mindess 1992). Betona lif takviye edilmesi, çatlak başlangıcını, oluşumunu ve yayılmasını geciktirerek betonun çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesini artırarak betonu daha sünek bir hale getirir (Bunsell, 1988; Sulthan vd. 2019). Beton veya çimento esaslı kompozitlerle yapılan çalışmalarda kullanılan lifler, tek tip veya birden fazla lif türünün birlikte kullanılmasıyla karma olarak tasarlanabilir. Betona tek tip lif takviye edildiğinde, betondaki göçme aşamalı ve çok ölçekli bir süreç olduğundan, tek lif sadece belirli bir bölgede etkili olabilecek ve böylece en uygun performansa ulaşamayacaktır. Bu sebeple, betonun özelliklerinden en iyi şekilde faydalanmak ve betonarme elemanların mekanik performanslarını geliştirmek için farklı boy, narinlik ve elastisite modülüne sahip lifler karma olarak bir arada kullanılmaya başlanmıştır. Karma çelik lif takviyesiyle ilgili ilk çalışmalar Rossi vd. (1987) tarafından başlatılmış ve ortaya çıkan malzeme çok-ölçekli lif-takviyeli beton diye adlandırılmıştır. Bu hipoteze göre, çelik lifler hem malzeme hem de yapısal seviyede rol oynar. Öncelikle, mikro çelik lifler mikro seviyedeki çatlakların başlamasını, oluşumunu ve yayılmasını kontrol ederek betonda yüksek çekme dayanımına neden olurken, büyük makro lifler makro çatlakları kontrol ederek yapı elemanlarının hem sünekliğini hem de enerji yutma kapasitesini geliştirirler. Böyle bir karma lif takviyeli kompozitte, farklı liflerin varlığı en uygun performansa ulaşmakta ilgi uyandıran mühendislik özellikler de sunar (Mobasher B. vd,1996; Akçay B., 2012; Kwon vd., 2014; Teng vd., 2018). Ayrıca literatürde bazı araştırmacılar (Hannant, 1987; Bentur ve Mindess, 1990; Balaguru vd., 1992) tarafından da belirtildiği gibi, betonun istenen düzeyde mekanik özellikleri ile çatlak başlangıcını, oluşumunu ve yayılmasını kontrol eden ve engelleyen rastgele dağılmış ve süreksiz makro ve mikro liflerin birlikte karma olarak kullanılmasıyla geliştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Günümüzde en sık kullanılan yapı malzemelerinden beton, yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Betonun elektriksel özdirenci, elektriği geçirme yeteneği olan iletkenlik teorisine bağlıdır. Elektriksel iletkenlik, malzeme içerisindeki elektron veya elektron boşlukları tarafından gerçekleştirilir. Elektrik iletkenliği çimento esaslı kompozitlerde, iyonların boşluk solüsyonlarında hareket etmeleriyle meydana gelir. Bu hareket boşluk solüsyonlarındaki iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte ve frekansın artışıyla birlikte iyon transferi hızlanmaktadır. Kısacası, betonda elektrik akımı, gözeneklerdeki sıvıda çözülmüş iyonlar tarafından taşınır. Bunun bir sonucu olarak iletkenlik; porozite ve boşluk solüsyonu iletkenliğine bağlıdır. Betonun elektriksel özdirenci; gözenek büyüklüğü dağılımı, doyumluk derecesi, gözenek sıvısı iletkenliği ve sıcaklıktan etkilenir (Cleven vd., 2021; Sabbağ ve Uyanık, 2020; Uygunoğlu vd., 2018; Chen vd., 2014). Doyumluk oranı yüksek ve geniş çaplı gözeneklere sahip betonlar (su/çimento oranı yüksek) düşük bir elektriksel özdirence sahiptir (Pandey, 2011). Diğer bir ifadeyle, betonun sabit bir nem durumu için, su/çimento oranının azaltılması ile elektriksel özdirenci değeri daha yüksek değerler alır (Polder, 2001). Bir malzemenin iletkenliğinin yüksek olması için elektriksel özdirencinin düşük olması gerekmektedir (Huang 2009; Pan 2015). Çimento esaslı kompozitlerden olan beton yalıtıcıdır ve elektriksel iletkenliği çok düşük seviyelerdedir. Yalıtıcı olan betonu iletken hale getirmek için beton içerisine toz malzemeler, lifler ve agregalar katılmaktadır. Grafit, karbon ve alüminyum tozu, karbon ve çelik lif, çelik talaşı ve demir içeriği yüksek agregalar, çelikhane cürufu gibi malzemelerin kullanılması ile betonun iletkenlik özellikleri arttırılmaktadır (Gopalakrishnan vd., 2015; García vd., 2009). Bu malzemeler belli oranlarda beton karışımına ilave edilip istenilen iletkenliğin sağlanması, aynı zamanda betonun mevcut mekanik özelliklerini de kaybetmemesi ve ekonomik olması istenmektedir (Pan, 2015). Yürüyüş yolları, karayolları, havaalanı pistleri gibi alanlarda soğuk kış mevsimlerinde oluşan kar birikimleri ve buzlanma insan yaşamını olumsuz etkilemektedir. İletken beton teknolojisi bu sorunlara çözümler sunmak için geliştirilmiştir. Normalde yalıtıcı olan beton iletken hale getirilerek beton içerisinden elektrik akımı geçirilmekte ve beton ısıtılmaktadır. Betonun ısınması ile buzlanma engellenmekte veya mevcut buzlanma eritilmektedir (Tuan 2004). İletken beton teknolojisi daha birçok alanda da kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları; elektriksel sistem ve elektronik bileşenleri koruma amaçlı yapılar, elektronik endüstrisinde anti statik döşemeler, betonarme yapılarda katodik koruma olarak sıralanabilir (Tuan 2004; Tumidajski 1997; Chung 2004; Bertolini vd., 2004). Bununla beraber, Tian ve Hu (2012) betonda elektriksel iletkenlik için herhangi özel bir yönetmelik ya da standart olmamasına karşın, iletken betonun inşaat sektörü ve diğer alanlarda uygulanabilirlik açısından önem arz ettiğini

belirtmişlerdir. Bu çalışmada da lifsiz referans ile farklı boyut ve narinlikteki çelik liflerin tek ve karma kombinasyonlarıyla elde edilen KYB karışımlarının elektriksel öz direnci, iletkenliği ve sıcaklık artışının araştırılması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1.1. Çimento ve Uçucu kül (Cement and Fly ash)

Bu çalışmada tasarlanan ve üretilen kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında Çimsa Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Bu çimentoya ait kimyasal bileşimler Tablo 1’de verilmiştir. Çimentonun özgül ağırlığı 3.15 ve özgül yüzey alanı ise 4891 cm²/g’dir. Çalışmada, mineral katkı olarak, ağırlıkça çimentonun yerine İsen Sugözü Termik Santralinden alınan Uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal bileşimler Tablo 1’de verilmektedir. Uçucu külün özgül ağırlığı 2.35 olup, inceliği ise 45µm elekte kalan miktarı %21’dir.

Tablo 1. Çimento ve Uçucu Kül Kimyasal Kompozisyonları (The Chemical Composition of Cement and Fly Ash)

| (%) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Kızdırma Kaybı |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|
| PÇ | 18.90 | 5.15 | 3.36 | 63.59 | 1.57 | 2.65 | 0.77 | 0.40 | 3.59 |
| UK | 63.09 | 21.63 | 6.77 | 1.07 | - | 0.10 | - | 2.79 | 2.68 |

2.1.2. Agrega (Aggregate)

Kendiliğinden yerleşen lif takviyeli beton karışımların üretiminde 0-4, 0-8, 4-16 mm olmak üzere üç farklı tip agrega grubu kullanılmış olup, su emmeleri ve özgül ağırlıkları sırasıyla, %2.20, %2.26, %1 ve 2.41, 2.58 ve 2.67’dir. Ayrıca beton karışımlarda tam doluluk ve uygun işlenebilirlik elde etmek için, %45 oranında 0-4 mm, %30 oranında 0-8 mm ve %25 oranında ise 4-16 mm agrega kullanılmıştır.

2.1.3. Lifler (Fibers)

Bu çalışma kapsamında, bir tip makro çelik lif, iki farklı tip mikro çelik lif olmak üzere toplamda üç farklı tip lif tercih edilmiştir. Makro ve mikro çelik lifler Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.’den temin edilmiştir. Makro çelik liflerin her iki ucuda kancalıdır ve firma tarafından 3D 65/60 olarak adlandırılmıştır. Mikro lifler ise 13 mm ve 6 mm boylarında düz olup, firma tarafından sırasıyla OL 13/.16 ve OL 6/.16 olarak adlandırılmıştır. Makro ve mikro çelik liflerin özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılacak Liflerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri (Mechanical and Physical Properties of the Fibers Used in the Study)

| Lif Tipi | Boy (mm) | Narinlik | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Yoğunluk (kg/m ³) |
|-----------|----------|----------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 3D 65/60 | 60 | 65 | 1345 | 200 | 7850 |
| OL 13/.16 | 13 | 87 | 3000 | 200 | 7200 |
| OL 6/.16 | 6 | 40 | 3000 | 200 | 7200 |

2.1.4. Kimyasal Katkı (The Chemical Admixture)

Tüm karışımlarda kendiliğinden yerleşebilirlik ölçütlerini sağlamak, kullanılan liflerin işlenebilirlik özelliği üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak ve su/bağlayıcı oranını düşürmek amacıyla, SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.’den temin edilen ve özgül ağırlığı 1.06 olan yüksek oranda su azaltıcı polikarboksilik polimer esaslı ViscoCrete Hi-Tech 51 hiperakışkanlaştırıcı (HA) kimyasal katkı kullanılmıştır.

2.2 Karışım Oranları (Mix Proportions)

Tasarlanan tüm KYB karışımları için, liflerin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırmak ve liflerin matris tarafından sürüklenebilmesini mümkün kılacak viskoziteyi elde etmek için toplam bağlayıcı miktarı 900 kg/m³ ve su/bağlayıcı (S/B) oranı 0.26 olarak sabit tutulmuştur. Agregalar doymuş yüzey kuru (DYK) alınarak nem düzeltmesi yapıldığı beton karışım oranları Tablo 3’de verilmiştir. Bu karışımlara ait isimlendirmede kullanılan ifadeler-şu şekildedir; REFERANS: Kendiliğinden yerleşen lif içermeyen beton, MAK: Makro çelik lif (3D 65/60), MİK13: 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif (OL 13/.16) ve MİK6: 6 mm uzunluğundaki mikro çelik lif (OL 6/.16). MAK ve MİK’in sol tarafına yazılan rakamlar ise karışıma ilave edilen liflerin hacimce yüzde miktarlarını ifade etmektedir. Örneğin; 0.8MAK_0.2MİK13 şeklinde isimlendirilen karışım, %0.80 oranında makro çelik lif, %0.20 oranında 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lifi içeren lifli KYB’yi ifade etmektedir.

Tablo 3. Karışım Oranları (Mix Proportions) (kg/m³)

| KARIŞIM ADI | PÇ | UK | SU | S/B | HA | AGREGA (DYK) | | | ÇELİK LİF | | |
|-----------------|-----|-----|-----|------|-------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | | | | | (0-4) mm | (0-8) mm | (4-16) mm | 3D 65/60 | OL 13/.16 | OL 6/.16 |
| REFERANS | 540 | 360 | 230 | 0.26 | 10.25 | 472 | 314 | 262 | - | - | - |
| 1MAK | 540 | 360 | 230 | 0.26 | 10.25 | 460 | 307 | 256 | 78.5 | - | - |
| 0.8MAK_0.2MİK13 | 540 | 360 | 230 | 0.26 | 10.50 | 460 | 307 | 257 | 62.8 | 14.5 | - |
| 0.8MAK_0.2MİK6 | 540 | 360 | 230 | 0.26 | 9.75 | 461 | 307 | 256 | 62.8 | - | 14.5 |

2.3 Yöntem (Method)

2.3.1 Karışımların Hazırlanması (Preparation of Mixtures)

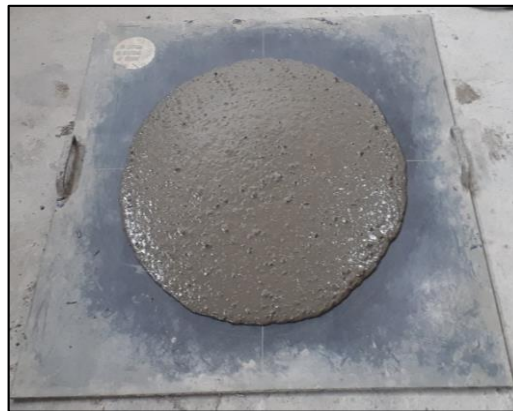
Karışımların tasarlanması, EFNARC (2005) komitesi tarafından KYB için önerilen işlenebilirlik testleri çökme-yayılma ve t_{500} esas alınarak yapılmıştır. Tüm karışımlara ait çökme-yayılma değerleri, EFNARC (2005) komitesinin önerdiği yayılma sınıfı SF2 (660mm-750mm) hedef alınarak karışımlarda değişken olarak sadece hiperakışkanlaştırıcı alınmıştır. Karışımların hazırlanmasında izlenen yol aşağıdaki gibidir:

- Agregalar ve makro çelik lifler karışım suyunun 2/3 ile beraber miksera eklenerek 3 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Daha sonra çimento, uçucu kül, hiperakışkanlaştırıcı ve karışım suyunun kalan 1/3'ü miksera eklenerek 10 dakika karıştırılmıştır. Mikro lifler ise, topaklanmayı önlemek amacıyla 7. dakikada azar azar ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda homojenliği sağlamak için toplamda 13 dakika karıştırma süresi uygulanmıştır.

2.3.2 Taze Beton Deneyleri (Fresh Concrete Tests)

İşlenebilirlik deneyleri EFNARC (2002) Komitesi'nin önerilerine göre her bir karışım için çökme-yayılma, t_{500} ve J-halkası deneyleri yapılmıştır.

KYB'nin doldurma yeteneği ve stabilitesinin ölçüldüğü çökme-yayılma testinde, deney işlemi başlamadan test aparatları nemli bir bezle silindi. KYB karışımının homojen bir şekilde çökme konisine doldurulduktan sonra, koni 30 saniye içerisinde dikey olarak kaldırılmıştır. Çökme konisinin kaldırıldığı an ile betonun tabla üzerindeki 500 mm yayılma çapına ulaştığı an arasında geçen t_{500} süresi olarak kaydedilmiştir. Daha sonra tabla üzerindeki yayılma tamamlandığında birbirine dik doğrultudaki çaplar ölçülüp aritmetik ortalaması alınmıştır. Böylelikle karışımın çökme-yayılma değeri belirlendi (Şekil 1). Lifli KYB'nin engeller arasından geçiş kabiliyetini belirlemek için yapılan J-halkası deneyinde, çökme-yayılma deneyinde yapılan adımlar takip edilmiştir. Daha sonra betonun yayılması tamamlandığında halkanın merkezindeki ile halkanın hemen dışındaki 4 nokta arasındaki yükseklik farklarının ortalaması alınarak J-halkası geçiş yeterliliği (ΔH) ölçülmüştür (Şekil 2).



Şekil 1. Çökme-Yayılma Deneyi (Slump-Flow Test)



Şekil 2. J-Halkası Deneyi (J-Ring Test)

2.3.3 Sertleşmiş Beton Özellikleri (Hardened Concrete Properties)

Bu çalışma kapsamında tüm KYB karışımların 90 günlük mekanik özelliklerini (Basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı) belirlemek için her seriden 3 adet numune hazırlanmıştır. Basınç dayanımı belirlemek için 100mm × 100mm × 100mm boyutundaki küp numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri 3000 kN kapasiteli, yük kontrollü pres makinasında ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak yapılmış olup, test numunelerinin yükleme hızı 6 kN/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca karışımların yarmada çekme dayanımlarını tespit etmek amacıyla $\phi 100 \times 200$ mm silindir numuneler üretilmiştir. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının belirlemek için, basınç dayanımı deneyinde kullanılan 3000 kN kapasiteli pres cihazı kullanılmıştır ve deneyde ASTM C496 / C496M-17 (2017) standardı esas alınarak numune yükleme hızı 1.6 kN/sn olacak biçimde ayarlanmıştır. Bunlara ilaveten, her bir seri için 2 adet 100mm × 75mm × 400mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere, ASTM C1609 standardına göre dört noktalı eğilme altında sehim kontrollü olarak test edilmiştir (Şekil 3).

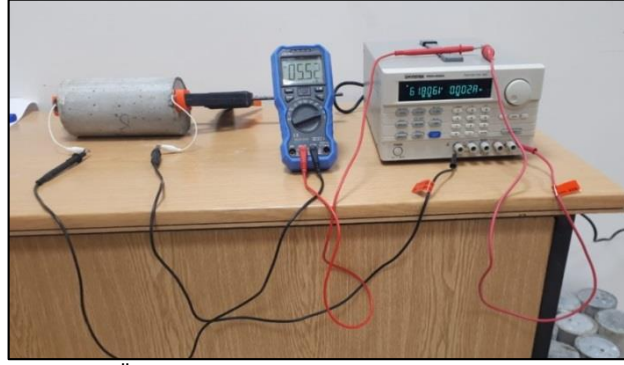


Şekil 3. Dört Noktalı Eğilme Deneyi (The Four-Point Flexural Test)

2.3.4 Elektriksel Özdirenç ve Sıcaklık Artışı Deneyi (Electrical Resistivity and Temperature Rise Test)

2.3.4.1 Elektriksel Özdirenç (Electrical Resistivity)

Tasarlanan lifsiz ve lifli KYB karışımlarından $\phi 100 \times 200$ mm boyutlarında her bir seri için 2 adet silindir numune üretilmiştir. 90 gün boyunca uygun şartlarda su kürü uygulanan numuneler test gününde çıkartılıp için 24 saat etüvde 105 ± 5 °C kurutulmuştur. Etüvden çıkartılan numunelerden üniform akım geçmesini sağlamak amacıyla numunenin her iki ucuna kurşun metal plakalar eklenmiştir. Daha sonra metal plakalar ile beton arasına tuzlu su çözeltisi enjekte edilerek numunelerin iletkenliği artırılmıştır. Daha sonra elektriksel özdirencini ölçmek amacıyla deney esnasında numunelerin her iki ucuna yerleştirilen bakır plakalar mengene ile sıkıştırıldıktan sonra, güç kaynağının artı kutbu bir bakır elektroda eksi kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Elektriksel Özdirenç Deney Düzeneği (Electrical Resistivity Test Setup)

Tüm numunelere sabit 60 voltluk gerilim verilerek geçen akım değerleri multimetre ile ölçülmüştür. İletkenlik ve elektriksel özdirenç değerleri aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P = R \times \frac{A}{L} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{1}{P} \quad (2.2)$$

Burada:

P: Elektriksel özdirenci ($k\Omega \times m$)

L: Bakır elektrotlar arası mesafeyi (m)

R: Hesaplanan direnci (Ω)

A: Numunenin alanını (m^2)

C: İletkenlik ($\frac{1}{k\Omega \times m}$)

2.3.4.2 Sıcaklık Artışı Deneyi (Temperature Rise Test)

Elektriksel özdirenç deneyindeki numuneler ile deney düzeneği kullanılarak numunelere varyak ile sabit 220 volt gerilim verilmiştir. Numuneler 5 cm'lik dört bölge şeklinde işaretlendikten sonra, bu bölgeler üzerinde sıcaklık değişimindeki belirlemek için 30 dakika boyunca 5 dakika aralıklarla dijital lazer sıcaklık ölçer yardımıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5). Daha sonra her bölge için sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla 30. ve 0. dakikadaki ortalama sıcaklık değerleri farkından faydalanılmıştır. Elde edilen bu sıcaklık farkları kullanılarak her bir numune için sıcaklık artışı grafiği çizilmiştir.



Şekil 5. Isıtma Deney Düzeneği (Heating Test Setup)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

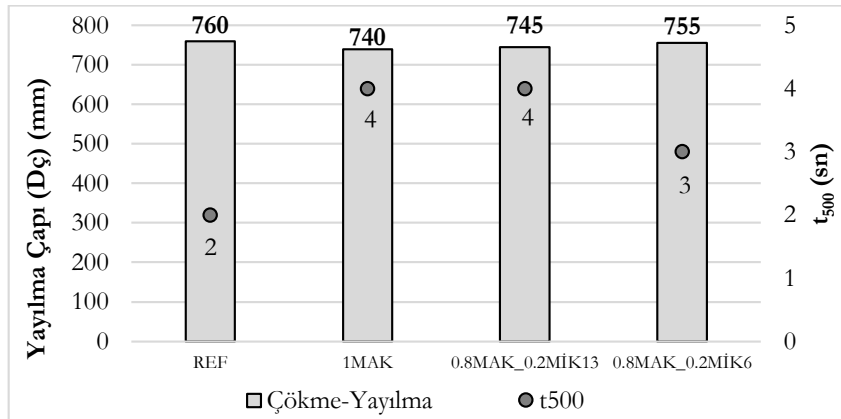
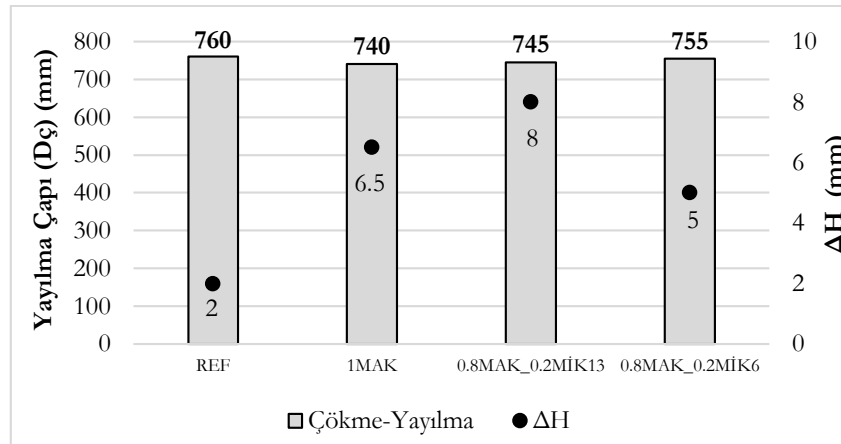
3.1. Taze Beton Özellikleri (Fresh Concrete Properties)

Lifsiz, tek ve karma lif takviyeli KYB karışımlarının taze beton özelliklerine ait bulgular Tablo 4, Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 4. Karışımlara Ait İşlenebilirlik Test Sonuçları (Workability Test Results of Mixtures)

| Karışım Kodu | Çökme-Yayılma | | J-Halkası Yükseklik Farkı (ΔH) |
|-------------------------------|----------------|------------------|--|
| | D _ç | t ₅₀₀ | |
| | (mm) | (sn) | (mm) |
| REFERANS | 760 (SF3) | 2 | 2 |
| 1MAK | 740 (SF2) | 4 | 6.5 |
| 0.8MAK_0.2MİK13 | 745 (SF2) | 4 | 8 |
| 0.8MAK_0.2MİK6 | 755 (SF2) | 3 | 5 |
| EFNARC (2002) Sınır Değerleri | 650-800 | 2-5 | 0-10 |

Şekil 6'dan görülebileceği gibi tüm KYB karışımlarının çökme-yayılma çapı değerleri, 750±10 mm aralığında olup EFNARC (2005)'de tavsiye edilen yayılma sınıfı SF2 (660-750) genelde sağlanmıştır. KYB karışımlarına lif takviye edilmesiyle, yayılma çaplarında azalma, yayılma sürelerinde ise artış görülmüştür. Lif kombinasyonları dikkate alındığında, lifsiz karışıma kıyasla çökme-yayılma değerlerindeki en fazla azalma sadece makro çelik lif içeren karışımda görülmüştür. Ayrıca, mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli karışımlara bakıldığında, 13 mm boyundaki mikro çelik lifin, 6 mm boyundaki mikro çelik life kıyasla işlenebilirlik özellikleri üzerinde daha olumsuz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Türk vd., 2021; Türk vd., 2019; Liu vd., 2019; Nehme vd., 2017) da benzer şekilde, karışıma daha yüksek narinliğe sahip mikro çelik lifler ilave edildiğinde, liflerin topaklanmasından dolayı karma lifli KYB karışımların işlenebilirlik özelliklerinde azalma olduğu bulunmuştur.

**Şekil 6.** Karışımlara ait Çökme-Yayılma ve t₅₀₀ Değerleri (The Values of Slump - Flow and t₅₀₀ of Mixtures)**Şekil 7.** Karışımlara ait J-Halkası Yükseklik Farkı ve Çökme-Yayılma (J-Ring Height Difference and Slump-Flow of Mixtures)

Şekil 7'de J-halkası yükseklik farkı (ΔH) deney sonuçları gösterilmiştir. Tüm KYB karışımlarına ait yükseklik farkı değerleri, EFNARC (2002)'de önerilen sınır değerler (0-10mm) arasında kalmıştır. Ayrıca, KYB karışımlarına lif ilave edilmesiyle birlikte J-halkası yükseklik farkı değerleri, referans karışıma kıyasla artmıştır. Karma lifli KYB karışımları J-halkası yükseklik farkı değerleri mikro lifin narinliğine bağlı olarak değişkenlik göstermiş olup

narinliği daha fazla 13 mm boyundaki mikro lifin karışıma katılması karma lifli karışımın engeller arasında geçiş yeteneğini olumsuz etkilemiştir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Türk vd., 2021; Türk vd., 2020; Akcay B., 2012) liflerin özellikle mikro liflerin topaklanmaya olan eğiliminin fazla olması karışımların geçiş kabiliyeti ve aynı zamanda akıcılığını azaltacağını belirtmişlerdir.

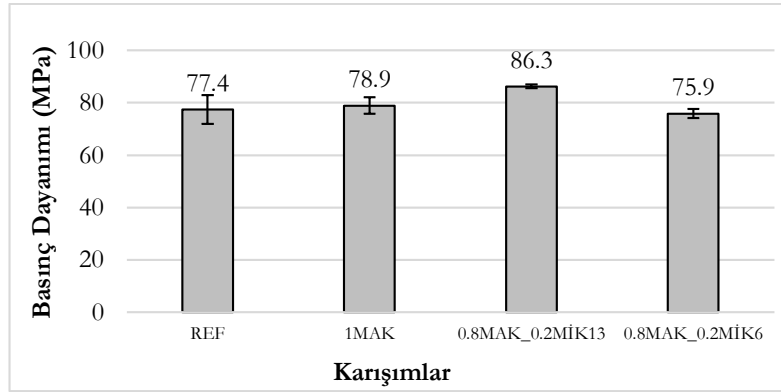
3.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri (Hardened Concrete Properties)

Tüm KYB karışımlarına ait sertleşmiş beton test bulguları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Karışımlara ait 90 Günlük Sertleşmiş Beton Bulguları (90-Day Hardened Concrete Results of Mixtures)

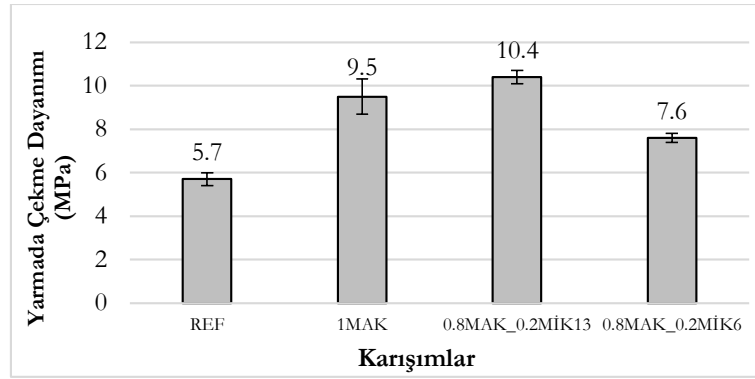
| Karışım Kodu | Basınç Dayanımları (MPa) | Yarmada Çekme Dayanımları (MPa) | Eğilme Dayanımları (MPa) | Sehim (mm) |
|-----------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|
| REFERANS | 77.4 | 5.7 | 12.4 | ---- |
| 1MAK | 78.9 | 9.5 | 18.4 | 1.2 |
| 0.8MAK_0.2MİK13 | 86.3 | 10.4 | 17.3 | 0.6 |
| 0.8MAK_0.2MİK6 | 75.9 | 7.6 | 14.3 | 1.1 |

Hazırlanan KYB karışımlarından üretilen numunelerin 90 günlük basınç dayanımları Şekil 8’de verilmiştir. Tüm lif takviyeli KYB karışımlarından elde edilen bulgular dikkate alındığında, 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışım hariç, tüm lifli karışımların, lifsiz referans karışımına kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, lif takviyeli karışımlarda makro lif ile farklı narinliğe sahip mikro liflerin kullanılması basınç dayanımı değerlerini belirgin bir şekilde etkilemiştir. Çünkü narinliği düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışım, tek tip makro çelik lif takviyeli karışıma kıyasla basınç dayanımını düşürdüğü, narinliği yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lifin ise artırdığı görülmüştür. Shong ve Hwang (2004) tarafından yapılan çalışmada, karışıma ilave edilen lifin narinlik oranının artmasıyla, basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.



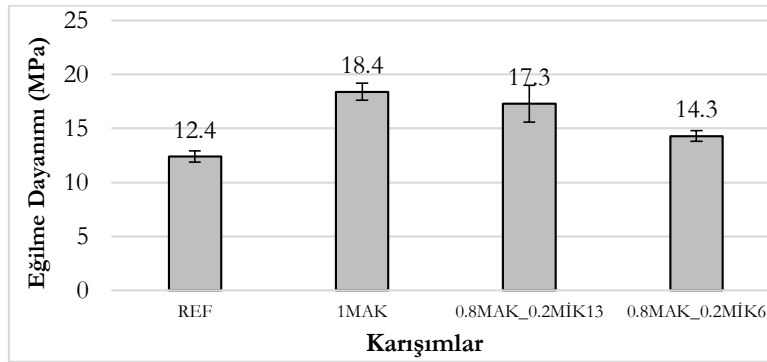
Şekil 8. Karışımlara ait Basınç Dayanımı Değerleri (Compressive Strength Values of Mixtures)

Lifsiz, tekli ve ikili lif içeren KYB karışımlardan üretilen numunelerin 90 günlük yarmada çekme dayanım değerleri Şekil 9’da verilmiştir. Liflerin çatlakları köprülemesi ve geciktirmesi özelliklerinden dolayı, tüm lifli karışımların yarmada çekme dayanım değerlerinin, lifsiz referans karışımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sadece makro çelik lif takviyeli karışım ile karma lif takviyeli karışımlar kıyaslandığında, karışıma 13 mm boyunda mikro çelik lif ilave edilmesinin, yarmada çekme dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan yer alan çalışmalarda (Türk vd., 2021; Türk vd., 2020; Aslani vd., 2020; Tabatabaeian vd., 2017) da, benzer şekilde karışıma daha uzun ve düz çelik lif dâhil edilmesinin, betondaki iç mikro çatlakları yeterli düzeyde köprüleyebilmesi sebebiyle yarmada çekme dayanımını olumlu etkilediği sonucuna varılmışlardır.



Şekil 9. Karışımlara ait Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri (Splitting Tensile Strength Values of Mixtures)

Tüm KYB numunelerinin 90 günlük eğilmede çekme dayanımını belirlemek amacıyla, yapılan dört noktalı eğilme deney sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, karışıma ilave edilen makro çelik lif oranının azalmasıyla eğilmede çekme dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, karışıma makro çelik lif yerine ilave edilen mikro çelik liflerin yalnızca mikro çatlakları köprüleyebilmesidir. Ayrıca, mikro çelik lif içeren ikili lif kombinasyonunun olduğu karışımlar birbirleriyle kıyaslandığında, narinliği daha yüksek olan 13 mm boyunda mikro çelik lifin narinliği düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik life göre, karışımların eğilmede çekme dayanımı değerlerine daha olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu durum, daha uzun olan düz çelik liflerin, iç çatlakları köprülemede daha etkili rol oynamasına ve böylelikle çatlak gelişimini geciktirmesi ve engellemesine dayandırılabilir. Literatürde, kısa ve uzun çelik lif kullanılarak yapılan bazı çalışmalarda da (Sulthan vd., 2019; Kına, 2019; Yu vd., 2014; Rambo vd., 2014) benzer sonuç bulunmuştur.



Şekil 10. Karışımlara ait Eğilmede Çekme Dayanımı Değerleri (Flexural Tensile Strength Values of Mixtures)

3.3 Elektriksel Özdirenç ve Sıcaklık Artışı (Electrical Resistivity and Temperature Rise)

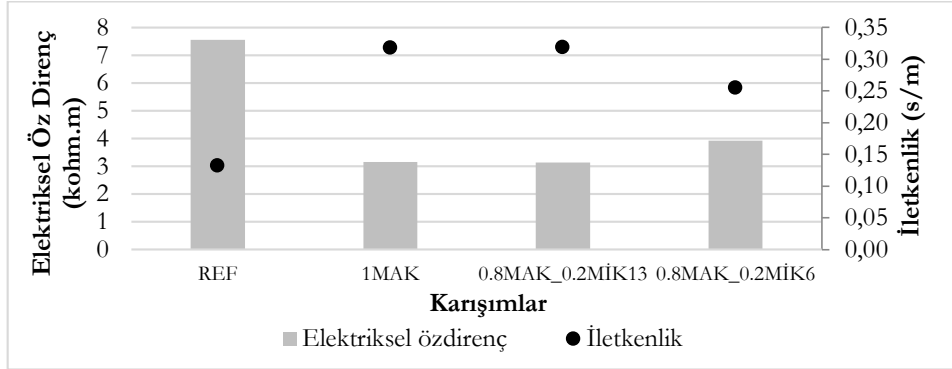
Tüm KYB karışımlarına ait numunelerin 60 volt sabit gerilim altındaki ölçülen akım değerleri esas alınarak hesaplanan elektriksel özdirenç ve iletkenlik ile sabit 220 volt gerilim altındaki numunelerin sıcaklık artışı değerlerine ait bulgular Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. 90 Günlük Tüm KYB Numunelerine ait Elektriksel Özdirenç, İletkenlik ve Sıcaklık Artışı Değerleri (Electrical Resistivity, Conductivity and Temperature Rise Values of all 90-Day SCC Samples)

| Karışım Kodu | I (amper) | R (ohm) | P (kohm.m) | C (s/m) | Sıcaklık Artışı Δt (°C) |
|-----------------|-----------|---------|------------|---------|---------------------------------|
| REFERANS | 0.003115 | 19261.6 | 7.564 | 0.132 | 1.33 |
| 1MAK | 0.00748 | 8021.4 | 3.150 | 0.317 | 4.30 |
| 0.8MAK_0.2MİK13 | 0.007505 | 7994.7 | 3.139 | 0.319 | 5.12 |
| 0.8MAK_0.2MİK6 | 0.005995 | 10008.3 | 3.930 | 0.254 | 1.89 |

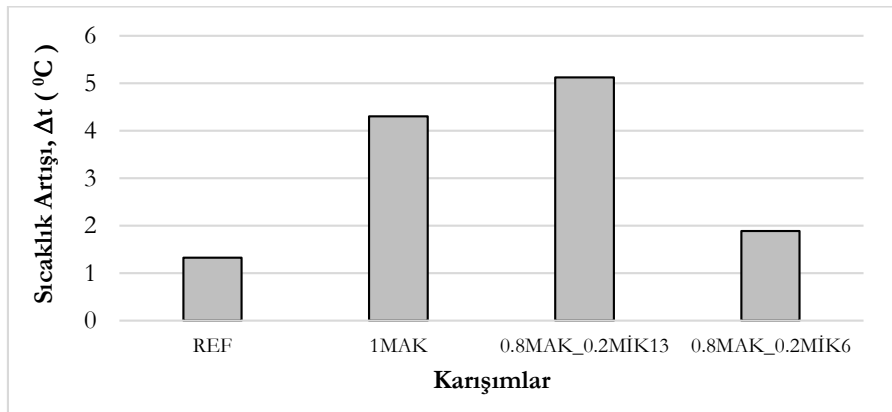
Tüm KYB numunelerine ait elektriksel özdirenç ve iletkenlik sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, betona lif takviyesiyle beraber numunelerin iletkenlik değerleri, liffsiz referans numunesine kıyasla %92 ile %140 arasında değişen oranlarda artışı görülmüş ve bunun bir sonucu olarak numunelerin elektriksel özdirenç değerlerinde ise %48 ile %59 arasında değişen oranlarda azalma olduğu tespit edilmiştir. Lifli KYB numuneler göz önünde bulundurulduğunda, 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli numuneler

ile sadece makro çelik lif içeren tek lif takviyeli numunelerin sırasıyla, 0.319 ve 0.317 s/m ile en yüksek iletkenlik ve dolayısıyla 3.139 ve 3.150 kohm.m en az elektriksel özdirenç değerlerine sahip olduğu görülürken, 6 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli numunenin 0.254 s/m en düşük iletkenliğe ve 3.930 kohm.m ile en yüksek elektriksel özdirence sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, toplamda hacimce %1 oranında çelik lif içeren KYB karışıma narinliği daha yüksek olan 13 mm boyunda mikro çelik lif ilave edilmesinin, narinliği daha düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik life kıyasla, betonun iletkenliği üzerinde oldukça önemli bir katkıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, karma lifli KYB numunelerin içerdiği daha uzun olan düz mikro çelik liflerin, Denklem 2.1'den de anlaşılacağı üzere, elektriksel özdirençlerinin daha düşük ve dolayısıyla iletkenlik ve ısınma gibi fiziksel özelliklerinin kısa düz mikro çelik liflere kıyasla, daha yüksek olmalarının yanında, makro çelik lifler ile etkileşiminin daha mümkün olduğu düşünülmektedir. Literatürde de bazı çalışmalarda (Cleven vd., 2021; Boğa, 2017) matrise takviye edilen liflerin elektriksel özdirençini düşürdüğü ve dolayısıyla iletkenliği arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 11. Numunelere ait İletkenlik Değerleri (Conductivity Values of Samples)

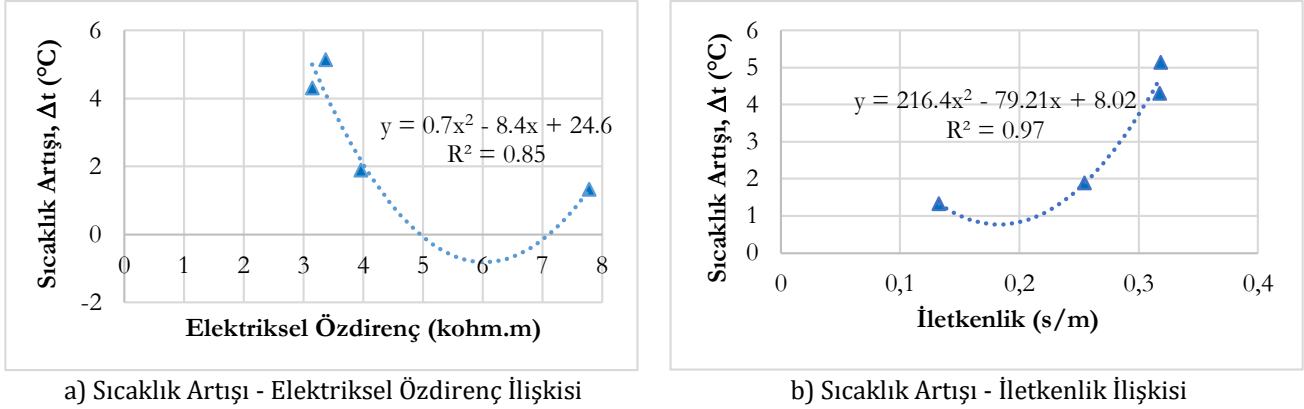
Tüm KYB numunelerinin sıcaklık artışını belirlemek amacıyla yapılan ısıtma deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir. Referans numunesine kıyasla, tüm lif takviyeli numunelerin %42 ile %288 arasında değişen oranlarda sıcaklık artışı sağladığı tespit edilmiştir. Tüm numunelere ait sonuçlar incelendiğinde, en yüksek sıcaklık artışının, narinliği en yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lifin yer aldığı karma lif takviyeli numunelerde olduğu belirlenirken, narinliği en düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinde en düşük sıcaklık artışı tespit edilmiştir. Bunun yanında, narinliği 65 olan sadece makro çelik lif içeren KYB numunelerinin sıcaklık artışı, narinliği 40 olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinkinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin basınç dayanımının diğer karışımlara kıyasla daha düşük olmasının, matris içerisine sürüklenen hava içeriğinin daha fazla olmasından kaynaklanabileceği ve dolayısıyla bu karışımlara ait numunelerin sıcaklık artışının da olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Sonuç olarak, lif takviyeli KYB karışımların sıcaklık artışında çelik lif narinliğinin çok önemli bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca daha uzun ve düz olan mikro çelik liflerin diğer lifler ile olan etkileşiminin daha iyi olması da sıcaklık artışında diğer bir önemli etken olduğu düşünülmektedir. Yehia ve Tuan, (2014) tarafından yapılan çalışmada, çelik lif takviyeli betonun mekanik ve elektriksel özdirenç özellikleri incelenmiştir. 305mm × 305mm × 50 mm boyutlarındaki döşeme numuneleri üzerinde 30 dakika boyunca 48 volt DC voltaj uygulanmış ve döşemelerin sıcaklığının -1.1 °C' den 15.6 °C' ye yükseldiği tespit edilmiştir.



Şekil 12. Numunelere ait Sıcaklık Artışı Değerleri (Temperature Increase Values of the Samples)

3.3.1 Numunelerin Elektriksel Özdirençlerinin İletkenlik ve Sıcaklık Artışı Arasındaki İlişki Analizi (Relationship Analysis of Electrical Resistivity of Samples Between Conductivity and Temperature Increase)

Tüm KYB numunelerine ait sıcaklık artışı - elektriksel özdirenç ve sıcaklık artışı - iletkenlik arasındaki ilişki analizi Şekil 13'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, KYB numunelerinin sıcaklık artışı - elektriksel özdirenç ve sıcaklık artışı - iletkenlik ilişkisi arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla, $R^2=0.85$ ve $R^2=0.97$ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, elde edilen R^2 korelasyon değerleri, KYB numunelerinin sıcaklık artışı ile hem elektriksel özdirenç hem de iletkenlik arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ayrıca çelik lif takviyeli numunelere ait sıcaklık artışı değerinin, iletkenlik değerleri kullanılarak oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin edilebileceği görülmektedir.



Şekil 13. Tüm KYB numunelerinin; a) Sıcaklık Artışı - Elektriksel Özdirenç İlişkisi b) Sıcaklık Artışı - İletkenlik İlişkisi (All KYB samples; a) Temperature Increase - Electrical Resistivity Relation b) Temperature Increase - Conductivity Relation)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Lifsiz referans ile iki ucu kancalı uzun makro ve düz kısa mikro çelik liflerin tekli veya karma lifli olarak tasarlandığı KYB karışımlarına ait taze ve sertleşmiş özelliklerin belirlenmesi ile ilgili deneylerden elde edilen bulgular esas alındığından aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Lifsiz referans karışımına kıyasla, karışıma lif ilave edilmesi hem tekli hem de karma lif kombinasyonuna sahip karışımların çökme-yayılma çapında azalmaya, J-halkası yükseklik farkı (ΔH) ve yayılma süresi (t_{500}) değerlerinde ise artışa neden olmuştur. Ayrıca karma lif takviyeli tasarlanan karışımlara bakıldığında, narinliği düşük olan 6 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karışımların akıcılığı ile engeller arasından geçme kabiliyetinin, narinliği yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karışımlara kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
- Karışıma farklı boyut ve narinlikteki çelik liflerin ilave edilmesi genelde basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında artış sağladığı tespit edilmiştir. Tüm lifli karışımlar içerisinde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımlarında en fazla artış, narinliği yüksek olan 13 mm boyundaki mikro lif içeren karma lifli KYB numunelerinde görülürken, eğilmede çekme dayanımında ise en fazla artışın sadece makro çelik lif içeren karışımda olduğu tespit edilmiştir.
- Sadece makro çelik lif içeren tek lifli KYB numunelerinin elektriksel özdirenci, narinliği düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli KYB numunelerine kıyasla daha düşük iken iletkenlik ve sıcaklık artışının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Yüksek narinliğe sahip 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli KYB numunelerinden en düşük elektriksel özdirenç ve en yüksek iletkenlik ile sıcaklık artışı elde edilebildiği tespit edilmiştir.
- Narinliği en yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli numunelerin en yüksek ve narinliği en düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinin ise en düşük sıcaklık artışına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, narinliği 65 olan makro çelik lif içeren tek lifli KYB numunelerinin sıcaklık artışı, narinliği 40 olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur.
- Sıcaklık artışı ile elektriksel özdirenç ve iletkenlik arasında sırasıyla, $R^2=0,85$ ve $R^2=0,97$ değerleri bulunmuştur. Dolayısıyla, çelik lif takviyeli numunelere ait sıcaklık artışı değerinin, iletkenlik değerleri kullanılarak oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında, KYB içerisine takviye edilen farklı boyut ve narinlikteki çelik liflerin betonun elektriksel özdirencinde azalma, iletkenlik ve sıcaklık artışında ise artış sağlamıştır. Çimento esaslı kompozite lif

takviye edilmesiyle birlikte betona kazandırılan bu özellikler sayesinde yürüyüş yolları, karayolları, havaalanı pistleri gibi alanlarda soğuk kış mevsimlerinde oluşan kar birikimleri ve buzlanmanın insan yaşamını olumsuz etkileyen sorunlarına çözüm sunabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimine verdiği finansal destekten dolayı minnettarız. (Proje numarası: FYL-2020-2148)

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Akçay B., 2012. Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Composites: Part B*, 43, 766-78.
- Aslani, F., Hamidi, F., Valizadeh, A., & Dang, A. T. N., 2020. High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 232, 117230.
- ASTM C1609. 2012. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39. 2018. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C496/C496M-17. 2017. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Balaguru, P., Narahar, R., Patel, M., 1992. Flexural toughness of steel fibre reinforced concrete. *ACI Mater J*, 89(6), 541-6
- Bentur, A, Mindess, S., 1990. *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London.
- Bertolini, L, Bolzoni, F, Pastore, T. and Pedferri, P., 2004. Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 681-694.
- BOĞA, A. R, 2017. Harçların mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine karbon lifi ve çelikhane cürufu kullanımının etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1066-1075.
- Bunsell, A.R., 1988. *Fiber Reinforcement for Composite Materials*. Vol:2 Composite Materials Series, Elseiver Science, The Netherlands.
- Chen, C.T., J.-J. Chang, W.C. Yeh, 2014. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 2014. 71: p. 35-4.
- Chung, D.D.L., 2004. Electrically conductive cement-based materials. *Advanced in Cement Research*, 26(4), 167-176.
- Das, B, Pandey S., 2011. Influence of fineness of fly ash on the carbonation and electrical conductivity of concrete. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 23(9), 1365-1368.
- EFNARC., 2005. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Eur. Guidel. Self Compact. Concr.
- F. Sulthan, Saloma, 2019. Influence of hooked-end steel fibers on fresh and hardened properties of steel fiber reinforcement self-compacting concrete (SFRSCC). *J. Phys.: Conf. Ser.* 1198(3) 032005.
- García A, Schlangen E, Ven M. And Liu Q., 2009. Electrical Conductivity Of Asphalt Mortar Containing Conductive Fibers And Fillers. *Construction And Building Materials*, 23, 3175-3181.
- Gopalakrishnan, K, Ceylan, H, Kim, S, Yang, S. And Abdulla, H., 2015. Electrically Conductive Mortar Characterization For Self Heating Airfield Concrete Pavement Mix Design. *International Journal Of Pavement Research And Technology*, 8(5), 315-324.
- Hannant, D. J., 1987. *Fiber cements and fiber concrete*. Chichester, UK, Wiley.
- Huang, B.S, Chen, X.W. And Shu, X., 2009. Effects of electrically conductive additives laboratory-measured properties of asphalt mixtures. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 21(10), 612-617.
- Kına, C., 2019. Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Liu, X., Wu, T., Yang, X., & Wei, H., 2019. Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 226, 388-398.
- Mobasher B, Li Cheng Y., 1996. Mechanical properties of hybrid cement based composites. *American Concrete Institute Materials Journal*, 93(3), 284-92, 1996.
- Nanni, A., 1988. Splitting-tension test for fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*. 85(4), 229-33.
- Okamura & Quchi, 1999. *Self-Compacting Concrete* (pp 3-14). Development Present Use and Future. Proceedings of the First International RILEM Symposium. Edited by A. Skarendahland.
- Pan, P, Wu, S, Xiao, F, Pang, L. And Xiao, Y., 2015, Conductive Asphalt Concrete: A Review On Structure Design, Performance, And Practical Applications. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, 26(7), 755-769.
- Polder, R.B., 2001. Test Methods For On Site Measurement Of Resistivity Of Concrete. A RILEM TC - 154 Technical Recommendation, *Construction And Building Materials*, 15, 125-131.
- Rambo, D. A. S., Silva, F. D. A., Filho, R. D. T., 2014. Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects. *Materials & Design*, 54, 32-42.
- Rossi P., 1997. High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): the LCPC experience. *Materials Journal*, 94:6, 478- 783.

- Rossi P., Acker P. & Malier Y., 1987. Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Mater Struct.*, 20, 436-9.
- S. Cleven , M. Raupach, T. Matschei, 2021. Electrical Resistivity of Steel Fibre-Reinforced Concrete Influencing Parameter. *Materials* 2021, 14, 3408.
- S. Kwon, T. Nishiwaki, T. Kikuta, H. Mihashi, 2014. Development of ultra-high performance hybrid fiber-reinforced cement-based composites. *ACI Mater. J.* 111 (3) 309-318.
- S. Teng, V. Afroughsabet, C.P. Ostertag, 2018. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 182 504-515.
- S.G. Nehme, R. László, A.E. Mir., 2017. Mechanical performance of steel fiber reinforced self-compacting concrete in panels, *Procedia Eng.* 196 90-96.
- Sabbağ, N. & Uyanık, O., 2020. Özdirenç yöntemi kullanılarak donatılı betonların anizotropisinin belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 26 (3) , 572-580.
- Song, P. S., & Hwang, S., 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- Tabatabaeian, M., Khaloo A., Joshaghani A., Hajibandeh, E., 2017. Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. *Construction and Building Materials*, 147, 497-509
- Tian, X. & Hu, H., 2012. Test and Study on Electrical Property of Conductive Concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 5(2011), 83-87.
- Tuan, C.Y., 2004. *Conductive Concrete for Bridge Deck Deicing and Anti-icing*, Project No. SPR-PL-1(037) P512, Nebraska Department of Roads, July.
- Tumidajski P.J., 1997. Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(4), 529-534.
- Turk K., Bassurucu M. and Bitkin RE., 2021. Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Construction and Building Materials*, 266, Part A, (10 January 2020), 120944, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120944>.
- Turk K., Kina C. and Oztekin E., 2020. Effect of macro and micro fiber volume on the flexural performance of hybrid fiber reinforced SCC. *Advances in Concrete Construction*, 10(3), pp. 257-269. DOI: 10.12989/acc.2020.10.3.257
- Turk, K., Oztekin, E., & Kina, C., 2019. Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 0(0), 1-14.
- Uygunoğlu, T., topçu, İ.B., şimşek, B., çinar, E., 2018. Kendiliğinden Yerleşen Harçların Elektriksel Özdirenç Üzerine Mineral Katkıların Etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt 22, Sayı 2*, 986-992.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26:1, (2001) 303-329.
- Yehia, S. and C.Y. Tuan, 1999. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *Materials Journal*, 1999. 96(3): p. 382-390.



TEK EKLEMLİ ESNEK ROBOT KOLUNUN SIRALI KONTROL İLE DENETLENMESİ

H. Ali ERTAŞ^{1*}, Onur ÖRNEK²

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

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sıralı Kontrol,
Giriş Şekillendirme,
PID Kontrol,
Hibrit Kontrol.

Öz

Mekanik sistemler çalışmaları esnasında titreşimlere ve bozucu etkilere maruz kalırlar. Bu etkilerden kurtulmak için çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Sıralı kontrol, PID kontrol ve giriş şekillendirmeyi bir araya getiren bir kontrol yöntemidir. Temelinde giriş şekillendirme kullanarak sistemin hızlı ve titreşimsiz bir şekilde istenen referans değerine ulaşması sağlandıktan sonra, anahtarlama yardımıyla PID kontrole geçilerek sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklı olmasını sağlamak yatar. Sıralı kontrol, PID kontrol ve giriş şekillendirmeyi optimum zamanlarda kullandığı için, her iki kontrol yönteminin avantajlarından faydalanırken, dezavantajlarından kurtulmayı amaçlar. Sıralı kontrolün, doğru uygulandığında, her iki kontrol yönteminin birlikte kullanıldığı hibrit kontrol yöntemlerinden avantajlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada tek eklemlili esnek robotun transfer fonksiyonu MATLAB-Simulink ortamında modellenmiştir. Modellenen sisteme sırasıyla basamak giriş, giriş şekillendirme, PID kontrol ve sıralı kontrol uygulanarak sistem yanıtları elde edilmiş, çıkışlar performans açısından karşılaştırılarak sistem performansının iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

CONTROL OF A SINGLE LINK FLEXIBLE MANIPULATOR USING SEQUENCED CONTROL

Keywords

Sequenced Control,
Input Shaping,
PID Control,
Hybrid Control.

Abstract

Mechanical systems are subject to various vibrations and disturbances while working. To get rid of such effects certain control systems have been developed. Sequenced control is a technique that utilizes both PID control and input shaping. It uses input shaping to have the system reach the reference point quickly and without causing vibrations and then switches to PID control to allow the system to be protected against disturbances. Because sequenced control uses PID control and input shaping at optimum times it aims to make use of both of their advantages while negating their disadvantages. When done properly, it's proven to produce better results than the hybrid control techniques which use both input shaping and PID control together. In this study, transfer function of a single link flexible manipulator has been put into a Simulink Model and it has been subjected to step input, zero vibration input shaping, PID control and sequenced control and the system outputs has been compared. Suggestions have been provided to further improve system performance.

Alıntı / Cite

Ertas, H., Örnek, O., (2022). Tek Eklemlili Esnek Robot Kolunun Sıralı Kontrolle Denetlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 495-503.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. A. Ertas, 0000-0002-8788-9011
O. Örnek, 0000-0002-9879-0674

Makale Süreci / Article Process

| | |
|----------------------------------|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 06.07.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 04.01.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 16.01.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

* İlgili yazar / Corresponding author: ertas@cumhuriyet.edu.tr, +90-346-219-1010 (1320)

1. Giriş (Introduction)

Dinamik sistemleri kontrol etmek için uygulanan kuvvetler çeşitli titreşimlere sebep olur. Bu titreşimlerin ve sisteme sonradan etki edecek olası bozucu etkilerin yok edilmesi için çeşitli kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kontrol sistemlerini genel olarak açık çevrim, kapalı çevrim ve her iki yöntemin birleşimi olan hibrit kontrol sistemleri olarak üç ana grupta toplamak mümkündür.

Açık çevrim kontrol yöntemleri sistemin doğru bir şekilde matematiksel modellenmesi ve istenen çıkış için doğru girişin hesaplarak sisteme uygulanması temeline dayanır. Genel olarak, istenen çıkışı çok hızlı bir şekilde üretmelerine rağmen, modelleme hataları ve bozucu etkilere karşı tamamen savunmasızlardır. Giriş şekillendirme bu açık çevrim kontrol tekniklerinden bir tanesidir ve temelinde sisteme uygulanacak olan giriş sinyalinin dolaylı olarak oluşacak olan titreşimlerin, giriş sinyalinin parçalara ayrılarak uygulanmasıyla kendi kendine yok edilmesi esasına dayanır.

Kapalı çevrim kontrol yöntemlerine bakıldığında, temelinde sistemin istenen bir referans değerine ulaştırılmak için bir kontrol sinyaliyle uyarılması ve sistem çıkışının sensörler aracılığıyla sürekli olarak gözlenerek olası hataların yeni kontrol sinyalleriyle düzeltilmesi yatar. PID kontrol, üzerinde uzun yıllar çalışılmış ve yaygın kullanıma sahip en bilinen kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden biridir. Açık çevrim kontrol yöntemlerine göre doğası gereği daha yavaş cevap vermesine rağmen sistemi olası bozucu etkilere karşı dayanıklı hale getirmesi göz ardı edilemeyecek kadar önemli bir avantajdır.

Hibrit kontrol yöntemleri açık ve kapalı çevrim kontrol tekniklerini çeşitli şekillerde bir araya getirerek her ikisinin de avantajlı yönlerinden yararlanmayı amaçlar. Hibrit kontrol yöntemlerinden bazıları bu iki kontrol sistemini sürekli olarak birlikte kullanırken, bazıları sırayla ya da gerekli olduğu zamanlarda anahtarlama yöntemiyle devreye alarak kullanma temeline dayanır. Sıralı kontrol, Örnek ve Ertaş'ın (2020) çalışmasında öne sürdüğü, açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin sırayla kullanılmasına dayanan bir kontrol yöntemidir. Temelinde bir anahtar yardımıyla her iki kontrol yönteminin de yalnızca en avantajlı olduğu zamanlarda devreye alınarak hem kapalı çevrim kontrol yöntemlerine göre daha hızlı, hem de açık çevrim kontrol yöntemlerinin aksine bozucu etkilere dayanıklı bir sistem elde etmek yatar.

Tek eklemlili esnek robot kolu nonlineer titreşimlere sebep olması nedeniyle üzerinde çok farklı yöntemler denenilen bir kontrol problemi. Bu çalışmada tek eksenli esnek robot kolu Simulink üzerinde modellenerek üzerinde giriş şekillendirme, PID kontrol ve sıralı kontrol yöntemleri denenerek çıkış performansları incelenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bu konu hakkındaki bilimsel çalışmaları üç ana başlıkta toplamak mümkündür: Giriş şekillendirme hakkında yapılan çalışmalar, PID kontrol ve diğer kapalı çevrim kontrol yöntemleri hakkında yapılan çalışmalar ve her iki yöntemin bir araya getirildiği hibrit kontrol sistemleri hakkında yapılan çalışmalar. Yapılan literatür taramasında her bir yöntemdeki temel ilkeler ve güncel gelişmeler incelenerek çalışmaya yön verilmiştir.

Singhose ve Singh (2002) çalışmasında giriş şekillendirme tekniğinin temellerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Ünsal ve Gürleyük (2012) herhangi bir sistem için gerçek zamanlı giriş şekillendirici tasarımı yapılırken atılması gereken adımları detaylı bir şekilde göstermiştir. Ramon ve Comin (2018) Simulink üzerinde farklı giriş şekillendirme tekniklerinin endüstriyel testini yapmış, farklı yöntemlerin performanslarını karşılaştırmıştır. Parman vd. (2020) esnek uzay araçlarının hareketlerinin iki sabit genlikli giriş şekillendirme darbesiyle kontrol edilebileceğini göstermiştir. Duc La ve Kien Trong (2019) yük taşıyan crane sisteminde giriş şekillendirme ve radyal yayı bir arada kullanarak sistem titreşimlerinin azaltılabileceğini kanıtlamış, sistem performansını yalnızca yay ve yalnızca giriş şekillendirme kullanılan sistemlerle karşılaştırmıştır. Ertaş (1995) doktora tezinde, robotik bir sistemde esnek manipülatörler kullanıldığında, robot kolunun esnekliğinden dolayı oluşan titreşimlerin çıkışa olan negatif etkilerini ve çıkışta oluşan sapsmaları incelemiştir. Yavuz ve Kapucu (2012) esnek sistemlerin kontrolünde titreşimleri azaltmak için hibrit giriş şekillendirme teknikleri kullanmıştır. Thomsen ve Soe-Knudsen (2021) endüstriyel robot kollarında titreşimleri azaltmak için çok modlu zamana göre değişen giriş şekillendirme tekniklerinin kullanılabileceğini göstermiştir.

Tumari vd. (2013) köprülü vinç sistemlerinde salınımların azaltılması için PID ve hibrit giriş şekillendirme tekniklerinin birlikte kullanılabileceğini göstermiştir. Oliveira vd. (2018) çalışmasında belirsiz (öngörülemez) titreşimlere sahip sistemlerin kontrolünde PID posicast yöntemini kullanmıştır. Bu yöntemde sisteme uygulanan giriş öncelikle giriş şekillendirici tarafından şekillendirilip PID kontrolöre gönderilmektedir. Bu kontrol yöntemine genel olarak closed loop input shaping de denilmektedir. Huey (2006) doktora tezinde PID kontrol ve giriş

şekillendirmenin akıllı bir şekilde bir araya getirilmesi için farklı çözüm önerilerinde bulunmuştur. Bu önerilerin içinde giriş şekillendirmenin PID kontrol geri besleme döngüsünün içinde ve dışında olduğu çeşitli teknikler bulunmaktadır. Her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Oliveira ve Vrancic (2012) çalışmasında eksik sönümlü (underdamped) sistemlerde giriş şekillendirme ve PID kontrolün sırayla kullanılarak sistemden daha iyi bir performans alınabileceğini öne sürmüştür. Örnek ve Ertaş (2020) esnek sistemlerin kontrolünde PID kontrol ve giriş şekillendirmeyi sırayla kullanarak her ikisinin de avantajlarını barındırıp dezavantajlarından kurtulan sıralı kontrol yönteminin matematiksel temellerini atmıştır, tetikleme mekanizmasının akıllı hale getirilmesi sağlandığında, sıralı kontrol yönteminin her iki kontrol yönteminden daha avantajlı olacağını göstermiştir. Örnek ve Ertaş (2020)'ın çalışmasında giriş şekillendirmenin PID kontrole göre daha hızlı yanıt verdiği, ancak bozucu etkilere karşı savunmasız olduğu görülmüş, bu iki kontrol sistemini sıralı bir şekilde bir araya getirerek hem PID kontrolden daha hızlı hem de giriş şekillendirmenin aksine bozucu etkilere dayanıklı bir kontrol yönteminin geliştirilebileceği gösterilmiştir.

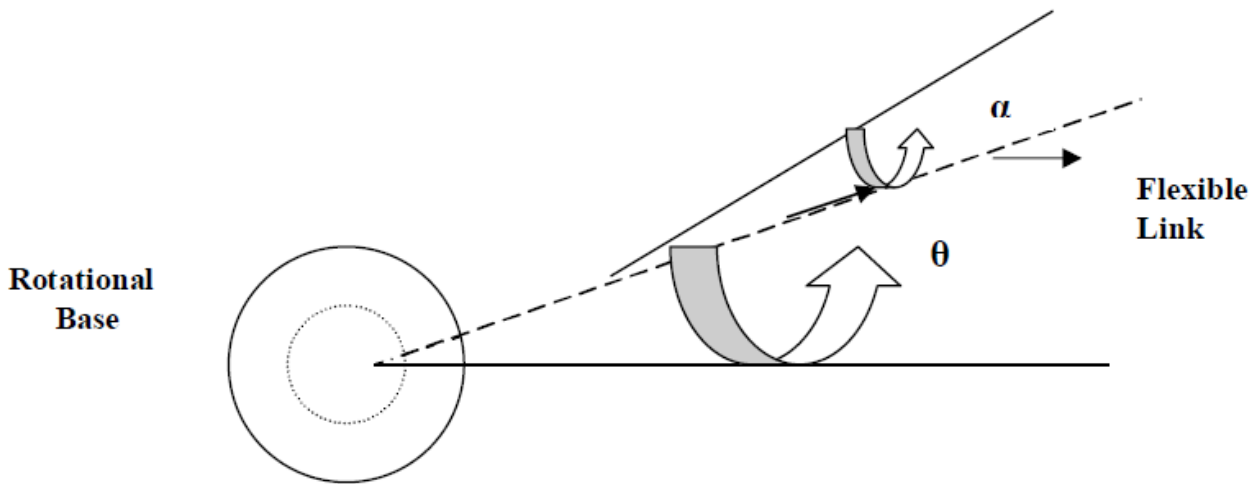
Yapılan literatür taramasında esnek robot kollarının kontrolünde sıralı kontrol ya da benzerlerinin kullanıldığına rastlanmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada Örnek ve Ertaş (2020)'ın öne sürdüğü sıralı kontrol sistemi, esnekliği ve nonlineer davranışları sebebiyle kontrolü oldukça zor olan tek eklemlili esnek robot koluna uygulanarak sistemin performansı incelenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada tek eklemlili esnek robot kolunun transfer fonksiyonu MATLAB-Simulink ortamına aktarılmıştır. Elde edilen sisteme sırasıyla basamak giriş, sıfır titreşim giriş şekillendirme (Zero vibration input shaping), PID kontrol ve sıralı kontrol uygulanarak çıkışları elde edilmiştir. Farklı kontrol yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları incelenerek, sistem performansının geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Tek eklemlili esnek robot kolunun matematiksel modelinin ve transfer fonksiyonunun elde edilmesinde Rana ve Deepika (2014)'nin çalışmasından yararlanılmıştır. Sistemin Şekil 1 (Rana ve Deepika)'de verildiği gibi serbest cisim diyagramı elde edildiğinde θ açısı radyan cinsinden motor açısını, α ise yine radyan cinsinden esnek koldaki bükülme açısını ifade etmektedir.



Şekil 1. Tek eklemlili esnek robot kolu (Single link flexible manipulator)

Eşitlik (1) Rana ve Deepika (2014)'de sistemin giriş gerilimi ve θ açısına bağlı transfer fonksiyonu, Tablo 1'de ise sistemin temel parametreleri verilmiştir. Sistemin kinematik denklemleri, potansiyel ve kinetik enerji ifadeleri, Lagrange denklemleri ve transfer fonksiyonunun detaylı bir şekilde elde edilmesinin anlatımı için Rana ve Deepika (2014)'nin çalışmasına göz atılabilir. Bu çalışmada Rana ve Deepika (2014) elde ettiği transfer fonksiyonu temel alınarak farklı kontrol yöntemlerinin çıkış performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

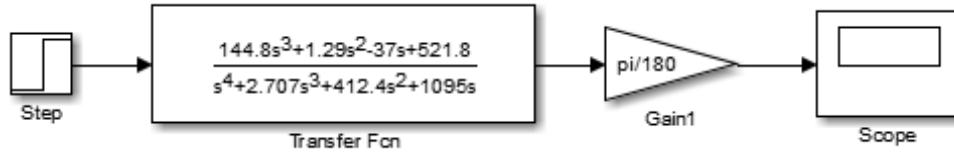
$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_m} = \frac{144.8s^3 + 1.29s^2 - 37.0s + 521.8}{s^4 + 2.707s^3 + 412.4s^2 + 1095s} \quad (1)$$

Tablo 1. Tek eklemli esnek robot kolunun parametreleri (Parameters of single link flexible manipulator)

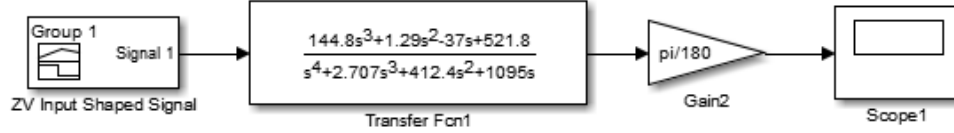
| | |
|--|---|
| Esnek kolun kütlesi, $m = 0.065$ kg | Esnek kolun uzunluğu, $L = 0.3$ m |
| Uç işlevcisi kol uzunluğu sapması, $d = \alpha \cdot L$ | Armatür direnci, $R_m = 2.6 \Omega$ |
| Yüklü durumda eylemsizlik momenti eşleniği, $J_{eq} = 0.099$ kg.m ² | Eklem eylemsizlik momenti, $J_{arm} = 0.00195$ kg.m ² |
| Viskoz sönümlenme katsayısı eşleniği, $B_{eq} = 1.99$ | Dişli kutusu verimi, $\eta_m = 0.69$ |
| Motor verimi, $\eta_m = 0.69$ | Motor tork katsayısı, $K_t = 0.00767$ |
| Geri e.m.f. tork sabiti, $K_m = 0.00767$ | Dişli oranı, $K_g = 70$ |
| Eklem doğal frekansı, $f_c = 3.2$ kHz | Eklem sertlik katsayısı, $K_{stiff} = 2 \llbracket f_c \cdot J_{arm}$ |
| Armatür giriş gerilimi = V_m | |

3.2. Basamak Giriş Ve Giriş Şekillendirme Cevapları (Step Response And Input Shaping Response)

Transfer fonksiyonu elde edilen sistem MATLAB-Simulink üzerinde modellenerek sisteme sırasıyla basamak giriş (Step input) ve sıfır titreşim giriş şekillendirme (Zero vibration input shaping) uygulanmıştır. Şekil 2'de basamak giriş uygulanan sistem Şekil 3'te giriş şekillendirme uygulanmış sistem gösterilmiştir. Sistemdeki kazanç (gain) blokları çıkışın radyandan dereceye çevrilmesi için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar bölümünde sisteme uygulanan step ve sıfır titreşim giriş şekillendirme sinyalleri gösterilmiş, sistemin çıktıları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



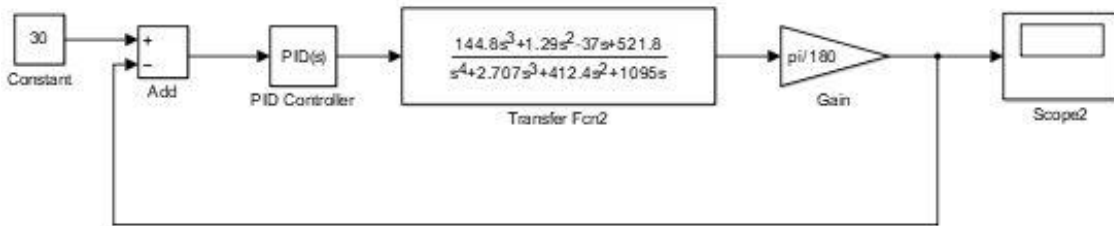
Şekil 2. Basamak giriş uygulanan sistemin Simulink modeli (Simulink model of the system with step input)



Şekil 3. Giriş şekillendirme uygulanan sistemin Simulink modeli (Simulink model of input shaped system)

3.3. PID Kontrol Cevabı (PID Control Response)

Bu bölümde sisteme PID kontrol uygulanmıştır. Referans değeri olarak 30 derece seçilmiştir. PID parametre seçiminde kontrolörün sisteme uyguladığı giriş gerilimine dikkat edilmiştir. 200V'a kadar dayanıklı DC motor kullanılacağı kabulüyle seçim yapılmıştır. Yaklaşık olarak 1 derece/saniye hıza yakın değerler tercih edilmiş ve kontrol esnasında 200V üzerinde sistem girişinin uygulanmamasına dikkat edilmiştir. Şekil 4'te PID kontrollü sistemin Simulink modeli gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar bölümünde sisteme uygulanan giriş sinyali ve sistemin PID kontrol çıkışı incelenmiştir.

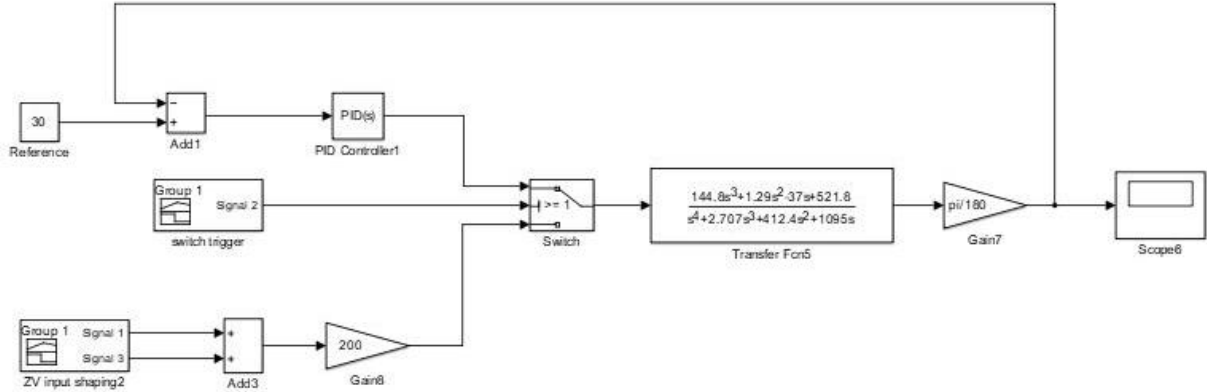


Şekil 4. PID kontrollü sistemin Simulink modeli (Simulink model of PID controlled system)

3.4. Sıralı Kontrol Cevabı (Sequenced Control Response)

Bu bölümde sisteme PID kontrol ve giriş şekillendirmenin sırayla kullanıldığı sıralı kontrol uygulanmıştır. Sistemin en az salınım ve aşım ile 30 dereceye gelerek sabitlenmesi amaçlanmaktadır. Öncelikle sisteme sıfır titreşim giriş

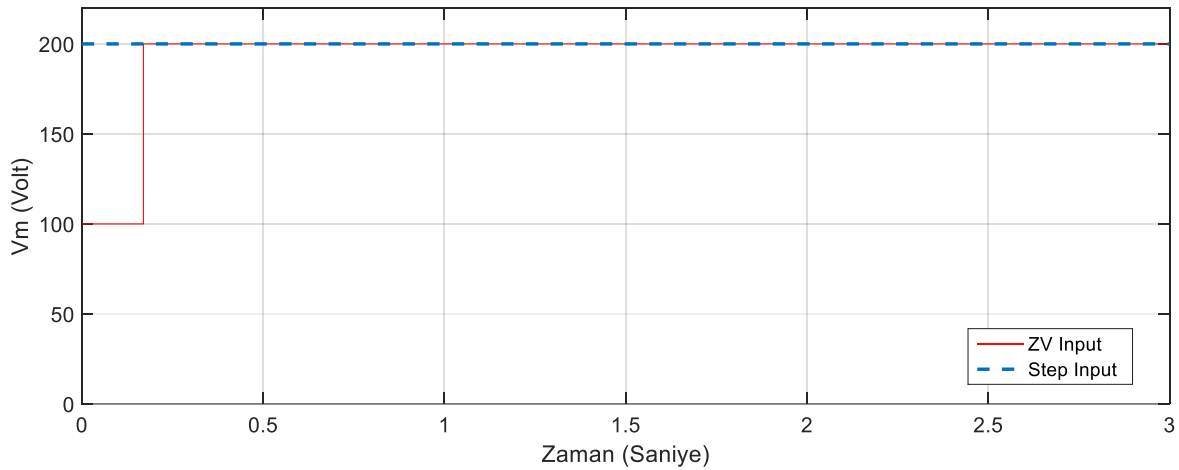
şekillendirme sinyali uygulanmıştır. Sistem 30 dereceye yaklaştığında yine giriş şekillendirilmiş “Dur” sinyali uygulanmıştır. Sistemin hızı bilindiğinden giriş şekillendirme işleminin hemen sonrasında Şekil 5’te görülen “Switch trigger” isimli sinyal üretici ile anahtar tetiklenerek ve PID kontrolör devreye alınmıştır. Bu sayede hızlı ve minimum titreşimle istenen dereceye oturtulan sistemde kalan titreşimlerin sıfırlanması, sistemin 30 dereceye oturtulması ve olası bozucu etkilere karşı dayanıklı olması amaçlanmıştır. Şekil 5’te sistemin Simulink modeli, deneysel sonuçlar bölümünde ise sisteme uygulanan giriş sinyali ve sistem çıkışları verilmiştir.



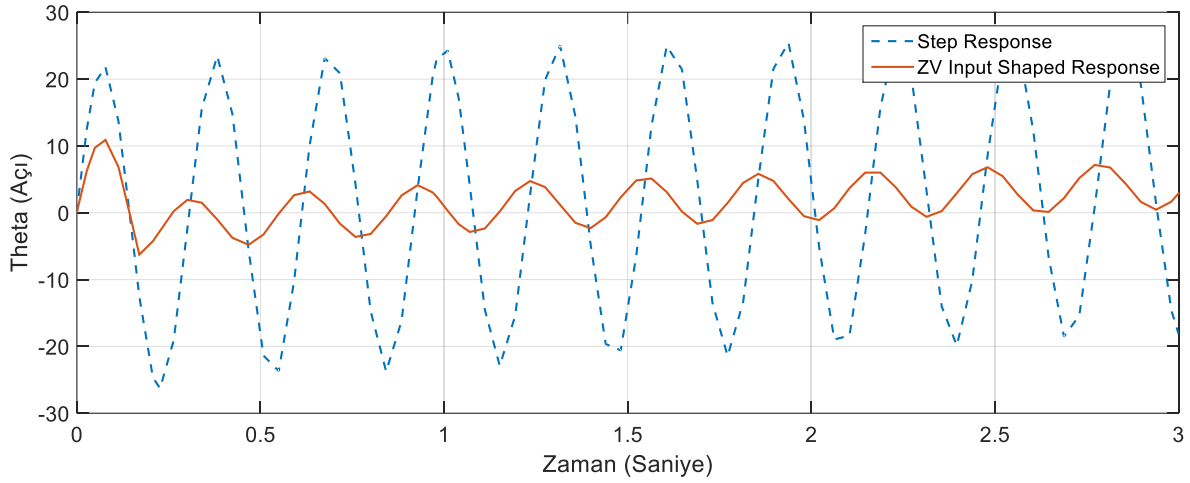
Şekil 5. Sıralı kontrol uygulanmış sistemin Simulink modeli (Simulink model of sequenced controlled system)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Sisteme öncelikle basamak giriş uygulanarak çıkışı elde edilmiş, ardından sıfır titreşim giriş şekillendirme (Zero vibration input shaping) uygulanmıştır. Her iki durum için sisteme uygulanan girişler Şekil 6’da, elde edilen çıkışlar Şekil 7’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde giriş şekillendirmenin çıkış titreşimlerini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu bakımdan giriş şekillendirmenin basamak girişe göre avantajlarının olduğunu söylemek mümkündür. Sisteme giriş şekillendirme uygulamak için gerekli matematiksel altyapı Singhose ve Singh (2002)’in çalışmasında detaylı bir şekilde incelenmiştir.

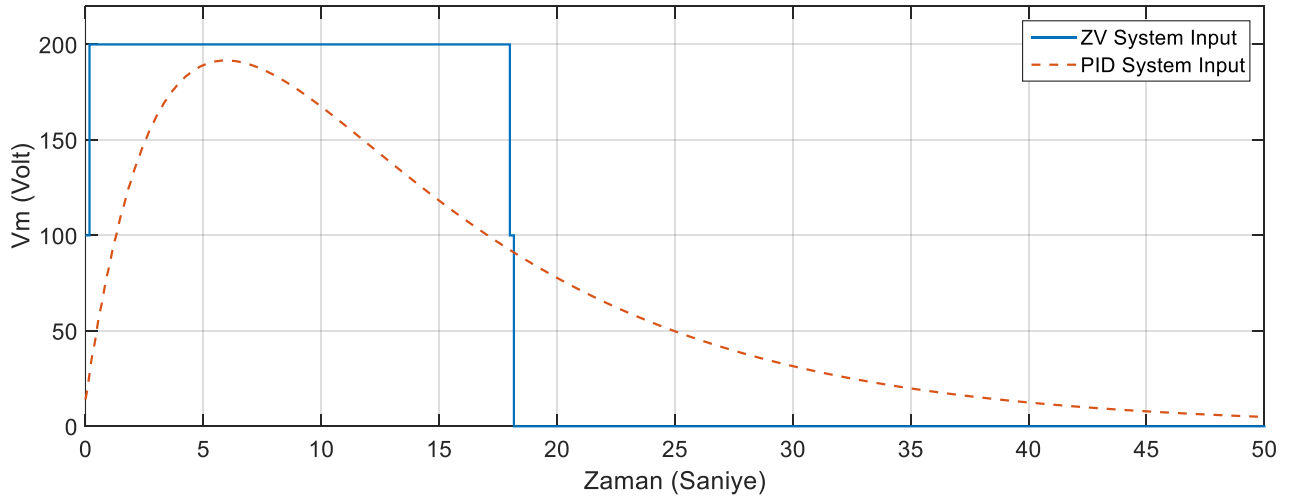


Şekil 6. Basamak giriş ve giriş şekillendirme uygulanan sistemler için giriş gerilimleri (Input voltages of the system for step input and input shaped systems)

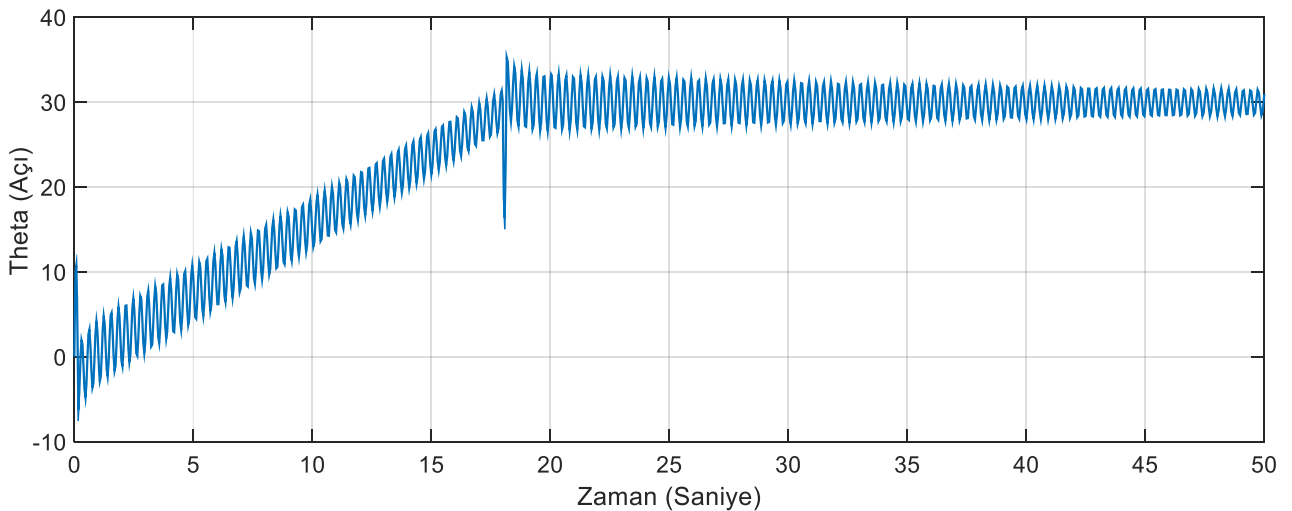


Şekil 7. Basamak giriş ve giriş şekillendirme uygulanan sistemler için çıkış sinyalleri (Output signals for step input and input shaped systems)

Ardından sisteme yalnızca giriş şekillendirme uygulanarak sistemin 30 derecede durması amaçlanmıştır. Şekil 3'te Simulink görünümü verilen ve giriş şekillendirme ile denetlenen sisteme uygulanan giriş sinyali Şekil 8'de düz çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 9'da ise aynı sistemin çıkış grafiği verilmiştir. Sistemin 18 saniye civarında 30 dereceye yaklaştığı ve sonra uygulanan "Dur" komutuyla birlikte 30 derece civarında sönümlü salınımlı bir hareket yaptığı görülmüştür.



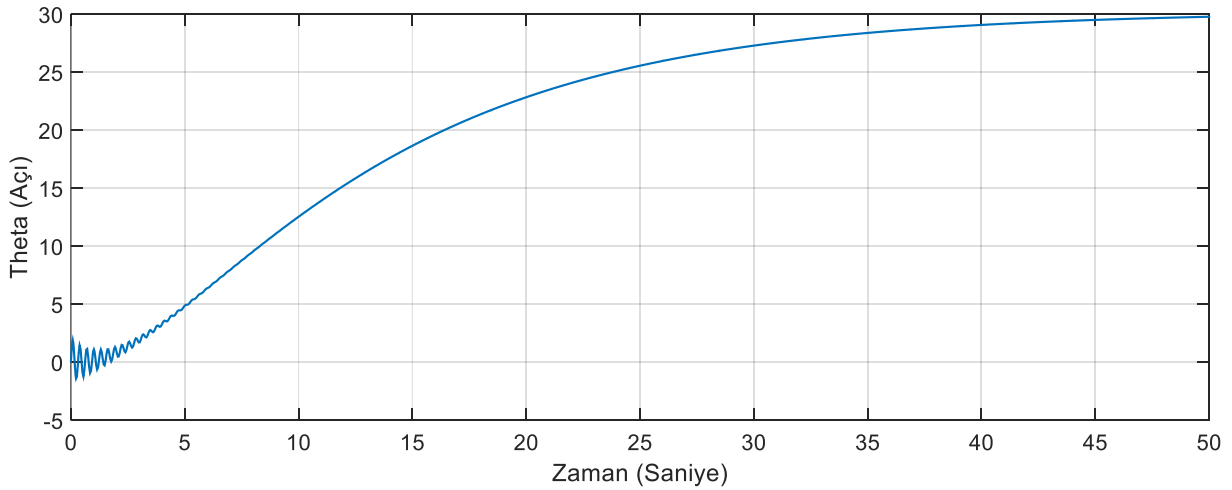
Şekil 8. 30 derecede durdurulmak istenen sistemlere uygulanan giriş şekillendirme ve PID kontrol giriş gerilimleri (Input voltages for PID controlled and input shaped systems with 30 degrees reference points)



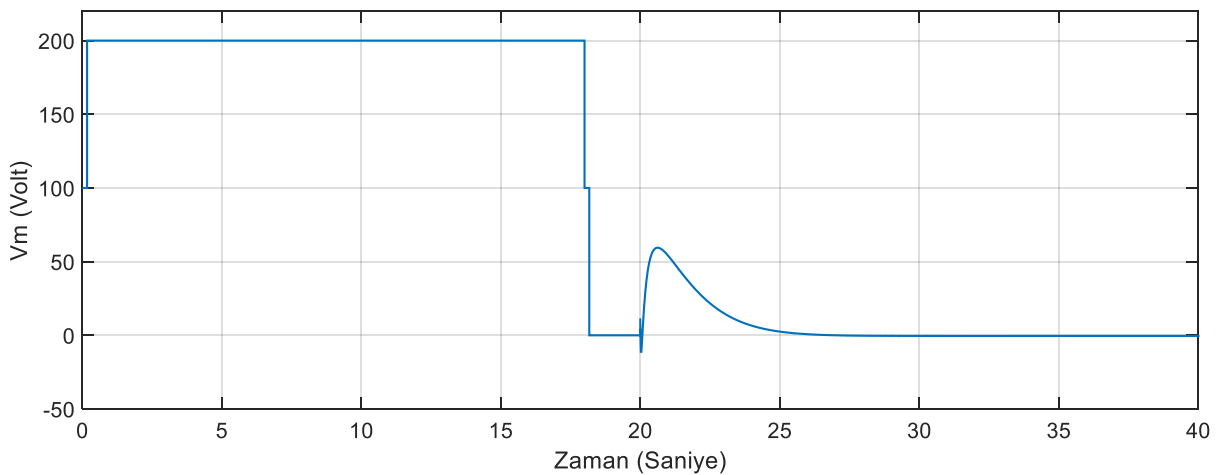
Şekil 9. Giriş şekillendirme ile 30 derecede durdurulmak istenen sistem için çıkış (Output signal for input shaped system with 30 degrees reference point)

PID kontrol uygulanarak 30 derecede durdurulmak istenen sistemin Simulink modeli Şekil 4'te verilmiştir. Sisteme uygulanan giriş sinyali Şekil 8'de kesikli çizgilerle gösterilmiş, sistem çıkışı ise Şekil 10'da verilmiştir. Sistemin oturma zamanının 50 saniye olduğu görülmektedir. Sistem giriş şekillendirmeye göre oldukça yavaş hareket etmektedir, ancak karşılaşılan titreşimler çok daha küçüktür. PID parametreleri değiştirilerek sistemin daha hızlı hareket etmesi, daha kısıda istenen referans değerine oturması sağlanabilir. Ancak bu çalışmada PID parametreleri seçilirken, sistemde kullanılacak motora 200V'dan daha büyük bir giriş geriliminin uygulanmaması gerekmektedir. Bu sebeple PID kontrolörün sisteme uyguladığı maksimum gerilime dikkat edilmiştir. Bu kısıtlama çevrevesinde Simulink PID tuner yardımıyla sistemin en hızlı cevap vereceği ve mümkün olan en az aşımaya sebep olarak PID parametreleri seçilmiştir.

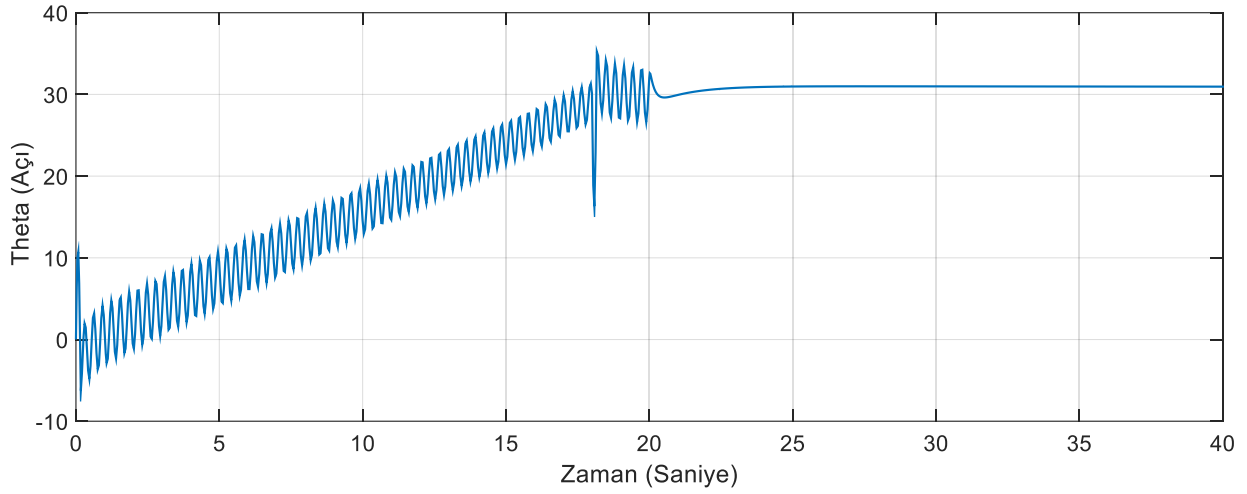
Şekil 11'de sıralı kontrol uygulanan sistemin giriş gerilimi, Şekil 12'de ise aynı sistemin çıkış sinyali verilmiştir. Sistem 30 dereceye gelene kadar giriş şekillendirme uygulanmış, sistem istenen değere geldiğinde anahtar yardımıyla PID kontrole geçilmiştir. Sistem PID kontrole göre daha hızlı yanıt vermiştir. PID kontrole geçiş sağlandıktan sonra ise hem titreşimlerin sönmüldüğü, hem de sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklı olduğu görülmektedir. PID kontrole geçene kadar oluşan titreşimlerin makul aralıkta olduğunun kabul edildiği durumlarda sıralı kontrolün her iki yöntemden daha avantajlı bir yöntem olduğu söylenebilir. Giriş şekillendirme esnasında oluşan titreşimlerin daha da azaltılması için farklı giriş şekillendirme teknikleri kullanılabilir. Ancak bunun sistemin cevap hızını yavaşlatacağı bilinmektedir. Bu bakımdan sistem detaylı şekilde incelenerek optimum giriş şekillendirme tekniği ve kabul edilebilir titreşim değerleri seçilmelidir.



Şekil 10. PID kontrol uygulanarak 30 derecede durdurulmak istenen sistem için çıkış (Output signal for PID controlled system with 30 degrees reference point)



Şekil 11. Sıralı kontrol ile 30 derecede durdurulmak istenen sisteme uygulanan giriş sinyali (Input signal for sequenced controlled system with 30 degrees reference point)



Şekil 12. Sıralı kontrol uygulanarak 30 derecede durdurulmak istenen sistem için çıkış sinyali (Output signal for sequenced controlled system with 30 degrees reference point)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Giriş şekillendirme uygulanan sistemde çıkışın basamak girişe göre çok daha küçük titreşimlere sebep olduğu görülmüştür. Giriş şekillendirme uygulanan sistemin titreşimleri tamamen yok edemediği gözlenmiştir. Farklı giriş şekillendirme teknikleri kullanılarak modelleme hatalarının ve çıkış titreşimlerinin yok edilmesi mümkündür.

PID kontrol çıkış titreşimlerini çok küçük seviyelere getirmiştir ve çıkışta kabul edilebilecek miktarda kalıcı durum hatası gözlenmektedir. PID parametreleri değiştirilerek bunun daha küçük değerlere çekilmesi ya da yok edilmesi mümkündür. Performansların karşılaştırılması amacıyla yalnızca PID kontrol uygulanan durumda ve sıralı kontrolün uygulandığı durumda PID parametreleri değiştirilmemiştir.

Sıralı kontrolün PID kontrole göre daha hızlı cevap verdiği görülmüştür. Sistem istenen değere oturduktan sonra PID kontrolör devreye alındığı için bozucu etkilere karşı da bir dayanım sağlanmıştır. Farklı giriş şekillendirme teknikleri uygulanarak giriş şekillendirme salınımlarının azaltılması mümkündür. Ancak bunun karşılığında sistemin cevap süresi uzayacaktır.

Sisteme yalnızca giriş şekillendirme uygulandığında hızlı cevap alındığı gözlenmiştir. Ancak oluşacak herhangi bir bozucu etki karşısında sistem çaresiz kalacaktır. Sisteme yalnızca PID kontrol uygulandığında ise sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklı olacağı bilinmektedir, ancak bunun karşılığında sistem giriş şekillendirmeye göre daha yavaş hale gelecektir. Sıralı kontrol sistemin büyük hareketlerinde giriş şekillendirmenin hızlı tepki süresinden yararlanırken, sistem istenen değere geldiğinde PID kontrolörü devreye alarak hareket esnasında ya da sonrasında oluşabilecek bozucu etkilere karşı PID kontrolden yararlanmayı amaçlamaktadır. Bu sayede hem açık çevrim hem de kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin temel avantajlarını bir araya getirirken dezavantajlarından kurtulur.

Gelecek çalışmalarda iki sistem arasında geçişi sağlayan anahtarlama sisteminin karar mekanizmasının akıllı hale getirilerek her koşulda her iki kontrol yönteminden de avantajlı olan bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Akademik çalışmalarımı birlikte yürüttüğüm Onur ÖRNEK'e teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Duc La, V., Kien Trong, N., 2019. Combination of Input Shaping and Radial Spring-Damper to Reduce Tridirectional Vibration of Crane Payload, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 310-321.
- Ertaş, H., 1995, Tek Kollu Esnek Manipülatörlerde Uç Sapmalarının Simülasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri

- Huey, J. 2006. The Intelligent Combination of Input Shaping and PID Feedback Control, School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology, PhD Thesis, Georgia, Atlanta 285p.
- Oliveira P., Vrancic, D., 2012. Underdamped Second-Order Systems Overshoot Control, IFAC Proceedings Volumes, 45(3), 518-523.
- Oliveira J., Oliveira, P., 2018. PID Posicast Control for Uncertain Oscillatory Systems: A Practical Experiment, IFAC PapersOnLine, 51-4, 416-421.
- Örnek, O., Ertaş H., 2020. Sıralı Kontrol; Giriş Şekillendirme (Input Shaping) ve PID Kontrolü Bir Araya Getiren Yeni Bir Kontrol Yöntemi, European Journal of Science and Technology, 2020 (4), 188-196.
- Parman, S., Go T., 2020. Two Constant Amplitude Pulses' Input Shaper to Maneuver an Attitude of Precise-Oriented Flexible Spacecraft, Journal of Sound and Vibration, 465, 115011.
- Rana, D. S., Deepika., 2014. Modelling, Stability Analysis and Control of Flexible Single Link Robotic Manipulator, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Issue 2, February 2014
- Ramon, P., Comin D., 2018. Simulink Implementation of Industrial Test of Input Shaping Techiques, Control Engineering Practice, 79, 1-21.
- Singhose, W., Singh, T., 2002. Tutorial on Input Shaping / Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures, American Control Conference 2002.
- Thomsen, D., Soe-Knudsen, R., 2021. Vibration Control of Industrial Robot Arms by Multi-Mode Time-Varying Input Shaping, Mechanism and Machine Theory, 155, 104072.
- Tumari M., Shabudin, L., Zawawi, M., Shah, A., 2013. Active Sway Control of a Gantry Crane Using Hybrid Input Shaping and PID Control Schemes, 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research, 50 012029.
- Ünsal S., Gürleyük S., 2012. Gerçek Zamanlı Giriş Şekillendirici Tasarımı, ELECO'2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.
- Yavuz, H., Kapucu, S., 2012. Hybrid Input Shaping to Suppress Residual Vibration of Flexible Systems, Journal of Vibration and Control, January 2012.



TÜRKÇE DİLİNDE YAZILAN BİLİMSEL METİNLERİN DERİN ÖĞRENME TEKNİĞİ UYGULANARAK ÇOKLU SINIFLANDIRILMASI

Mustafa ÖZKAN*, Görkem KAR

Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|--|---|
| <i>Makine Öğrenmesi, Doğal Dil İşleme, Derin Öğrenme, Çok Sınıflı Sınıflandırma, BERT.</i> | <p>Ekim 2018 yılında Google tarafından geliştirilen BERT derin öğrenme tekniği, makine öğrenimi ve doğal dil işleme dünyasında çok popüler oldu. Transformatörlerin Çift Yönlü Kodlayıcı Gösterimleri anlamına gelen BERT, yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojilerini bir arada kullanan bir doğal dil işleme tekniği olarak açıklanabilir. Günümüzde, gözetimli öğrenme metodolojisinin bir parçası olan sınıflandırma problemleriyle çokça karşılaşılmaktadır. Sınıflandırmanın temeli eğitilen bir makinenin yeni gelen bir veri hakkında tahminleme yapabilmesine ve sınıflandırabilmesine dayanır. Buradaki amaç bir veri kümesi üzerinde tanımlı olan sınıflar arasında veriyi dağıtabilmektir. Türkçe'nin morfolojisinin zengin ama karmaşık olması, sonradan eklemeli bir dil olması ve dil bilgisinden kaynaklanan zorluklar çoklu sınıflandırma problemlerinin çözümünde başlıca sorun teşkil etmekte iken BERT derin öğrenme tekniği ile bu sorun daha kolay çözülebilir hale gelmiştir. Bu çalışmada, son 10 yıl içinde Türkçe dili ile yazılmış akademik araştırma ve bilimsel çalışmalar veri seti olarak kullanıldı. Çoklu sınıflandırma problemlerinde kullanmak üzere, veri setine BERT derin öğrenme tekniği uygulanarak önceden eğitilmiş Türkçe bir BERT modeli üzerinde ince ayar (fine-tuning) yapıldı. Deneylerin sonucunda, eğitilmiş olan sistemin doğruluğu %96 başarı oranına sahip olmuştur.</p> |

MULTICLASS CLASSIFICATION OF SCIENTIFIC TEXTS WRITTEN IN TURKISH BY APPLYING DEEP LEARNING TECHNIQUE

| Keywords | Abstract |
|---|--|
| <i>Machine Learning, Natural Language Processing, Deep Learning, Multiclass Classification, BERT.</i> | <p>The BERT deep learning technique, which is developed by Google in October 2018, has become very popular in the world of machine learning and natural language processing. BERT, which stands for Bidirectional Encoder Representations of Transformers, can be explained as a natural language processing technique that uses artificial intelligence and machine learning technologies together. Nowadays, classification problems that are part of the supervised learning methodology are frequently encountered. Classification is based on the ability of a trained machine to predict and classify new data. The purpose is to distribute data between classes defined on a dataset. In Turkish many of the difficulties arise from being an agglutinative language and having a rich but complex morphology. These difficulties cause hard to solving multiclass classification problems. However, it has become more easily solvable with using BERT deep learning technique. We used academic research and scientific studies written in Turkish in the last 10 years as our dataset. We fine-tuned our dataset on a pre-trained Turkish BERT model by applying BERT deep learning technique to use in multiclass classification problems. As a result of experiments, it is seen that the accuracy of the system we have trained has achieved 96% accuracy.</p> |

Alıntı / Cite

Özkan, M., Kar, G., (2022). Türkçe Dilinde Yazılan Bilimsel Metinlerin Derin Öğrenme Tekniği Uygulanarak Çoklu Sınıflandırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 504-519.

* İlgili yazar / Corresponding author: m.ozkan0093@gmail.com, +90-538-323-6484

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| M. Özkan, 0000-0003-4287-9220 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 19.07.2021 |
| G. Kar, 0000-0003-0367-4409 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 23.12.2021 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 28.12.2021 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Yapay zekanın en dikkat çekici teknolojilerden biri olmasının sebebi bir insana gerek kalmadan veya minimum insan müdahalesiyle işlem yapabilme yeteneğine sahip olmasıdır. Yapay zeka konusuna genelden özele doğru bakıldığında zaman zaman ortaya Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme kavramları çıkacaktır. Yapay zeka, görevleri yerine getirmek için insan zekasını taklit eden ve topladıkları bilgilere göre kendini yinelemeli olarak iyileştirebilen sistemleri veya makineleri ifade eder. Makine öğrenimi, yapay zekanın bir alt bilim dalıdır. Bilgisayarların algılayıcı verisi ya da veri tabanları gibi veri türlerine dayalı öğrenimini olanaklı kılan algoritmaların tasarım ve geliştirme süreçlerini konu edinen bir bilim dalıdır. Derin öğrenme, bir makine öğrenme yöntemidir ve verilen bir veri kümesi ile çıktılar tahmin edecek yapay zekayı eğitmeye olanak sağlar.

Derin öğrenme yöntemlerinin daha ayrıntılı olarak verilebilecek uygulama alanları arasında aşağıdakiler yer almaktadır (Deng ve Yu, 2014):

- Dil modelleme ve doğal dil işleme (Language modeling and natural language processing)
- Konuşma ve ses işleme (Speech and audio processing)
- Bilgi erişimi (Information retrieval)
- Nesne tanıma ve bilgisayarlı görü (Object recognition and computer vision)
- Çok modelli ve çok görevli öğrenme (Multimodal and multitask learning)

Yukarıda paylaşılan bilgiler ışığında ilk sırada yerini alan doğal dil işleme konusu, metin madenciliği olarak da anılmakta ve yapay zeka alanı içerisinde değerlendirilmektedir. Doğal dil işleme, birçok konuyu bünyesinde barındırmaktadır. Uygulama alanı gittikçe artmaya devam eden doğal dil işleme konusuna başlıca örnek olarak aşağıdakiler verilebilir:

- Metin ayrıştırma
- Metin sınıflandırma
- Bilgi çıkarımı
- Duygu analizi

Yukarıda verilen örneklerden ikinci sıradaki yerini alan "Metin Sınıflandırma" konusu Türkçe dili için belli başlı sorunları da beraberinde ortaya çıkarmaktadır. Türkçe'nin morfolojisinin zengin ama karmaşık olması, sondan eklemeli bir dil olması ve dil bilgisinden kaynaklanan zorluklar metin sınıflandırma yöntemlerinden biri olan çoklu sınıflandırma problemlerinin çözümünde başlıca sorun teşkil etmekte iken BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) derin öğrenme tekniği ile bu sorun daha kolay çözülebilir hale gelmiştir.

Bu çalışmada; doğal dil işleme problemlerinin çözümü için en güncel derin öğrenme tekniklerinden biri olan BERT teknolojisi, son 10 yıla ait toplanan Türkçe dili ile yazılmış tez ve patentlerden oluşan bir veri seti ile kullanılarak incelenmiş olup, Türkçe bir kaynak olarak araştırmacıların dikkatine sunulmuştur. Bu çalışmanın göze çarpan aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

- 2011- 2021 yılları arasında oluşturulmuş 1560 adet tez ve patent veri seti olarak kullanılmıştır.
- Veri seti bir ön işleme aşamasından geçirilmiş ve etiketleme yapılmıştır.
- Eğitim ve doğrulama kümeleri belirlenmiştir.
- Tokenizer ve model belirlenmiş, en uygun optimizasyon algoritması kullanılmıştır.
- Eğitim gerçekleştirilmiş ve BERT teknolojisi ile Türkçe dilinde çok sınıflı sınıflandırma yapılmıştır.

Çalışmanın kalan bölümleri şu şekilde ilerlemektedir: 2. bölümde materyal ve kullanılan metotlar incelenmiş, 3. bölümde deneysel sonuçlar paylaşılmış, 4. Bölümde konu hakkında tartışma yapılmış, 5. bölümde ise makale özetlenmiş ve sonuçlar verilmiştir.

Not: Bu makaledeki çalışma, Python 3.7.10 versiyonu (What's New In Python 3.7, 2018) ile çalışma zamanı GPU olarak ayarlanmış Google Colab (Bisong, 2019) ortamı kullanılarak test edilmiştir. Kullanılan fiziksel aygıt Tesla T4 (Jia vd., 2019) modelidir.

BERT derin öğrenme tekniğinin oldukça yeni bir teknoloji olmasından dolayı, Türkçe dili üzerindeki bilimsel çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Literatürde BERT derin öğrenme tekniği ile Türkçe dili için gerçekleştirilen farklı çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalara dair ayrıntılar kronolojik olarak aşağıda paylaşılmıştır.

Temmuz 2019 tarihinde gerçekleştirilen bu çalışmada transfer öğrenme (transfer learning) tekniği kullanılarak restoran ve ürün değerlendirmeleri hakkında pozitif ve negatif olarak duygu analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma aynı zamanda ince ayar tekniği ve derin öğrenme mimarisi uygulanarak transfer öğrenmeyi Türk Dili için duygu analizi problemini çözmek için kullanan önemli bir girişim olarak kabul edilmektedir. Çalışma sonucunda transfer öğrenmesi ile gerçekleştirilen eğitim sonucunda elde edilen modelin F1 skoru restoran ve ürün değerlendirmeleri için sırasıyla 0.913 ve 0.842 olarak belirtilmiştir. (Akin ve Yildiz, 2019)

Ekim 2020 tarihinde Türkçe duygu analizi üzerine gerçekleştirilen bu bilimsel çalışmada, Türkçe duygu analizi için BERT bazlı 3 farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen 3 model de ikili sınıflandırma probleminin çözümünde kullanılmıştır. Film ve otel yorumlarından oluşan, pozitif ve negatif olmak üzere 2 etikete ve aynı eğitim ve doğrulama kümesine sahip Türkçe veri kümeleri üzerinde yapılan deneylerde en yüksek başarı oranı 0.9332 olarak elde edilmiştir. (Acikalın vd., 2020)

Ocak 2021 tarihinde gerçekleştirilen bu çalışmada Türkçe metinlerdeki duyguların sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada, Türkçe dili ile daha güçlü bir duygu sınıflandırma modeli oluşturmak için önceden eğitilmiş dil modeli yaklaşımı kullanılmıştır. İyi bilinen önceden eğitilmiş dil modellerine bu amaç için ince ayar yapılmıştır. Türkçe duygu sınıflandırması için bu ince ayarlı modellerin performansları, deneysel çalışmalarda geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin performansları ile kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda önerilen yaklaşımın, Türkçe duygu sınıflandırması için en gelişmiş performansı sağladığı ortaya konulmuştur. (Uçan vd., 2021)

Ocak 2021 tarihinde gerçekleştirilen bu çalışma da bir önceki çalışma gibi ikili sınıflandırma problemini temel almaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada, içerisinde depresyon, sel, kaza, olumsuz hava olayları gibi felaket durumları hakkında paylaşılan 7613 adet tweet ile sınıflandırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Veri seti içerisinde yer alan tweet'lerin bazıları gerçek bir felaket durumunu ifade ederken bazıları bağımsız kelimeler açısından bir felaket olarak nitelenebilecekken bütün itibarıyla felaket olmayan bir durumu ifade etmektedir. Felaketler konusunda ve gerçek dışı olarak işaretlenmiş bu veriler Google yapay zeka ekibi tarafından geliştirilen, sinir ağı temelli bir model olan BERT ile sınıflandırılmıştır. %80 eğitim, %20 doğrulama seti olarak ayrılan veri kümesi üzerinde tur sayısı 10 olarak gerçekleştirilen eğitim işlemi sonucunda 0.9888 elde edilmiştir. Doğruluk değeri 0.8794, duyarlılık değeri ise 0.8503 olarak elde edilmiştir. (Sevli ve Kemalöglü, 2021)

Mayıs 2021 tarihinde bir diğer bilimsel çalışmada ise deneysel bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Morfolojik olarak zengin bir dil olan Türkçe için BERT'in etkinliği gösterilmiştir. Geleneksel olarak morfolojik yapısı zor olan diller, verileri makine öğrenimi algoritmalarına uygun olacak şekilde modellemek için yoğun bir dil ön işleme adımlarından geçer. Özellikle, veri seyrekliği veya yüksek boyutlu problemlerin üstesinden gelmek için verimli bir veri modeli elde etmeye ve sözcüklere ayırma, köklere ayırma gibi görevlere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, literatürden duygu analizi, siber zorbalık tespiti, metin sınıflandırma, duygu tanıma ve spam tespiti olmak üzere beş farklı Türkçe NLP araştırma problemi seçilmiş, daha sonra BERT'in deneysel performansı temel makine öğrenimi algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Son olarak, ağır ön işleme görevleri ortadan kaldırılırken, seçilen NLP problemlerinde temel makine öğrenimi algoritmalarına kıyasla gelişmiş sonuçlar bulunmuştur. (Özçift vd., 2021)

Mayıs 2021 tarihinde gerçekleştirilen bir diğer bilimsel çalışma ise Türk Facebook kullanıcıları için cinsiyet tahminine yönelik keşifsel bir çalışmadır. İkili sınıflandırma problemine çözüm bulan bu çalışmada mevcut çalışmalardan farklı olarak Facebook kullanıcılarının cinsiyet tespiti sadece metin içerikleri kullanılarak değil, aynı zamanda profil bilgileri, ağ yapısı, duvar etkileşimleri ve duvar içerikleri kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. BERT teknolojisi ile geliştirilen modelde, Türk sosyal medya kullanıcılarının duvar içerikleri kullanılarak elde edilen cinsiyet tahmininin doğruluk değeri 0.926 olarak elde edilmiştir. Duvar içerikleri ile eğitilen BERT modelinin, çalışma kapsamında gerçekleştirilen diğer tüm makine öğrenmesi sınıflandırıcılarından ve derin öğrenme algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur. Ayrıca BERT modelinin çok daha büyük bir korpus üzerinde eğitildiğinde çok daha iyi sonuçlar verebileceği sonucuna varılmıştır. (Çoban vd., 2021)

Haziran 2021 tarihinde gerçekleştirilen bir diğer bilimsel çalışma ile farklı konulardaki Türkçe etiketli metinler sınıflandırılarak başarıları incelenmiştir. Klasik makine öğrenmesi yöntemleri, derin öğrenme mimarileri ve son zamanlarda popüler hale gelen transformer tabanlı sınıflandırıcı modellerinin başarıları dört farklı veri kümesi üzerinde karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada tüm veri kümeleri üzerinde BERT tabanlı sınıflandırıcı modelinin hem klasik hem de derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılardan daha yüksek sınıflandırma başarıları verdiği gözlenmiştir. (Şahin ve Diri, 2021)

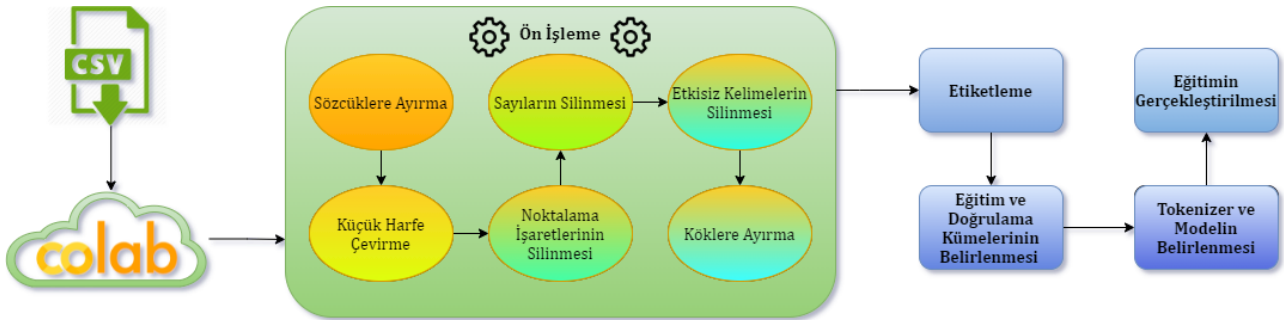
Ortaya koyduğumuz bu çalışma ile metin sınıflandırma yöntemlerinden biri olan “Çok Sınıflı Sınıflandırma” probleminin Türkçe dili için BERT derin öğrenme tekniği kullanılarak çözülmesi hedeflenmiş ve gerçekleştirilmiştir. Birçok eğitimden geçmiş farklı veri setleri ve doğrulama kümesi ile kapsamlı bir başarıım tablosu (Tablo 10) elde edilmiştir. Elde edilen bu başarıım tablosu ile gelecekteki “Çok Sınıflı Sınıflandırma” problemlerinin Türkçe dili için BERT derin öğrenme tekniği uygulanarak gerçekleştirilecek çalışmalara ışık tutulması ve daha yüksek başarıım oranlarına ulaşılması temenni edilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Günümüzde lisans eğitimi tamamlayan çoğu öğrenci, daha iyi bir gelecek için ikinci bir yeterlilik almaya karar verir ve lisans üstü eğitimine başlar. Yüksek lisans, lisans öğretimine dayalı eğitim-öğretim ve araştırmanın sonuçlarını ortaya koymayı amaçlayan bir yükseköğretimdir. Yüksek lisans eğitimi, kişinin eğitim aldığı branşta uzmanlaşması ve bu durumu bilimsel bir tezle ispat etmesiyle tamamlanır. Her yıl sayısız mezun veren yüksek lisans programları ile sayısız bilimsel tez akademimize kazandırılmaktadır.

Bir diğer önemli konu ise fikri ve sınai mülkiyet haklarından biri olan patettir. Bir buluşa sahip olan kişinin, buluşa konu olan ürünü, belirlenen süre boyunca üretme, kullanma, satma ya da ithal etme hakkına sahip olması durumuna patent hakkı adı verilir. Bu hakkın somut göstergesi olan belge ise patent adını taşır. Günümüzde bilgiye dayalı faaliyetlerin artması ile birlikte patentin önemi daha da artmıştır.

Tez ve patentlerin ortak noktaları, ortaya konulan eserin bir kategoriye ait olmasıdır. Hem tez yazarı hem de patent yazarı, çalışmalarının içerdiği kategoriyi kendileri yazarak belirtmektedir. İnternet üzerinden erişime açık olan bu iki alanda da kategorisi belirlenmemiş birçok eser mevcuttur. Günümüz teknolojisinde yapay zeka teknolojisi ile metinlerin kategorilerinin belirlenmesi sağlanabilmektedir. Bu çalışma buradan yola çıkarak özellikle Türkçe dilinde yazılan bilimsel metinlerin BERT derin öğrenme tekniği uygulanarak çoklu sınıflandırılmasını konu edinmiştir. İlk aşama olarak bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti üzerinde ön işleme (Pre-processing) gerçekleştirilmiştir. Ön işlemeden geçirilen veri seti için eğitim ve doğrulama setleri belirlenmiştir. Sonrasında BERT derin öğrenme tekniği uygulanarak bir performans metriği olan F1 skoru elde edilmiştir. Çalışmaya ait aşamalar ve sistemin genel görünümünü içeren diyagram Şekil 1 üzerinde görülebilir. Devamındaki bölümlerde ise çalışmanın ayrıntıları detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 1. Sistem Genel Görünümü (System Overview)

2.1. Metin Sınıflandırma (Text Classification)

Metin sınıflandırma sorunu, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ kümesindeki her bir belgenin (metin), önceden tanımlanmış $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ kümesindeki sınıflara ait olup olmadığının belirlenmesidir. Yani her $(b_j, s_i) \in B \times S$ çifti için doğru ya da yanlış biçiminde bir mantıksal değer üretilmesi gerekmektedir. (Tantuğ, 2016) Metin sınıflandırma, verilerden kolayca iç görü elde etmeye olanak sağladığı için yapay zeka dünyasının gün geçtikçe daha da önemli bir parçası haline gelmiştir. Veriler belirli bir şekilde düzenlenmedikçe bu verilerden değer elde etmek zordur. Metin etiketleme veya metin kategorizasyonu olarak da bilinen metin sınıflandırması, veri olarak ele alınan metni organize gruplar halinde kategorize etme işlemidir. Bir Doğal Dil İşleme alt konusu olan metin sınıflandırma ile metin analiz edilir ve ardından içeriğine göre önceden tanımlanmış bir dizi etikete veya kategoriye atanabilir. Bu atamanın sonucunda metin kategorilere ayrılmış olur ve düzensiz veri düzenlenerek kullanılmak üzere bir değer elde edilir.

Metin sınıflandırması için kullanılan başlıca yöntemler bir sonraki konu başlığında ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

2.1.1. Sınıflandırma Yöntemleri (Classification Methods)

Genel olarak iki tür sınıflandırma problemi vardır: ikili problem ve çok sınıflı problem. İkili problem, bir tahmin sonucunun evet veya hayır kararıyla belirlenmesi gereken bir durum iken, çoklu sınıflandırma problemi, tahmin edilen bir sonucun birden çok sonuç olarak belirlendiği bir durumdur. (Kraipeerapun, 2009) Sınıflandırma problemlerinin çözümü için İkili Sınıflandırma, Çok Sınıflı Sınıflandırma ve Çok Etiketli Sınıflandırma yöntemleri kullanılır. Ayrıntılar aşağıdaki alt başlıklarda listelenmektedir.

2.1.1.1. İkili Sınıflandırma (Binary Classification)

İkili sınıflandırma, adından da anlaşılacağı üzere verileri olası iki kategoriden birine sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılır. Bu sınıflandırma yönteminde, sorulacak soruların sadece iki cevabı olmalıdır. Bu tür sınıflandırmalar için ünlü filozof Aristoteles'in mantığı geçerlidir. Bu mantığın temelinde, sorulara karşılık gelen iki ana cevaba dahil olup olmama durumu vardır.

Bu sınıflandırmaya örnek olarak: E-posta spam tespiti, belirli tıbbi durum tespiti, duygu analizi (yalnızca pozitif ve negatif kategori kabul edilmiştir) düşünülebilir.

2.1.1.2. Çok Sınıflı Sınıflandırma (Multi-class Classification)

Çok sınıflı sınıflandırmada, ikili sınıflandırmadan farklı olarak sınıf sayısı ikiden fazladır. Bu sınıflandırma problemlerinin çözümünde, verilecek cevap ikiden fazla değer içinden seçilerek cevaplanacaksa buna çok sınıflı sınıflandırma (Multi-class classification) problemi denir. Buradaki önemli noktalardan biri, verilen cevap maksimum bir sınıfa dahil olabilir.

Örneğin; elimizde bir e-ticaret sitesinde satılan ürüne yapılmış olan yorumlar olsun. Bu yorumların da 3 kategorisi olsun: Fiyat, kullanım ve kalite. Bu yorumlar belli bir sınıf altında toplanmak istendiği zaman çok sınıflı sınıflandırma yöntemi kullanılmalıdır.

2.1.1.3 Çok Etiketli Sınıflandırma (Multi-label Classification)

Çoklu etiketli sınıflandırma problemlerinin çözümünde de bir önceki yöntemde anlatılan çok sınıflı sınıflandırma gibi verilecek cevap, ikiden fazla değer içinden seçilerek verilecektir. Bu sınıflandırma yönteminin çok sınıflı sınıflandırma yönteminden farkı verilen cevabın birden fazla sınıfa dahil olabilesidir. Çoklu etiketli sınıflandırmanın amacı, tek bir örnek için bir dizi ilgili etiket ataması yapabilmektir.

Örneğin; bir önceki yöntemde bahsettiğimiz, satın alınmış olan yorumların kategorileri şu şekildedir: Fiyat, kullanım ve kalite.

Bu yorumların içinde birden fazla sınıfa dahil olan yorumlar olabilir. Sadece kullanımdan bahsedebileceği gibi, fiyat ve kaliteden de aynı anda bahsedilen yorumlar içerebilir ve bu yorumları belirli bir sınıfa atamak istenmeyebilir. Bu tarz problemlerde doğru çıktı, çoklu etiketli sınıflandırma yöntemi kullanılarak elde edilmelidir. Bu çalışma boyunca yukarıda ayrıntıları paylaşılan sınıflandırma yöntemlerinden Çok Sınıflı Sınıflandırma kullanılmıştır. Bu sınıflandırma yönteminin kullanılmasının sebebi, ileride ayrıntıları verilecek olan veri setinin sınıflandırılmasının ikiden fazla değer içinden seçilerek maksimum bir sınıfa dahil olmasından kaynaklanmaktadır. Kısaca, kullanılacak olan veri seti beş farklı sınıftan oluşacak ve maksimum bir sınıfa dahil olacaktır.

Veri seti iki farklı kategoriden daha fazla kategoriye sahip olduğu için İkili Sınıflandırma yöntemi kullanılmamıştır. Veri seti içindeki herhangi bir verinin birden fazla kategoriye aynı anda dahil olma ihtimali olmadığı için de Çoklu Etiketli Sınıflandırma yöntemi kullanılmamıştır.

2.2. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)

"Bidirectional Encoder Representations from Transformers" ifadelerinin baş harflerinden oluşan BERT algoritması, Ekim 2018'de Google tarafından geliştirilen doğal dil işleme (NLP) ön eğitimi için Transformer (derin öğrenme modeli) tabanlı bir makine öğrenimi tekniğidir. (Devlin vd., 2018)

Google, 2015 yılında Rankbrain (Schachinger, 2017) algoritmasını makine öğrenmesi ile destekleyerek arama sonuçlarında insan mantığına en yakın ve doğru cevapları filtrelemeyi sağlamıştır. 2019 yılı ile beraber BERT güncellemesini yayınlarken, sorgu kelimelerini ayrı ayrı işlemek yerine tüm cümleyi incelemeye başlamış ve tüm

kelimeleri mantıksal biçimde değerlendirerek en tutarlı sonuçlara ulaşmayı sağlamıştır.

BERT algoritması, geleneksel soldan sağa ve sağdan sola dil işleme modelleri yerine “İki Yönlü Dil İşleme” özelliğini kullanmaktadır. Soldan sağa ve sağdan sola giden yüzeysel çift yönlü dil işleminin aksine, BERT her bir kelimenin diğerine olan ilişkisini anlamaya çalışan daha karmaşık bir “Maskeli Dil Modeli” ve “Sıradaki Cümle Tahmini” öğrenme stratejilerini kullanır.

BERT tabanlı mimariler şu anda birçok NLP görevinde son teknoloji ürün olarak performans sağlar. (Devlin vd., 2018) Soru cevaplama, sıralı etiketleme, duyarlılık analizi ve çıkarım dahil olmak üzere farklı yapıya, ana hatlara ve karmaşıklığa sahip bir dizi problemlerin çözümünde kullanılır ve yukarıda bahsedilen iki temel öğrenme stratejisini temelinde barındırır. BERT temelini oluşturan bu iki öğrenme stratejisi konunun devamında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

2.2.1. Maskeli Dil Modelleme (Masked Language Modelling)

BERT, kelimeleri bir dizide rastgele maskeleyen ve çift yönlü temsilleri öğrenmek için kullanılabilen maskeli dil modelinin yardımıyla kelimeler arasındaki ilişkiyi anlamayı öğrenir. (Lee vd., 2020) Kelime dizileri BERT modeline aktarılmadan önce, belirli bir cümle için $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, rastgele %15'lik kısmı özel bir sembol $[M]$ ile değiştirilir. Daha sonra model, dizideki diğer maskelenmemiş kelimelerin oluşturduğu %85'lik kısmın bağlama dayanarak maskelenen kelimelerin orijinal değerini tahmin etmeye çalışır. K 'yı maskelenmiş konumlar kümesi, χ_K 'yi maskelenmiş simgeler kümesi olarak, $\chi_{\setminus K}$ 'yi maskeleymeden sonraki cümle ve θ 'yi model olarak tanımlayacak olursak, Maskeli dil modelleme Formül 1'in maksimuma çıkarılması ile modeli ön eğitimden geçirir (Song vd., 2020):

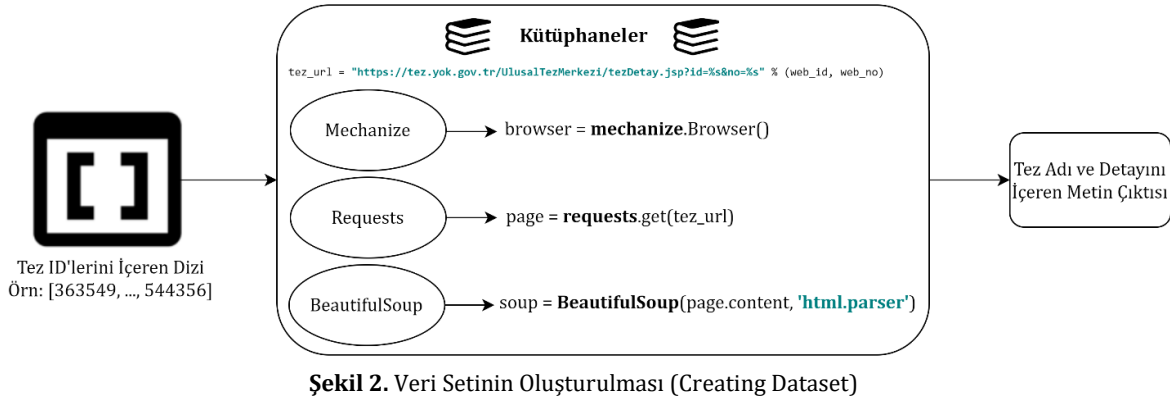
$$\log P(\chi_K | \chi_{\setminus K}; \theta) \approx \sum_{k \in K} \log P(\chi_k | \chi_{\setminus K}; \theta) \quad (1)$$

2.2.2 Sıradaki Cümle Tahmini (Next Sentence Prediction)

BERT eğitim sürecinde, modele cümle çiftlerini girdi olarak alır. Çiftteki ikinci cümlenin belge içerisinde sonraki cümle olup olmadığını tahmin etmeyi öğrenir. Modelin eğitimi sırasında girdilerin %50'lik kısmında ikinci cümlenin orijinal belge içerisinde takip eden cümle olduğu çiftler alınırken, diğer %50'lik kısımda ise ikinci cümle rastgele seçilir. Burada modelin rastgele seçilen cümlenin ilk cümleye bağlı olmadığını tespit etmesi beklenir. (Sevli ve Kemaloğlu, 2021)

2.3. Veri Seti Oluşturma (Dataset Creation)

Yazarları tarafından Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi Veri Tabanında arşivlenmesine ve internet üzerinden tam metin erişime açılmasına izin verilen tezler açık erişime sunulmaktadır. Ulusal Tez Merkezi aracılığıyla Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yazılım Mühendisliği Ana Bilim Dalı ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı altında son 10 yıl içerisinde yazılmış olan 1110 adet tez başlık ve özet kısımlarını içermek üzere Python dilinde yazılan script ile toplanmıştır. Bu script içinde “Mechanize”, “Requests” ve “BeautifulSoup4” kütüphanelerinden faydalanılmıştır. Mechanize, John J. Lee tarafından geliştirilen, web siteleri üzerinde browser gibi davranarak işlemler yapılmasını sağlar. (Lee, 2013) Requests, web üzerindeki isteklerin yönetilmesini sağlar. (Chandra ve Varanasi, 2015) BeautifulSoup4, HTML ve XML dosyalarından veri çekmek için kullanılır. (Richardson, 2007) Jsp teknolojisi ile oluşturulmuş Ulusal Tez Merkezi'nin url'si (<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=%s&no=%s>) üzerinden gerekli tez id'si parametre olarak verilmiş, Requests kütüphanesinin get metodu kullanılarak bir döngü içinde istenen tüm tez verileri toplanmıştır. Kütüphanelerin kullanım şekli ve veri setinin oluşturulmasına ait aşamalar diyagram Şekil 2 üzerinde görülebilir.



Bu çalışma, çoklu sınıf sınıflandırma konusunu temel aldığı için mümkün olduğunca birbirinden farklı kategori belirlenmeye çalışılmış ve aşağıdaki 5 kategori alanı belirlenmiştir:

1. Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi
2. Nesnelerin İnterneti (IoT)
3. Görüntü İşleme
4. Artırılmış ve Sanal Gerçeklik
5. Haberleşme ve Sinyalleşme

1110 adet tez içeren ve herhangi bir kategoriye ait olduğunu belirtmeyen veri seti tek tek, titizlikle analiz edilerek yukarıdaki 5 kategorinin hangisine dahil olduğu belirlenmiştir. 732 adet tez yukarıda belirtilen 5 farklı kategorinin birine dahil olmuş fakat 378 adet tez bu kategorilerden birine dahil olmamıştır. Her kategori için en az 100 adet veri içermesini hedeflenmiştir. Az önce bahsedilmiş olan 378 adet tezin kendi aralarında oluşturabileceği ortak kategori sayısının en az 100 adet veri içermemesinden dolayı belirlenen 5 kategorinin dışında ayrı bir kategori eklenmemiştir.

732 adet verinin eğitim için yeterli olmayacağı düşünülerek veri setini artırma yoluna gidilmiş ve Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na bağlı, özel bütçeli, bağımsız yasal bir kuruluş olan Türk Patent ve Marka Kurumu'nun veri tabanından yararlanılmıştır. İlgili kurumun internet sayfası üzerinden detaylı arama yaparak 2011- 2021 yılları içerisinde yukarıda belirtilen 5 kategoriye ait olan toplam 828 adet patent veri setine dahil edilmiştir. Böylelikle veri seti 1560 adet tez ve patent çalışmalarının başlık ve özet kısımlarını içerecek şekilde son haline gelmiştir.

Bu çalışmanın devamında verilecek olan bütün istatistikler ve gerçekleştirilen çalışmalar, başlık ve özet kısımlarını beraber içeren veri seti dahilinde gerçekleştirilmiştir. Sadece başlık ve sadece özet bilgilerini içeren veri setleri ile ayrıca iki eğitim daha gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen iki eğitimin birbirinden farkı doğrulama büyüklüklerinin %20 ve %15 olarak belirlenmesidir. Bu iki eğitim sonucunda elde edilen değerlerden %20'lik doğrulama büyüklüğü içeren eğitimin sonucu direkt "Sonuç Değerlerinin Elde Edilmesi" bölümünde Tablo 9 üzerinde paylaşılacaktır. %15'lik doğrulama büyüklüğü içeren eğitimin sonucu ise "Tartışma" bölümünde Tablo 10 üzerinde paylaşılacaktır.

2.4. Veri İstatistikleri (Data Stats)

Veri ön işleme üzerinde çalışmaya başlanılmadan önce, mevcut verinin istatistikleri incelenmiştir. Veri seti içerisinde 1560 adet bilimsel metin bulunduğu daha önce belirtilmiştir. Eldeki verinin kategoriye ilişkin dağılımı Tablo 1'de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Veri Kategori İlişkisi (Data Category Relationship)

| KATEGORİ | METİN SAYISI |
|-------------------------------|--------------|
| Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi | 598 |
| Görüntü İşleme | 438 |
| Haberleşme ve Sinyalleşme | 217 |
| Nesnelerin İnterneti | 183 |
| Artırılmış ve Sanal Gerçeklik | 124 |

Tablo 1'den anlaşılacağı üzere veri setinin dengesiz (imbalanced) durumda olduğu görülmektedir. BERT, ek veri artırma olmadan dengesiz sınıfları işleyebilir. (Madabushi vd., 2020) Bu sebeple veri setini dengelemek üzerine ayrı bir çalışma yapılmamıştır.

2.5. Veri Ön İşleme (Data Preprocessing)

Metni veri olarak kullanan her niceliksel çalışma, kelimelerin sayılara nasıl dönüştürüleceğine dair kararlar gerektirir. Toplu olarak 'ön işleme' olarak bilinen bu kararlar, analiz edilecek girdileri, sonraki modelin yorumlanabilirliğini veya sonuçlarını olumsuz bir şekilde etkilemeyecek şekilde daha az karmaşık hale getirmeyi amaçlamaktadır (Denny ve Spiraling, 2018).

Yapısal olmayan veri, önceden tanımlı bir veri modeline sahip olmayan ya da önceden tanımlı bir modele uyarlanamayan verileri ifade etmek için kullanılır. Genellikle metin ağırlıklı olmakla birlikte içerisinde tarih, sayı, koordinat verisi gibi farklı türlerde veriler de içerebilir. Bir önceki aşamada oluşturulan veri seti de yapısal olmayan veriler içermektedir. Yapısal olmayan verilerden anlam çıkartmak için verileri işlenebilir hale getirmek gerekmektedir. Bu işlemler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Aşağıda verilen örnek girdinin her ön işleme aşamasındaki çıktısı Tablo 2 üzerinde görülebilir.

Örnek girdi: BU BULUŞ YAYA GEÇİDİ İHLALİNİ TESPİT EDEN BİR SİSTEM (1) İLE İLGİLİDİR.

Tablo 2. Ön İşleme Çıktısı (Pre-Processing Output)

| ÖN İŞLEME AŞAMASI | ÇIKTI |
|-----------------------------------|--|
| Sözcüklere Ayırma | 'BU', 'BULUŞ', 'YAYA', 'GEÇİDİ', 'İHLALİNİ', 'TESPİT', 'EDEN', 'BİR', 'SİSTEM', '(', '1', ')', 'İLE', 'İLGİLİDİR', '.' |
| Küçük Harfe Çevirme | 'bu', 'buluş', 'yaya', 'geçidi', 'ihlalini', 'tespit', 'eden', 'bir', 'sistem', '(', '1', ')', 'ile', 'ilgilidir', '.' |
| Noktalama İşaretlerinin Silinmesi | 'bu', 'buluş', 'yaya', 'geçidi', 'ihlalini', 'tespit', 'eden', 'bir', 'sistem', '1', 'ile', 'ilgilidir' |
| Sayıların Silinmesi | 'bu', 'buluş', 'yaya', 'geçidi', 'ihlalini', 'tespit', 'eden', 'bir', 'sistem', 'ile', 'ilgilidir' |
| Etkisiz Kelimelerin Silinmesi | 'buluş', 'yaya', 'geçidi', 'ihlalini', 'tespit', 'sistem', 'ilgilidir' |
| Köklere Ayırma | 'buluş', 'ya', 'geçidi', 'ihlalini', 'tespit', 'siste', 'ilgi' |

2.5.1. Sözcüklere Ayırma (Tokenization)

Sözcüklere ayırma, bütün bir yazıyı oluşturan her bir sözcüğü ayırma işlemidir. Metin kelime kelime parçalanarak dizilere kaydedilir. Böylelikle, her bir kelime bir token (belirteç) olmuş olur.

NLTK (Natural Language Toolkit), insan dili verileriyle çalışacak Python programları oluşturmak için geliştirilmiş bir platformdur. (Tuzcu, 2020) Bu çalışmada NLTK kütüphanesinden "Punkt Word Tokenizer" kullanılarak bütün veri tokenlarına ayrılmıştır.

2.5.2. Küçük Harfe Çevirme (Lowercase Conversion)

Bu aşamada veri setinin içindeki metinlerin büyük küçük harf ayrımını ortadan kaldırmak amacıyla, tokenlarına ayrılmış olan her bir kelime küçük harfe çevrilmiştir.

2.5.3. Noktalama İşaretlerinin Silinmesi (Removing Punctuation)

Bu aşamada veri seti içerisindeki her bir metnin içerdiği noktalama işaretlerinin kaldırılması gerçekleştirilmiştir. String kütüphanesinden "punctuation" kullanılmıştır. Veri seti içerisinde silinen noktalama işaretleri şunlardır: {!, ", #, \$, %, &, ', (,), *, +, ,, -, ., /, :, ;, <, =, >, ?, @, [, \,], ^, _ ` , {, |, }, ~}

2.5.4. Sayıların Silinmesi (Removing Numbers)

Bu aşamada Regex kütüphanesinden faydalanarak, basit bir regex tanımı ile veri seti içindeki metinlerden sayılar kaldırılmıştır. Kullanılan regex tanımı: [0-9]+

2.5.5. Etkisiz Kelimelerin Silinmesi (Removing Stop Words)

Metin içerisinde geçen ve anlamda herhangi bir değişiklik yapmayan kelimelere etkisiz kelime denir. Bu kelimeler cümleden çıkarıldığında anlamda bir değişikliğe sebep olmadıkları için özellikle veri seti içerisinde bulunması gereksizdir. Bu sebeple, NLTK kütüphanesinden "stopwords" ile TRSTOP kütüphanesini birleştirerek, Türkçe dilindeki etkisiz 210 adet kelime veri setinden kaldırılmıştır. Veri setinin herhangi bir ön işleme aşamasından geçmeden önce içerdiği en çok kullanılan ilk 5 kelime Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. En Çok Kullanılan Kelimeler (Most Used Words)

| KELİME | METİNLERDE GÖZLENME FREKANSI |
|--------|------------------------------|
| ve | 9624 |
| bir | 6637 |
| ile | 3701 |
| için | 3539 |
| Bu | 2903 |

Veri setinden kaldırılan 210 adet etkisiz kelime Şekil 3 üzerinde görülebilir:



Şekil 3. Etkisiz Kelimeler (Stop Words)

2.5.6. Kök Bulma (Stemming)

İngilizcede "Stemming" olarak isimlendirilen kök bulma işlemi, metinde geçen kelimelerdeki eklerin atılarak kelime köklerinin kaydedilmesidir. Yazının başında belirtildiği gibi Türkçe sondan eklemeli bir dildir, ancak İngilizcede bu durum söz konusu değildir. Dolayısıyla Türkçenin durumdan duruma farklılık gösterebilen ekleri İngilizcede görülmez. Kelimeleri köklere ayırma işlemi Türkçe dili için mükemmel olmaktan uzak olmasına rağmen metin verisi üzerinde çalışma gerçekleştiren yapay zeka çalışmalarında kullanımı avantaj sağlamaktadır. Bu aşamada Snowballstemmer modülündeki "TurkishStemmer" kütüphanesi kullanılarak veri setine Türkçe "stemming" uygulanmıştır. Kullanılan bu kütüphane ile "stemmer" bir kelime için tek aday döndürmektedir. Kullanım şekli aşağıda paylaşılmıştır:

1. from snowballstemmer import TurkishStemmer
2. turkStem=TurkishStemmer()
3. pp['turkish_stem'] = pp['words'].apply(lambda x: [turkStem.stemWord(word) for word in x])

2.6. Etiketleme (Labelling)

Daha önce belirlenmiş olan 5 kategori birbirinden farklı 5 adet sayıya etiketlenmiştir. Bu etiketler ileride yanlış yapılan tahminlerin hangi kategoriye ait olduğunun görülmesinde yardımcı olacaktır. Etiketlenen kategoriler ve değerleri Tablo 4 ile gösterilmiştir.

Tablo 4. Etiket Bilgileri (Label Informations)

| KATEGORİ | ETİKET |
|-------------------------------|--------|
| Artırılmış ve Sanal Gerçeklik | 1 |
| Görüntü İşleme | 2 |
| Haberleşme ve Sinyalleşme | 3 |
| Nesnelerin İnterneti | 4 |
| Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi | 5 |

2.7. Eğitim ve Doğrulama Kümelerinin Belirlenmesi (Identifying Training and Validation Sets)

Veriyi eğitim ve doğrulama olarak ayırmak için gereken kütüphaneler yüklendikten sonra doğrulama büyüklüğü belirlenir. Doğrulama büyüklüğü önce %20 seçilerek, veri setinin %80'i eğitim için kullanılmıştır. Bir sonraki modelde ise doğrulama büyüklüğü %15 seçilerek, veri setinin %85'i eğitim için kullanılmıştır.

Veri ayrıldıktan sonra eğitim kümesinde mi yoksa doğrulama kümesinde mi olduğu görülebilir. Kategoriler, bu kategorilere atanan etiketler ve hangi kümede kaç veri olduğunun istatistikleri tablo olarak çıkarılabilir. Doğrulama büyüklüğü %20 olarak belirlenen veri setinin ayrıntıları Tablo 5 üzerinde paylaşılmıştır.

Tablo 5. Eğitim ve Doğrulama Kümesi (Training and Validation Set)

| KATEGORİ | ETİKET | VERİ KÜMESİ | VERİ SAYISI |
|-------------------------------|--------|-------------|-------------|
| Artırılmış ve Sanal Gerçeklik | 1 | Eğitim | 99 |
| | | Doğrulama | 25 |
| Görüntü İşleme | 2 | Eğitim | 350 |
| | | Doğrulama | 88 |
| Haberleşme ve Sinyalleşme | 3 | Eğitim | 174 |
| | | Doğrulama | 43 |
| Nesnelerin İnterneti | 4 | Eğitim | 147 |
| | | Doğrulama | 36 |
| Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi | 5 | Eğitim | 478 |
| | | Doğrulama | 120 |

Toplam Eğitim kümesi: 1248

Toplam Doğrulama kümesi: 312

Not: Doğrulama büyüklüğü %15 olan modelin F1 skoru direkt "Tartışma" bölümünde Tablo 10 üzerinde paylaşılacaktır. Bu çalışmanın içeriği doğrulama büyüklüğü %20 olarak belirlenmiş olan model üzerinden anlatılacak, çalışmanın devamında verilen bütün istatistik ve sonuçlar "Tartışma" bölümüne kadar bu modele ait olacaktır.

2.8. Tokenizer ve Model Belirleme (Tokenizer and Model Determination)

BERT derin öğrenme tekniğini kullanmak için iki ana objeye ihtiyaç vardır. Bunlardan biri Tokenizer, diğeri ise ince ayar yapılacak önceden eğitilmiş bir model. Tokenizer, önceden sahip olunan kelime haznesinin kullanılarak metnin öğelerine ayrılması işlemi için kullanılan araç olarak tanımlanabilir. Bu çalışma da Türkçe dili üzerinde gerçekleştirildiği için, Tokenizer ve model olarak Türkçe doğal dil işleme topluluğunun oluşturduğu, Türkçe metinler kullanılarak ön eğitilmiş olan uncased BERTurk modeli kullanılmıştır. Bu model, toplamda 128 bin adet Türkçe kelime içerip 35 GB büyüklüğe sahiptir. 128 GB RAM ve 8 çekirdeğe sahip TPU v3-8 yongası ile eğitilmiştir. (BERTurk, 2020) Kullanılan modele <https://huggingface.co/dbmdz/bert-base-turkish-128k-uncased> adresi üzerinden ulaşılabilir.

2.9. Optimize Edici Belirleme (Optimizer Determination)

Gerçekleştirilecek olan derin öğrenme çalışmasında doğrusal olmayan probleme optimum çözüm aranmıştır. Burada optimumdan kasıt en uygun ve en verimli çözüm olarak düşünülebilir. Bu çalışmada aranan optimum değer bulunması için AdamW optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Adam, derin sinir ağlarını eğitmek için özel olarak dizayn edilmiş, uyarlanabilir bir öğrenme hızı (learning rate) optimizasyon algoritmasıdır (Kingma ve Ba, 2014). Loshchilov & Hutter, Adam optimizasyon algoritmasını daha düzenli hale getirmek için AdamW'yi önerdiler ve ortaya koydukları çalışma ile AdamW optimizasyon algoritması ile eğitilen modellerin Adam optimizasyon algoritması ile eğitilen modellere göre daha az aşırı öğrenme(overfitting) problemi yaşadığını göstermişlerdir. (Loshchilov ve Hutter, 2017)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Eğitimin Gerçekleştirilmesi (Training Phase)

BERT derin öğrenme algoritmasını geliştiren mühendisler tarafından, gerçekleştirilecek olan eğitimin aşağıda belirtilen hiper parametreler ile kullanılması önerilmiştir (Google Research Bert, 2018):

- Eğitim Tur Sayısı (Epoch): 4
- Yığın (Batch) Sayısı: 8, 16, 32, 64, 128
- Öğrenme Hızı (Learning Rate): 3e-4, 1e-4, 5e-5, 3e-5

Öneriler eşliğinde, bu çalışmada 5e-5 öğrenme hızı ile toplam 4 kez eğitim aşamasından geçmekte, girdiler 32'şer 32'şer alınarak modeli beslemektedir. Google Colab üzerinde GPU ile çalışıldığından dolayı her eğitim döngüsü ortalama 1 dakika 6 saniye süren zaman içerisinde gerçekleşmiş, eğitimin tamamlanması ise 4 dakika 24 saniye gibi kısa bir süre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Her eğitim aşamasıyla beraber eğitim kaybı, doğrulama kaybı ve F1 skoru bilgileri kaydedilmiş ve her eğitim için oluşturulan model kaydedilmiştir. Eğitim aşamasından geçmiş her modelin ayrıntılı bilgileri bir sonraki bölümde paylaşılmıştır.

3.2. Sonuç Değerlerinin Elde Edilmesi (Obtaining Result Values)

F1 skoru değeri Kesinlik (Precision) ve Duyarlılık (Recall) değerlerinin harmonik ortalamasını göstermektedir. (Opitz ve Burst, 2019) Her bir modelin F1 skoru değerlerinin bulunabilmesi için Python dili ile yazılmış bir makine öğrenmesi kütüphanesi olan "Scikit-learn" modülü kullanılmıştır. Scikit-learn, orta ölçekli denetimli ve denetimsiz problemler için çok çeşitli son teknoloji makine öğrenimi algoritmalarını entegre eden bir Python modülüdür. (Pedregosa vd.,2011) Bu modüle ait olan "sklearn.metrics.f1_score" fonksiyonu, her tur sayısında gerçekleştirilen eğitim işlemi sonucunda kendi yazdığımız fonksiyon içerisinde çağrılmış ve her modelin F1 skoru elde edilmiştir. "sklearn.metrics.f1_score" fonksiyonu F1 skorunun formülünü temel almıştır. Fonksiyona ait ayrıntılı bilgiye https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.f1_score.html#sklearn.metrics.f1_score adresinden ulaşılabilir. Elde edilen F1 skorunun doğruluğu, "sklearn.metrics.precision_score" ve "sklearn.metrics.recall_score" fonksiyonları kullanılarak F1 skorunun formülü ile kontrol edilmiştir. F1 skorunun formülü Formül 2'de paylaşılmıştır.

$$F1 \text{ Score} = 2 * \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (2)$$

Tablo 6 üzerinden de görüldüğü üzere eğitimin son aşaması olan 4. adımda oluşturulan 4 numaralı model en yüksek F1 skorunu elde etmiş ve 0.9551'lik bir başarıya ulaşmıştır.

Tablo 6. Eğitim Çıktıları (Training Outcomes)

| MODEL | EĞİTİM KAYBI | DOĞRULAMA KAYBI | F1 SKORU | EĞİTİM SÜRESİ |
|-------|--------------|-----------------|----------|---------------|
| 1 | 1.1734 | 0.4738 | 0.8083 | 0:01:07 |
| 2 | 0.3121 | 0.2948 | 0.9127 | 0:02:13 |
| 3 | 0.1538 | 0.2477 | 0.9357 | 0:03:19 |
| 4 | 0.0969 | 0.1687 | 0.9551 | 0:04:24 |

Her bir modelin kategoriler özelindeki doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skoru değerlerinin bulunması için “Scikit-learn” modülüne ait olan “sklearn.metrics.classification_report” fonksiyonu kullanılmıştır. 4 numaralı modelin performans metrik sonuçları Tablo 7 ile paylaşılmıştır:

Tablo 7. Model Performans Metrik Sonuçları (Model Performance Metric Results)

| ETİKET | KATEGORİ | DOĞRULUK DEĞERİ | KESİNLİK DEĞERİ | DUYARLILIK DEĞERİ | F1 SKORU |
|--------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------|
| 1 | Artırılmış ve Sanal Gerçeklik | 0.96 | 1.00 | 0.96 | 0.98 |
| 2 | Görüntü İşleme | 0.94 | 1.00 | 0.94 | 0.97 |
| 3 | Haberleşme ve Sinyalleşme | 0.97 | 1.00 | 0.98 | 0.99 |
| 4 | Nesnelerin İnterneti | 0.97 | 1.00 | 0.97 | 0.99 |
| 5 | Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 0.97 |

Eğitim öncesi ön işleme aşamasından sonra her bir kategori için gerçekleştirilen eğitim ve doğrulama kümeleri sayılarını içeren tablonun, 4. modelin elde ettiği doğruluk değerinin sonuçları ile güncellenmiş hali Tablo 8 üzerinde görülebilir:

Tablo 8. Model Sınıflandırma Sonuçları (Model Classification Results)

| ETİKET | KATEGORİ | DOĞRULAMA SETİ | DOĞRU SINIFLANDIRILAN ÖRNEK SAYISI |
|--------|-------------------------------|----------------|------------------------------------|
| 1 | Artırılmış ve Sanal Gerçeklik | 25 | 24 |
| 2 | Görüntü İşleme | 88 | 83 |
| 3 | Haberleşme ve Sinyalleşme | 43 | 42 |
| 4 | Nesnelerin İnterneti | 36 | 35 |
| 5 | Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi | 120 | 114 |

Eğitime başlamadan önce doğrulama büyüklüğü %20 olarak belirlenmiş ve böylelikle toplam doğrulama kümesi sayısının 312 olduğu gösterilmiştir. En yüksek F1 skoruna sahip 4. Modelde 312 adet doğrulama kümesi sayısının 14 tanesi yanlış kategoriye sınıflandırılmıştır.

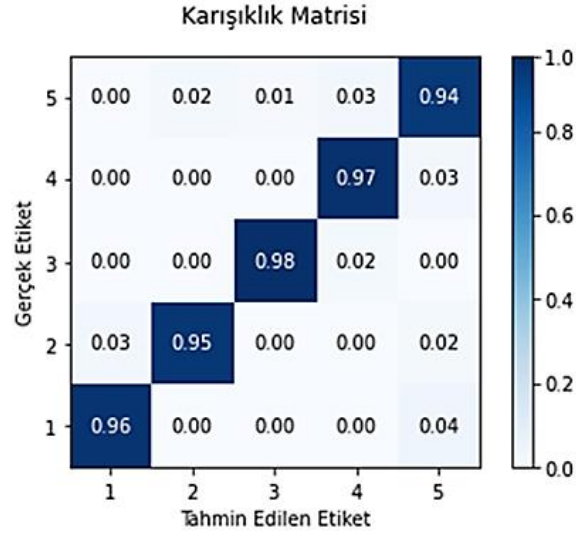
Sadece başlık ve sadece özet bilgilerini içeren veri seti ile doğrulama büyüklüğü %20 olarak gerçekleştirilen eğitimin sonuçları ön işleme aşamasından geçmiş ve ön işleme aşamasından geçmemiş şekilde ayrıntılı olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak elde edilen değerler ile Tablo 9'daki gibi bir başarıım tablosu ortaya çıkmıştır:

Tablo 9. Başarıım Tablosu (Achievement Chart)

| EĞİTİM | DOĞRULAMA | VERİ SETİ İÇERİĞİ | ÖN İŞLEMESİZ F1 SKORU | ÖN İŞLEMELİ F1 SKORU |
|--------|-----------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| %80 | %20 | Başlık | 0.701 | 0.730 |
| %80 | %20 | Özet | 0.903 | 0.925 |
| %80 | %20 | Başlık & Özet | 0.914 | 0.955 |

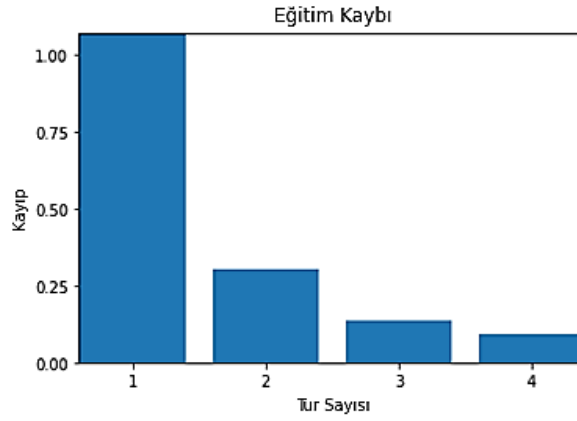
Yanlış tahminde bulunulan değerler ile ortaya çıkan karışıklık matrisi Şekil 4'te paylaşılmıştır:



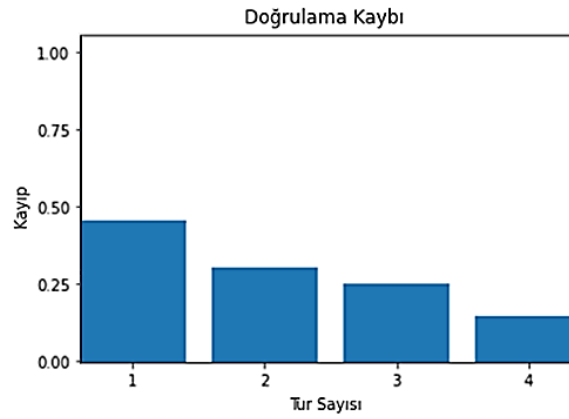
Şekil 4. Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix)

Not: Etiket numaraları ilgili kategorileri göstermektedir.

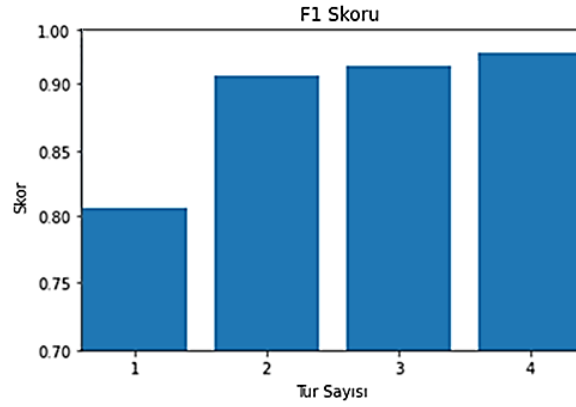
Eğitim sonucu ortaya çıkan her modelin eğitim kaybı, doğrulama kaybı ve F1 skoruna ait grafikler Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de paylaşılmıştır:



Şekil 5. Eğitim Kaybı (Training Loss)



Şekil 6. Doğrulama Kaybı (Validation Loss)



Şekil 7. F1 Skoru (F1 Score)

4. Tartışma (Discussion)

Bilgiye erişimin geçmişe kıyasla çok daha kolay ve pratik hale geldiği günümüzde, bilimsel araştırmalarda elde edilen bulguları, bilimsel bir buluşu ve araştırmaların sonuçlarını ortaya koymaya yarayan bilimsel metinlerin önemi ve sayısı paralel bir şekilde artmaktadır. Her bilimsel metnin kendi alanına, varsa kullanılan teknolojiye hatta ve hatta içerdikleri anahtar kelimelere göre sınıflandırılması, bilgiye erişimin en elverişli şekilde kullanılabilmesi için elzemdir. Doğal dillerin doğaları gereği karmaşık bir yapıya sahip ve net kuralları olmamalarının yanında özellikle Türkçe dilinin morfolojik yapısının karmaşık olması, sınıflandırma problemlerinin çözümünde sorun teşkil etmekte iken, bu sorun Google yapay zeka ekibi mühendisleri tarafından geliştirilen BERT derin öğrenme tekniği ile günümüzde en aza indirgenmiştir.

Bu çalışmada Yükseköğretim Kurulu'na bağlı Ulusal Tez Merkezi ve Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na bağlı Türk Patent ve Marka Kurumu'nun veri tabanından yararlanılmıştır. Python dilinde yazılan script ile veri seti oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Veri seti içerisinde yer alan bilimsel metinler eğitim başarısını arttırmak adına öncelikle bir ön işleme aşamasından geçirilmiş, sonrasında belirlenmiş olan 5 kategoriye göre etiketlenmiştir. Veriler sinir ağı temelli bir model olan BERT ile sınıflandırılmıştır. %80 eğitim ve %20 doğrulama seti olarak ayrılan veri kümesi üzerinde tur sayısı 4 olarak gerçekleştirilen eğitim işlemi sonucunda 0.9551 F1 skoru elde edilmiştir.

Veri Seti Oluşturma başlığında bahsedilen, sadece başlık ve sadece özet bilgilerini içeren veri setleri ile ayrıca iki eğitim daha gerçekleştirilmiştir. Bu iki veri kümesi de %80 eğitim ve %20 doğrulama seti olarak ayrılmıştır. Sadece başlık bilgisini içeren eğitim 0.7306 F1 skoru, sadece özet bilgisini içeren eğitim 0.9259 F1 skoru elde etmiştir.

Eğitim ve Doğrulama Kümesinin Belirlenmesi başlığında bahsedilen, %85 eğitim ve %15 doğrulama seti olarak ayrılan veri kümesi üzerinde tur sayısı 4 olarak gerçekleştirilen eğitim işlemi sonucunda ise 0.9613 F1 skoru elde edilmiştir.

Veri Seti Oluşturma başlığında bahsedilen, sadece başlık ve sadece özet bilgilerini içeren veri setleri ile ayrıca iki eğitim daha gerçekleştirilmiştir. Bu iki veri kümesi de %85 eğitim ve %15 doğrulama seti olarak ayrılmıştır. Sadece başlık bilgisini içeren eğitim 0.7622 F1 skoru, sadece özet bilgisini içeren eğitim 0.9401 F1 skoru elde etmiştir.

Hem %20 hem de %15 doğrulama seti olarak ayrılan veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen bütün çalışmalar, veri setinin ön işleme aşamasından geçmemiş hali ile yapıldığından daha önce bahsedilmiştir. Tablo 9 üzerinde görülen başarımlar sonuçları doğrulama büyüklüğü %15 olarak gerçekleştirilen eğitim sonucunda ortaya çıkan değerler ile aşağıdaki Tablo 10 ile genişletilmiştir.

Sonuç olarak elde edilen bütün değerler ile Tablo 10'daki gibi bir başarımlar tablosu ortaya çıkmıştır:

Tablo 10. Genişletilmiş Başarım Tablosu (Extended Achievement Chart)

| EĞİTİM | DOĞRULAMA | VERİ SETİ İÇERİĞİ | ÖN İŞLEMESİZ F1 SKORU | ÖN İŞLEMELİ F1 SKORU |
|--------|-----------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| %80 | %20 | Başlık | 0.701 | 0.730 |
| %80 | %20 | Özet | 0.903 | 0.925 |
| %80 | %20 | Başlık & Özet | 0.914 | 0.955 |
| %85 | %15 | Başlık | 0.754 | 0.762 |
| %85 | %15 | Özet | 0.919 | 0.940 |
| %85 | %15 | Başlık & Özet | 0.940 | 0.961 |

5. Sonuç (Result)

Bu çalışma dahilinde BERT derin öğrenme tekniği kullanılarak bu çalışmaya özel oluşturulan veri seti üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiş, Tablo 10 üzerinden de anlaşıldığı üzere elde edilen sonuçlar ile yüksek bir performans gösterilmiştir. Türkçe dilinin Çok Sınıflı Sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere, %80 eğitim %20 doğrulama seti ve %85 eğitim %15 doğrulama seti olarak ayrılan veri kümesi üzerinde tur sayısı 4 olarak gerçekleştirilen eğitimler sonucunda model ortaya çıkarılmıştır. Eğitilen bu modelden %80 eğitim %20 doğrulama seti büyüklüğüne sahip olanı 0.955'lik bir başarı oranına sahip olurken, %85 eğitim %15 doğrulama seti büyüklüğüne sahip olan diğer model 0.961'lik bir başarı oranına sahip olmuştur. Daha önce Türkçe dili için BERT derin öğrenme tekniği ile gerçekleştirilen Çok Sınıflı Sınıflandırma çalışmasından (Uçan vd., 2021) F1 skoru olarak 0.04 daha iyi performans ortaya konulmuştur. Daha sonra gerçekleştirilecek olan çalışmalarda veri setinin genişletilmesi, kategorilerin arttırılması, ön işleme aşamasının daha çok detaylandırılması ve Türkçe dilindeki kelime köklerinin daha başarılı bir şekilde ayrıştırılması ile başarıyı arttıracak çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Acikalin, U. U., Bardak, B., & Kutlu, M. (2020). Turkish Sentiment Analysis Using BERT. In 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- Akin, S. E., & Yildiz, T. (2019, July). Sentiment Analysis through Transfer Learning for Turkish Language. In 2019 IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA) (pp. 1-6). IEEE.
- BERTurk. (2020). <https://github.com/stefan-it/turkish-bert>. (Erişim Tarihi:30.01.2021)
- Bisong, E. (2019). Google colaboratory. In Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform (pp. 59-64). Apress, Berkeley, CA.
- Chandra, R. V., & Varanasi, B. S. (2015). Python requests essentials. Packt Publishing Ltd.
- Çoban, Ö., İnan, A., & Özel, S. A. (2021). Facebook Tells Me Your Gender: An Exploratory Study of Gender Prediction for Turkish Facebook Users. Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing, 20(4), 1-38.
- Deng, L., & Yu, D. (2014). Deep learning: methods and applications. Foundations and trends in signal processing, 7(3-4), 197-387.
- Denny, M. J., & Spirling, A. (2018). Text preprocessing for unsupervised learning: Why it matters, when it misleads, and what to do about it. Political Analysis, 26(2), 168-189.
- Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2018). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805.
- Google Research Bert. (2018). <https://github.com/google-research/bert> (Erişim Tarihi:07.02.2021)
- Jia, Z., Maggioni, M., Smith, J., & Scarpazza, D. P. (2019). Dissecting the NVidia Turing T4 GPU via microbenchmarking. arXiv preprint arXiv:1903.07486.
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.
- Kraipeerapun, P. (2009). Neural network classification based on quantification of uncertainty (Doctoral dissertation, Murdoch University).
- Lee, J. J. (2013). Mechanize: Stateful programmatic web browsing in Python. <http://wwwsearch.sourceforge.net/mechanize/> (Erişim Tarihi:17.01.2021)
- Lee, J., Yoon, W., Kim, S., Kim, D., Kim, S., So, C. H., & Kang, J. (2020). BioBERT: a pre-trained biomedical language representation model for biomedical text mining. Bioinformatics, 36(4), 1234-1240.

- Loshchilov, I., & Hutter, F. (2017). Decoupled weight decay regularization. arXiv preprint arXiv:1711.05101.
- Madabushi, H. T., Kochkina, E., & Castelle, M. (2020). Cost-sensitive BERT for generalisable sentence classification with imbalanced data. arXiv preprint arXiv:2003.11563.
- Opitz, J., & Burst, S. (2019). Macro f1 and macro f1. arXiv preprint arXiv:1911.03347.
- Özçift, A., Akarsu, K., Yumuk, F., & Söylemez, C. (2021). Advancing natural language processing (NLP) applications of morphologically rich languages with bidirectional encoder representations from transformers (BERT): an empirical case study for Turkish. *Automatika*, 1-13.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.
- Richardson, L. (2007). Beautiful soup documentation. <https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup/bs4/doc/>. (Erişim Tarihi:15.01.2021)
- Schachinger, K. (2017). A Complete Guide to the Google RankBrain Algorithm. *Search Engine Journal*.
- Sevli, O., Kemalöglu, N. (2021). Olağandışı Olaylar Hakkındaki Tweet'lerin Gerçek ve Gerçek Dışı Olarak Google BERT Modeli ile Sınıflandırılması. *Veri Bilimi*, 4 (1), 31-37.
- Song, K., Tan, X., Qin, T., Lu, J., & Liu, T. Y. (2020). Mpnnet: Masked and permuted pre-training for language understanding. arXiv preprint arXiv:2004.09297.
- Şahin, G., & Diri, B. (2021, June). The Effect of Transfer Learning on Turkish Text Classification. In *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.
- Tantuğ, A. C. (2016). Metin Sınıflandırma. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 5(2).
- Tuzcu, S. (2020). Çevrimiçi Kullanıcı Yorumlarının Duygu Analizi ile Sınıflandırılması. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 1(2), 1-5.
- Uçan, A., Dörterler, M., & Akçapınar Sezer, E. (2021). A study of Turkish emotion classification with pretrained language models. *Journal of Information Science*, 0165551520985507.
- What's New In Python 3.7. (2018). <https://docs.python.org/3.7/whatsnew/3.7.html> (Erişim Tarihi:18.04.2021)



EFFECTS OF THE COVID-19 PANDEMIC ON TURKISH NATURAL STONE INDUSTRY: A GREY FORECASTING MODEL

Gökhan EKİNCİOĞLU¹, Deniz AKBAY^{2*}, Erdal AYDEMİR³

¹ Ahi Evran University, Kaman Vocational School, Department of Mining and Mineral Extraction, Kırşehir, Türkiye

² Çanakkale Onsekiz Mart University, Çan Vocational School, Department of Mining and Mineral Extraction, Çanakkale, Türkiye

³ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Isparta, Türkiye

Keywords

Turkish Natural Stone, Export, Covid-19 Pandemic, Grey Forecast Model.

Abstract

When the indicators in recent years are examined in the developing and renewed economic environment in Turkey, it is seen that the momentum of the natural stone industry and its share in total mining exports have increased steadily. However, the Covid-19 pandemic in 2020, which affected the whole world, also affected the Turkish natural industry. Within the scope of this study, the export values of the Turkish natural stone industry on a monthly and yearly basis were evaluated both before the pandemic and during the pandemic. Export figures for 2020 and 2021 were tried to be estimated using the Gray Forecast model. With the effect of the Covid-19 pandemic, natural stone export figures for 2020 fell behind 2019 in February, March, April and May. With the normalization process in June, July and Months, normalization started in export figures and exceeded the export values of 2019 in September, October, November and December. In 2020, which was entered with great hopes, it was not possible to reach the targeted figures this year due to the pandemic. In addition, Also, export values for 2020 and 2021 were predicted using a GM (1,1) grey forecasting model, which is a method frequently used in uncertainty cases. 2020 and 2021 export values were estimated by using the GM (1,1) gray forecasting model, which is a method frequently used in uncertainty situations. It has been seen that the model can be used reliably to predict natural stone export figures. In the following years, some assessments and recommendations have been made that may make the Turkish natural stone industry stronger in the following years on issues such as health management of crises and adaptation to the current situation if such outbreaks are replicated in the global world economy.

COVID-19 PANDEMİSİNİN TÜRK DOĞAL TAŞ SEKTÖRÜNE ETKİLERİ: BİR GRİ TAHMİN MODELİ

Anahtar Kelimeler

Türk Doğal Taşı, İhracat, Covid-19 Pandemisi, Gri Tahmin Modeli.

Öz

Türkiye'de gelişen ve yenilenen ekonomik ortamda son yıllardaki göstergeler incelendiğinde, doğal taş sektörünün ivmesinin ve toplam madencilik ihracatı içindeki payının istikrarlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Ancak 2020 yılında tüm dünyayı etkisi altına alan Covid-19 salgını, Türkiye doğal taş endüstrisini de etkilemiştir. Bu çalışma kapsamında hem pandemi öncesi hem de pandemi döneminde Türkiye doğal taş sektörünün aylık ve yıllık olarak ihracat değerleri değerlendirilmiştir. 2020 ve 2021 yılına ait ihracat rakamları Gri Tahmin modeli kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Türkiye maden ihracatının %50'lik kısmını Doğal Taş ihracatı oluşturmaktadır. Covid-19 pandemisinin etkisiyle 2020 yılı doğal taş ihracat rakamları Şubat, Mart, Nisan ve Mayıs aylarında 2019 yılının gerisinde kalmıştır. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında normalleşme süreci ile birlikte ihracat rakamlarında normalleşme başlamış ve Eylül, Ekim, Kasım ve Aralık

* İlgili yazar / Corresponding author: denizakbay@comu.edu.tr, +90-286-416-7705

aylarında 2019 yılı ihracat değerlerinin aşmıştır. Büyük umutlarla girilen 2020 yılında pandemi nedeniyle bu yıl hedeflenen rakamlara ulaşmak mümkün olmamıştır. Ayrıca belirsizlik durumlarında sıklıkla kullanılan bir yöntem olan GM (1,1) gri tahmin modeli kullanılarak 2020 ve 2021 ihracat değerleri tahmin edilmiştir. Modelin doğal taş ihracat rakamlarını tahminde güvenilir olarak kullanılabilmesi görülmüştür. İlerleyen yıllarda krizlerin sağlıklı yönetimi ve bu tür salgınların küresel dünya ekonomisinde tekrarlanması halinde mevcut duruma uyum gibi konularda önümüzdeki yıllarda Türkiye doğal taş sektörünü daha güçlü kılacak bazı değerlendirmeler ve önerilerde bulunulmuştur.

Alıntı / Cite

Ekincioğlu, G., Akbay, D., Aydemir, E., (2022). Effects of the Covid-19 Pandemic on Turkish Natural Stone Industry: A Grey Forecasting Model, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 10(2), 520-531.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Ekincioğlu, 0000-0001-9377-6817

D. Akbay, 0000-0002-7794-5278

E. Aydemir, 0000-0003-4834-725X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 01.09.2021

Revizyon Tarihi / Revision Date 14.12.2021

Kabul Tarihi / Accepted Date 20.12.2021

Yayın Tarihi / Published Date 30.06.2022

1. Introduction

The effects of changes occurring in the world due to globalization are very rapid. The consequences of political developments, economic crises, wars, and epidemics occurring at the national level as a result of globalization in the world exceed the borders of the country and reach countries that are not bordering. Economically dependent, economically dependent countries or foreign-dependent countries are adversely affected by such events due to their fragile economies. Developing countries such as Turkey should be economically strong because they are affected by developments on a global scale. The road to power in the global world is also through economic growth. Developing countries, which consider economic growth as a goal, both enrich and develop by using their natural resources (Başol et al., 2005; Ekincioğlu and Akbay, 2021).

The wide range of raw materials in the natural stone industry increases its competitiveness in global markets with block and processed plate productions using modern production methods and contributes about \$2 billion to the country's economy every year.

As of 2019, the share of mining in Turkey's total exports was 2.60% (\$4.3 billion) and the share of natural stone exports in total mining exports was 43.74% (\$1.86 billion) (TİM, 2020). When the data of recent years are examined in the developing and renewed economic environment in Turkey, the momentum of the natural stone industry is obvious. Therefore, to maintain the momentum and stability achieved, all scenarios should be prepared and underlined what awaits the industry (Ekincioğlu and Akbay, 2021). However, this paper tries to answer the following research questions:

- How can the extraordinary situations on natural stone industry be modelled?
- Today, Covid-19 pandemic also affected all industries on a global scale in 2020. So, can it be investigated what effect the pandemic has had on the natural stone industry?
- Can a new model be developed under uncertainty with a time-series-based approach to achieve these effects using Turkey export data until 2020 to 2021?
- Which method/s can be selected for clarifying the uncertainty?

Within the scope of this study, the development of the industry in recent years and the impact of the Covid-19 pandemic affecting the whole world on a global scale in 2020 were examined. In addition, 2020 and 2021 export values were estimated with GM (1,1) grey forecasting model, which is a method frequently used in uncertainty cases, and some evaluations and recommendations were made that could make Turkey's natural stone industry stronger.

The rest of the paper is organized as follows. The analysis of the before Covid-19 pandemic Turkish natural stone export is given with the global views in Section 2. Then, the effects of the Covid-19 pandemic on the natural stone export values of Turkey are given with numerical analysis on the year 2020 in Section 3. The establishing the grey forecasting models and their results are presented with error analysis on the year 2021 in Section 4. Finally, our conclusions are presented by combining the actual and future analysis of the Covid-19 effects as a big crisis in the last section.

2. Before Covid-19 Pandemic Turkish Natural Stone Export

Natural stones are easy to process, resistant to environmental conditions and their aesthetic appearance has been effective in their use throughout history. With the development of technology, the processing of hard rocks that cannot be processed, the increasing ability of rocks to give plates, and the rapid increase of the needs of the construction industry have made the natural stone industry the engine of mining in the world and our country (Adıgüzel and Şengüler, 2019; Ekincioğlu and Akbay, 2021).

There are approximately 2500 licensed natural quarries in the industry and 1500 of them are actively working. Approximately 200 large facilities and approximately 9000 medium and small enterprises and workshops operate in the industry, including SME. Approximately 180000 workers and 5000 technical staff are employed in the industry (TCKB, 2018). The natural stone industry has high added value compared to other industries. It is among the industries that bring net foreign currency to the country as a result of its market. In other industries with high added value, a ratio of 10% to 30% of the foreign currency revenue after exports remains in the country, while all the foreign currency obtained from exports in the natural stone industry remains in the country (Kocaman, 2006; Adıgüzel and Şengüler, 2019; Ekincioğlu and Akbay, 2021).

When the natural stone trade volume of our country between 2013 and 2019 is examined, it is seen that it varies between 41% and 49%. In other words, nearly half of our country's mining exports, which are very rich in underground resources, are natural stone exports (Table 1). Since 2013, Turkish natural stone exports have ranged from 1.74-2.2 billion dollars and the lowest exports have been observed in 2015, 2016, and 2020 (Figure 1). During these years, there has been a decrease in both mining exports and natural stone exports. However, it is seen that the decrease in natural stone exports is less than the decrease in total mining exports. The decrease in 2015 and 2016 was due to the fact that the People's Republic of China cut its incentives to the construction industry during this period. The reason for the decrease in 2020 is the negative, diminutive, narrowing effect of the Covid-19 pandemic on the country's economies and world trade (Ekincioğlu and Akbay, 2021).

Table 1. Turkish natural stone and mining exports values according to the years (IMIB, 2020)

| Year | Mining Export | | Natural Stone Export | | Natural Stone Export/Mining Export % |
|------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| | ×10 ⁶ tonnes | ×10 ⁹ \$ | ×10 ⁶ tonnes | ×10 ⁹ \$ | |
| 2013 | 22.31 | 5.03 | 8.44 | 2.22 | 44.14 |
| 2014 | 21.21 | 4.64 | 7.37 | 2.13 | 45.85 |
| 2015 | 20.14 | 3.90 | 6.52 | 1.91 | 48.94 |
| 2016 | 20.43 | 3.79 | 6.52 | 1.81 | 47.67 |
| 2017 | 24.70 | 4.69 | 7.94 | 2.05 | 43.69 |
| 2018 | 26.33 | 4.56 | 7.46 | 1.91 | 41.83 |
| 2019 | 27.15 | 4.31 | 7.14 | 1.86 | 43.24 |
| 2020 | 27.88 | 4.27 | 6.46 | 1.74 | 40.75 |

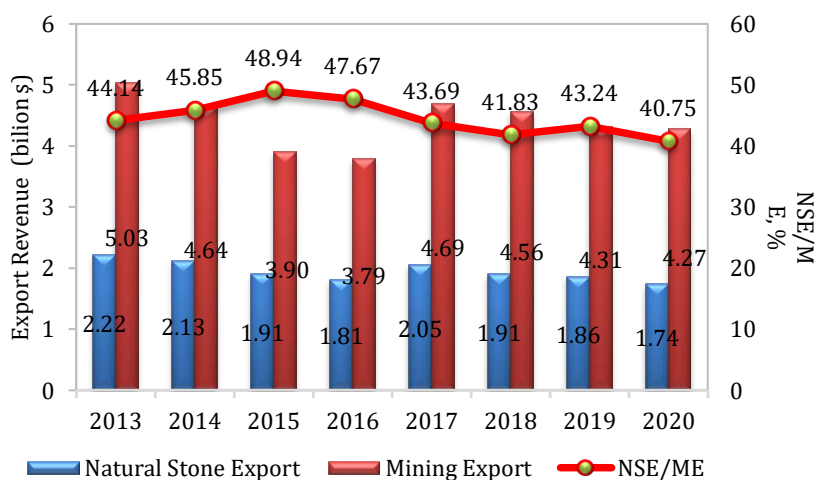


Figure 1. Turkish natural stone-mining export value and natural stone exports/mining exports ratio (NSE/ME, %) (Ekincioğlu and Akbay, 2021)

The decrease in export rates for 2015, 2016, and 2020 has been included in the table as an indication of how risky it is for the industry to adhere to the single market. In terms of the following years, a possible economic or political crisis in the People's Republic of China, where Turkey exports a very large part of its natural stone exports, or the Chinese government restricting natural stone imports or stopping its imports completely, the Turkish natural stone industry will be adversely affected. As a matter of fact, this scenario occurred in late 2019 with the Covid-19 pandemic that occurred in Wuhan, People's Republic of China, was effective all over the world in 2020. The largest share of Turkey's total natural stone exports has remained unchanged in recent years to the People's Republic of China (Table 2) (Ekincioglu and Akbay, 2021).

Table 2. Export rates by countries (FOB) (%) (IMIB, 2020)

| Countries | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| People's Republic of China | 44.17 | 38.94 | 38.16 | 40.41 | 46.18 | 40.55 | 37.27 | 31.09 |
| United States of America | 13.41 | 15.22 | 17.03 | 15.96 | 14.37 | 15.69 | 15.34 | 18.72 |
| Saudi Arabia | 4.27 | 5.20 | 5.96 | 6.61 | 5.11 | 5.55 | 6.73 | 8.02 |
| India | 2.09 | 2.61 | 3.30 | 3.05 | 4.15 | 4.73 | 4.93 | 3.54 |
| Israel | 1.70 | 1.88 | 2.21 | 2.65 | 2.63 | 3.17 | 3.52 | 4.37 |
| France | 0.00 | 2.37 | 2.30 | 2.50 | 2.53 | 2.91 | 3.32 | 3.88 |
| Iraq | 5.17 | 5.28 | 4.26 | 3.95 | 3.11 | 3.27 | 3.43 | 3.61 |
| Australia | 1.12 | 1.50 | 1.64 | 1.72 | 1.75 | 2.09 | 2.13 | 2.43 |
| United Arab Emirates | 2.02 | 2.23 | 2.57 | 2.69 | 2.57 | 2.83 | 2.13 | 2.09 |
| Other countries | 26.05 | 24.77 | 22.57 | 20.46 | 17.6 | 19.21 | 21.2 | 22.25 |

The United States follows the People's Republic of China. Following these two countries, the total of natural stone exports to Saudi Arabia, India, Israel, and other countries lags far behind natural stone exports to the People's Republic of China. The People's Republic of China in block exports and the United States in processed product exports are two important markets for the natural stone industry. When Figures 2 and 3 are examined, the first place in the total export amount is the People's Republic of China (min. %47.36 – max. %59.15), but its share in total natural stone exports is higher due to higher value-added processed plate exports to the United States. (min. %13.41 - max. %17.13). These figures clearly prove the importance of high value-added product exports for the Turkish economy (Ekincioglu and Akbay, 2021).

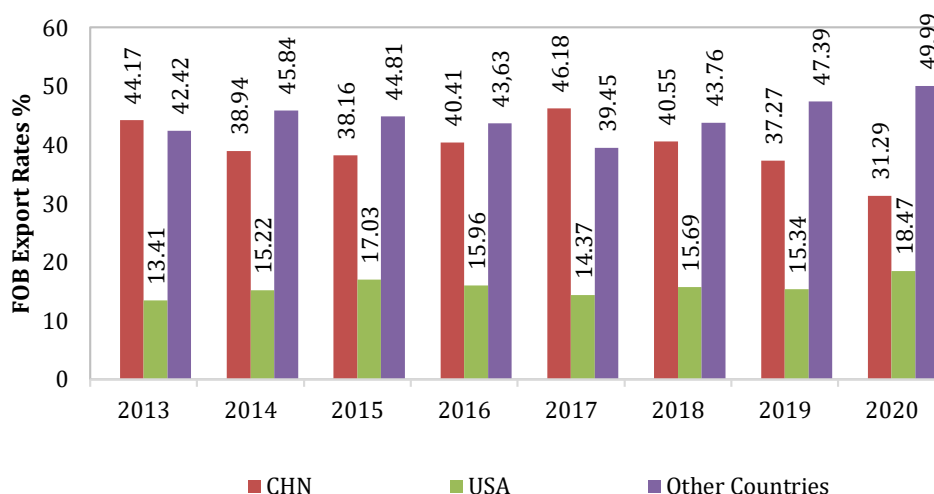


Figure 2. Country shares (FOB) (%) in total natural stone export revenues (Ekincioglu and Akbay, 2021)

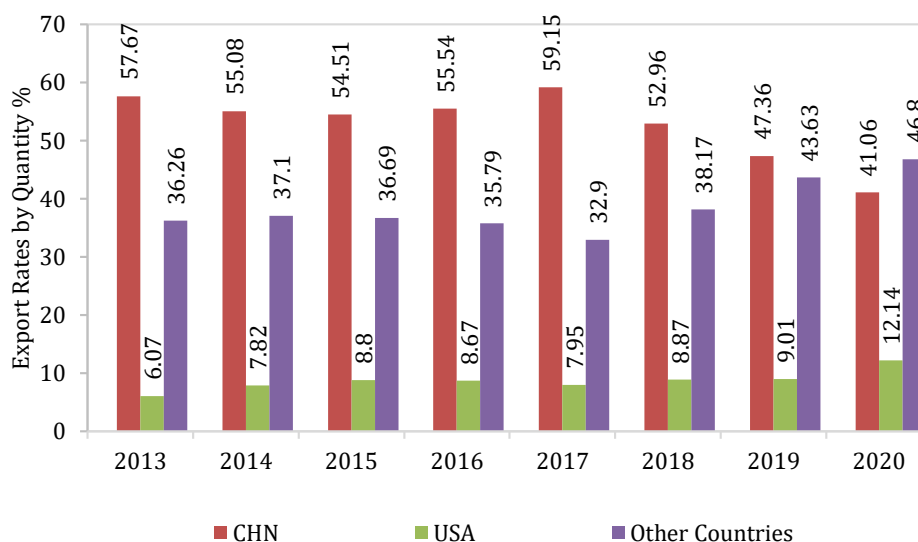


Figure 3. Country shares in total natural stone exports (billion tonnes) (%) (Ekincioğlu and Akbay, 2021)

3. Turkish Natural Stone Export Impact of the Covid-19

How the figures for 2020 belonging to the People's Republic of China and the United States, the two largest markets in the natural stone export market for Turkey, raw blocks and processed products, have changed is given in Table 3. The numbers given in red font in the table represent the decreases in export figures. When the data are examined, it is seen that the natural stone export figures to the People's Republic of China, the center of the pandemic that emerged in December 2019, decreased by around 50% from February 2020. According to the People's Republic of China, natural stone export figures to the United States, where the pandemic reached later, decreased slightly in February 2020, but the decrease in the amount of exports was not felt much on the revenue side due to the rising dollar exchange rate. It is seen that the export figures to the United States have fallen significantly in May 2020. When we look at the data for June 2020, it is seen that the sales amounts close to the data of June 2019 last year were formed although the impact of the pandemic continues to accelerate in the People's Republic of China and United States. This has been interpreted as a strong signal that natural stone exports for Turkey begin the normalization process by June. However, the number of cases that started to increase again in the Covid-19 pandemic, which took effect all over the world in July, has troubled shrinking economies. This situation has led to a continued decline in exports to the People's Republic of China, which operates with high stocks in the natural stone market, takes very drastic measures against the pandemic, and makes closures. Export figures to the United States, whose economy has been severely shrinking, which has started to normalize early due to the election period, and where the measures are not implemented very strictly according to the world as a whole, continued to increase. Natural stone exports to the People's Republic of China decreased by 21% in total in 2020, while exports to the United States increased by 22% (Table 3) (Ekincioğlu and Akbay, 2021).

Table 3. People's Republic of China and United States export data for 2019-2020 (IMIB, 2020)

| Months | 2019 | | | | | | 2020 | | | | | | % Change | | | | | | |
|-----------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|---|
| | China | | | USA | | | China | | | USA | | | China | | | USA | | | |
| | Amount | FOB | Amount | Amount | FOB | Amount | Amount | FOB | Amount | Amount | FOB | Amount | Amount | FOB | Amount | Amount | FOB | Amount | |
| | x103 | x106 \$ | x103 | x103 | x106 \$ | x103 | x103 | x106 \$ | x103 | x103 | x106 \$ | x103 | x103 | x106 \$ | x103 | x103 | x106 \$ | x103 | % |
| January | 289.1 | 56.1 | 50.9 | 22.0 | 44367 | 290.6 | 58.6 | 44211 | 48.7 | 44277 | 1 | 4 | -4 | 5 | 2 | | | | |
| February | 153.6 | 44436 | 47.1 | 44367 | 44367 | 74.4 | 44211 | 49.6 | 44398 | 44398 | -52 | -48 | 5 | 5 | | | | | |
| March | 181.6 | 35.2 | 51.8 | 44217 | 44217 | 101.9 | 44336 | 57.4 | 44463 | 44463 | -44 | -42 | 11 | 18 | | | | | |
| April | 299.1 | 62.2 | 54.3 | 44461 | 44461 | 221.5 | 45.4 | 49.5 | 44306 | 44306 | -26 | -27 | -9 | -11 | | | | | |
| May | 437.6 | 91.3 | 67.8 | 31.2 | 44394 | 181.7 | 36.6 | 46.6 | 44394 | 44394 | -58 | -60 | -31 | -43 | | | | | |
| June | 210.3 | 45.1 | 40.9 | 44272 | 44272 | 192.4 | 39.1 | 67.3 | 44373 | 44373 | -9 | -13 | 64 | 54 | | | | | |
| July | 357.5 | 75.2 | 61.9 | 44254 | 44254 | 280.7 | 57.7 | 79.6 | 32.1 | 32.1 | -21 | -23 | 28 | 18 | | | | | |
| August | 285.4 | 60.6 | 48.7 | 44429 | 44429 | 212.3 | 43.6 | 63.2 | 44373 | 44373 | -26 | -28 | 30 | 22 | | | | | |
| September | 309.6 | 64.7 | 54.4 | 44371 | 44371 | 293.7 | 60.3 | 77.4 | 44439 | 44439 | -5 | -7 | 42 | 29 | | | | | |
| October | 299.7 | 62.2 | 55.5 | 44464 | 44464 | 246.6 | 51.2 | 83.0 | 35.0 | 35.0 | -18 | -18 | 50 | 35 | | | | | |
| November | 298.7 | 61.6 | 54.9 | 44433 | 44433 | 304.1 | 61.9 | 87.5 | 34.2 | 34.2 | 2 | 0.5 | 61 | 33 | | | | | |
| December | 259.9 | 51.8 | 55.2 | 44372 | 44372 | 257.1 | 50.2 | 75.9 | 31.9 | 31.9 | -1 | -3 | 38 | 25 | | | | | |
| Total | 3382.1 | 604.8 | 643.4 | 286 | 286 | 2657 | 540.2 | 785.7 | 325.2 | 325.2 | -21 | -11 | 22 | 14 | | | | | |

Figures 4 and 5 show total natural stone export figures monthly. When the last seven years are examined, it is seen that the natural stone export figures reached their lowest level in February but reached their highest level during the year, both with the opening of the quarries depending on the seasonal effect in May and with the effect of the International İzmir Natural Stone and Technology fair held every year in March. However, with the pandemic effect of 2020, it was seen that natural stone exports were at their lowest level during the year in May. When we look at the data for June 2020, it is seen that the figures were above the sales amounts (tonnes) of June 2019 last year. It is seen that this upward trend continues to spread throughout the year in direct proportion to the normalization process all over the world. It is thought that the amount of exports expected to occur in May 2020 but could not be

realized due to the pandemic had a positive effect on the figures in the remaining six months of 2020 as "Hidden May Export Amount" (Ekincioglu and Akbay, 2021).

Table 4. Natural stone exports on a monthly basis by year (FOB million \$) (IMIB, 2020)

| Months | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| January | 169.10 | 197.28 | 137.35 | 129.40 | 128.64 | 150.85 | 139.06 | 151.48 |
| February | 114.54 | 128.85 | 114.62 | 103.81 | 118.23 | 119.46 | 115.52 | 108.17 |
| March | 132.58 | 147.41 | 117.07 | 127.94 | 138.37 | 139.39 | 122.26 | 116.20 |
| April | 184.56 | 203.57 | 175.93 | 168.57 | 182.96 | 172.23 | 160.16 | 117.96 |
| May | 231.87 | 222.65 | 183.60 | 173.36 | 219.84 | 197.70 | 215.49 | 101.51 |
| June | 205.64 | 201.99 | 199.40 | 167.87 | 199.18 | 166.48 | 114.09 | 134.60 |
| July | 223.37 | 183.71 | 185.48 | 128.14 | 173.72 | 177.11 | 184.71 | 176.14 |
| August | 179.21 | 163.59 | 168.87 | 186.69 | 201.41 | 142.79 | 150.80 | 134.75 |
| September | 207.74 | 191.08 | 150.79 | 153.18 | 152.35 | 157.71 | 168.55 | 172.76 |
| October | 183.72 | 150.87 | 155.89 | 161.15 | 182.65 | 176.55 | 167.89 | 180.45 |
| November | 199.31 | 160.88 | 159.81 | 156.82 | 190.58 | 167.57 | 164.57 | 179.51 |
| December | 190.74 | 176.34 | 157.44 | 148.59 | 160.16 | 140.45 | 161.15 | 163.48 |
| Total | 2222.38 | 2128.22 | 1906.25 | 1805.52 | 2048.09 | 1908.29 | 1864.25 | 1737.01 |

Table 5. Natural stone exports of Turkey on a monthly basis by year ($\times 10^3$ tonnes) (IMIB, 2020)

| Months | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January | 660 | 716 | 440 | 475 | 476 | 594 | 553 | 573 |
| February | 399 | 406 | 338 | 325 | 426 | 444 | 410 | 328 |
| March | 463 | 453 | 330 | 431 | 503 | 506 | 437 | 386 |
| April | 707 | 699 | 590 | 609 | 730 | 668 | 630 | 437 |
| May | 982 | 811 | 642 | 625 | 853 | 796 | 845 | 395 |
| June | 798 | 709 | 721 | 593 | 794 | 651 | 435 | 494 |
| July | 843 | 664 | 622 | 448 | 673 | 685 | 717 | 662 |
| August | 655 | 577 | 586 | 691 | 778 | 562 | 580 | 498 |
| September | 772 | 707 | 561 | 595 | 593 | 626 | 653 | 668 |
| October | 704 | 531 | 532 | 603 | 718 | 704 | 629 | 667 |
| November | 754 | 544 | 576 | 594 | 753 | 683 | 641 | 721 |
| December | 699 | 553 | 578 | 529 | 638 | 542 | 610 | 640 |
| Total | 8436 | 7370 | 6516 | 6518 | 7935 | 7461 | 7140 | 6469 |

4. Grey Prediction Model

Grey System Theory (GST) was proposed by Professor J. Deng in 1982 with titled as "Control Problems of Grey Systems" that was the first study in this field. The GST applications were started to use for many real-life systems such as social, economic, and technical systems since 1989 (Deng, 1989). On the other hand, the GST has many research fields as clustering, incidence analysis, relational analysis, system modelling, decision making, input-output analysis, control process etc. (Liu and Lin, 2006). According to progress of GST, it has applied as an effective and powerful tool in many of the academic and industrial studies are scientific and technological, industrial, mechanical, robotics, mechatronics, transportation, financial, military systems on transforming of cybernetics and, also natural events and sources as meteorological, agricultural, ecological, hydrological, geological, biomedical, mining etc. under grey uncertainties (Liu et al., 2016; Liu, Yang, Forrest, 2017).

Grey system modelling (GM) is a prediction tool using the historical data at least four. GM (1,1) denotes a one-order one-variable grey difference prediction model. Then, the GM (1,1) model has more advantages over the traditional prediction methods. It does not need to any distribution and statistical sample. In addition, it uses an Accumulation Generation Operator (AGO) for smoothing the randomness on the primitive data and an Inverse Accumulation Generation Operator (IAGO) for finding the predicted values (Liu, Yang, Forrest, 2017; Yang et al.,

2018). In the recent scientific literature, grey prediction and forecasting methods are applied in many studies both theoretical and practical modelling (Hsu and Chen, 2003; Ding et al., 2018; Akay and Atak; 2007; Kayacan et al., 2010; Aydemir et al., 2013; Hamzaçebi and Es, 2014; Wei et al., 2019; Liu and Xie, 2019; Carmona-Benítez and Nieto; 2020; Zhu et al., 2021).

4.1. The GM (1,1) Modelling

The modelling process of GM (1,1) is given as follows (Liu et al., 2017; Yang et al., 2018):

Step 1. Conduct the original time series data

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad [1]$$

where $x^{(0)}(t) \geq 0$, $t = 1, 2, \dots, n$.

Step 2. Establish the 1-AGO (first-order accumulating generation operator) time series data

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad [2]$$

where $x^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^t x^{(0)}(i)$, $t = 1, 2, \dots, n$.

Step 3. Obtain the $Z^{(1)}$ row data that is called mean sequence of $X^{(1)}$ generated by consecutive neighbors

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\} \quad [3]$$

where $z^{(1)}(t) = \alpha \cdot x^{(1)}(t) + (1 - \alpha) \cdot x^{(1)}(t - 1)$, $t = 2, \dots, n$, $\alpha = 0.5$ in general as the even form of model GM (1, 1). The original form of grey prediction equation is given as a difference equation:

$$x^{(0)}(t) + a \cdot x^{(1)}(t) = b \quad [4]$$

Then, after the Step 3, the original form of GM (1,1) is represented as the even form of GM (1,1) model that is given as follows:

$$x^{(0)}(t) + a \cdot z^{(1)}(t) = b \quad [5]$$

where $\hat{a} = [a, b]^T$ parameter values are estimated using the least square method which satisfies

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad [6]$$

where

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad [7]$$

Step 4. Obtain the accumulating prediction equation as a time response function.

$$\hat{x}^{(1)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}) \cdot e^{-a(t-1)} + \frac{b}{a}, t = 1, 2, \dots, n. \quad [8]$$

Step 5. Obtain the prediction equation using 1-IAGO (first-order inverse accumulating generation operator).

$$\hat{x}^{(0)}(t) = (1 - e^a) \cdot (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}) \cdot e^{-a(t-1)}, t = 1, 2, \dots, n. \quad [9]$$

4.2. Error Analysis

The prediction and/or forecasting studies need to be compared with the higher imprecision level. So, essential accuracy measurement approaches which are the Mean Squared Error (MSE), the mean absolute error (MAE), and the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) are the most widely used. However, according to Chatfield (1988), MSE and MAE can often be major variations in the scale of the observations between the different time series so that a few series with large values can dominate the comparisons. At this phase, MAPE is mostly employed method as needing the unit free measures. The forecasting error at time (e_t) can be defined as follows (Goodwin and Lawton, 1999):

$$e_t = A_t - F_t, t = 1, 2, \dots, n \quad [10]$$

where A_t is the actual observation value and F_t is also the forecasted/predicted value for period t . Thus, the Percentage Error (PE) and the Absolute Percentage Error (APE) can be calculated as respectively.

$$PE_t = \frac{A_t - F_t}{A_t} \cdot 100 \quad [11]$$

$$APE_t = \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \cdot 100 \quad [12]$$

So, the MAPE calculation is given as follows in Equation 13.

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n APE_t}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \cdot 100}{n} \quad [13]$$

In addition, Makridakis (1993) has presented some disadvantages of MAPE value, for a greater APE, the equal errors above the actual observation than those below the actual value. So, the modified APE (Makridakis,1993) and the smoothed APE (O'Connor et al., 1997) are developed respectively. However, in this study, besides using MAPE, for residual correction, posterior error ratio (C) are also used to test the accuracy of GM (1, 1). The posterior error ratio (C) can be calculated as (Yang et al., 2018):

$$C = S_e / S_x \quad [14]$$

where S_e is the residual standard deviation and S_x is the data standard deviation are given as follows:

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (e^0(t) - e)^2} \quad [15]$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x^0(t) - x)^2} \quad [16]$$

Consequently, the adequacy levels of prediction accuracy for GM (1,1) are classified with four levels to MAPE and C measures in Table 6 which is modified from Lewis (1982) and Yang et al. (2018).

Table 6. Adequacy levels of prediction accuracy for GM (1,1)

| Prediction accuracy grades | MAPE | C |
|----------------------------|-----------|------------|
| 1 Excellent | ≤ 10 | $\leq .35$ |
| 2 Qualified | ≤ 20 | $\leq .50$ |
| 3 Barely Qualified | ≤ 50 | $\leq .65$ |
| 4 Unqualified | > 50 | $> .65$ |

4.3. Computational Results

In this paper, the Covid-19 pandemic effects on the natural stone export values of Turkey from Table 1 in 2020 and grey forecasting model to 2021 are examined by showing model accuracy evaluations in Table 7. Two forecasting models are developed which are titled as Grey Model 1 (GM1) and Grey Model 2 (GM2). GM1 model has established by the years of 2013-2019 row data and then, for the year of 2020, the predict values are obtained by monthly using Equation 17 with 7.88 MAPE value of the whole model.

$$\frac{dx}{dt} - 0.0124253 * x = 6788.2876659 \quad [17]$$

On the other hand, GM2 model has been established by the years 2013-2020 row data including pandemic year, and then, for the year of 2021, the forecast values are obtained by monthly using Equation 18 with 3.34 MAPE value of the whole model. The observed total value of export for the years 2013-2020 is obtained as 57845×10^3 tonnes and the predicted total value of export for the years 2013-2020 is also obtained as 55912.55×10^3 tonnes.

$$\frac{dx}{dt} + 0.0025317 * x = 7142.5154436 \quad [18]$$

Table 7. Computational results on a monthly basis by year ($\times 10^3$ tonnes)

| Months | Grey Model 1 | | | Grey Model 2 | |
|-----------|---------------|------------------------|---------|------------------------|------|
| | Observed 2020 | Predicted 2020 | APE (%) | Forecasted 2021 | |
| January | 573 | 569.32 | 0.64 | 541.99 | |
| February | 328 | 399.71 | 21.86 | 371.56 | |
| March | 386 | 454.26 | 17.68 | 423.86 | |
| April | 437 | 673.90 | 54.21 | 612.42 | |
| May | 395 | 807.87 | 104.52 | 718.59 | |
| June | 494 | 683.79 | 38.42 | 627.52 | |
| July | 662 | 676.66 | 2.22 | 641.89 | |
| August | 498 | 644.23 | 29.36 | 595.14 | |
| September | 668 | 655.57 | 1.86 | 625.10 | |
| October | 667 | 643.06 | 3.59 | 614.59 | |
| November | 721 | 661.10 | 8.31 | 636.09 | |
| December | 640 | 603.50 | 5.70 | 578.47 | |
| Total | 6469 | 7472.97 | 288.38 | 6987.22 | |
| | | MAPE ²⁰²⁰ | 24.03 | | |
| | | MAPE ^{MODEL1} | 7.88 | MAPE ^{MODEL2} | 3.34 |
| | | C | 0.23 | | |

According to Table 7, GM1 model has been included the pandemic effects. The months of Feb-Jun and Aug have a very large deviation. So, the prediction results for the year of 2020 are obtain the 24.03 MAPE value against the whole model which has 7.88 MAPE value for the years of 2013-2019. The GM1 results show that the pandemic effects are very disruptive on the natural stone export values in grey highlighted cells. Then, GM2 model deals with forecasting values that are given in Table 7 and Figure 4 for the year 2021.

Within the scope of the study, an export forecast was made for 2021 using data from 2013-2020 and given in Table 7. When the estimated export figures for 2020 are examined, it is seen that the impact of the pandemic, which started in December 2019, began to affect the export figures expected to be as of February and started to fall below the expected values for 2020. The difference was 72000 tonnes for February, 68000 tonnes in March, 237000 tonnes in April, and 413000 tonnes in May. Although there was a decrease in the difference between June and July due to the effect of the normalization process in June, it was 146000 tonnes in August. With the export normalization process that did not occur in the first eight months of 2020, export figures were formed above the forecast values by spreading over the last four months.

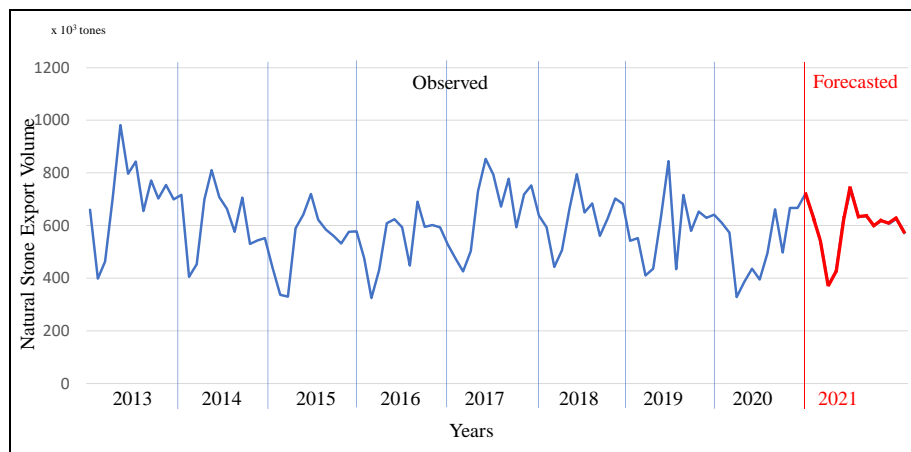


Figure 4. The observed (2013-2020) and forecasted data (2021)

The forecasted data has obtained from GM2 model using Equation 18 and for the year 2021, it is important to continue the Covid-19 pandemic times and their effects on the industries. So, GM2 model has 3.34 MAPE value that is excellent forecasting accuracy with 0.23 C value from Tables 6-7.

5. Discussion and Conclusion

As is known, the Covid 19 pandemic was first seen in the People's Republic of China and affected both the People's Republic of China and all countries, especially our country, with which it has a trade relationship. The two countries most affected by the pandemic in the world were the People's Republic of China and the United States. The People's Republic of China, which covers 32% in exports, and the United States, which has a 15% share, account for 52% of our natural stone exports. Turkish natural stone industry has been greatly affected by the fact that the People's Republic of China and the United States, are the central two countries of the pandemic. When the export figures for 2020 are analyzed, it is seen that the highest loss occurred in May. In this period, there was a decrease of 52% in exports to the People's Republic of China and 31% in exports to the USA. In the rest of the year, the figures that emerged with the normalization process were higher than the previous year.

When the Covid-19 pandemic process and the export figures for 2020 are examined, it is clear that a period of memorization has been entered for the coming years. Turkey, which entered 2019 successfully, has negatively affected the natural stone industry, as the industry has remained dependent on the two countries to date and these countries are the countries most affected by the pandemic. Considering that the GM (1,1) forecasts for 2021 with excellent accuracy are below 2019, it is thought that future planning should be made in managerial decisions.

It will be through institutionalization that Turkish natural stone companies can be more competitive both in the country and in the world market. The way to have a stronger structure before the pandemics, political, etc. that may occur after this will be through institutionalization. There are a few companies in the industry that make an effort in this regard and try to gain brand value, and they have begun to get rewarded for their steps in this process. It has been understood during the pandemic that it is no longer possible to catch up with the future with classical commercial methods. Digital fairs and digital showcases will play an important role in achieving greater goals. Companies should participate in such fairs and prepare the necessary technology infrastructure. The pandemic process has shown that, as in other industries, new markets must be found, and alternatives must be created in the natural stone industry. As observed in this difficult period, the industry is affected as much as the rate at which your biggest buyer is affected by any crisis. Dividing the risk with alternative markets will strengthen the industry economically.

It is thought that the Turkish natural stone industry will enter the coming years stronger with the review of the issues that are tried to be emphasized in this study. Increasing the number of companies that have completed their institutionalization and branding in the light of science and technology and reaching new markets with new distance marketing techniques will make the industry less affected by any crisis. As a further research, the roadmap of the sector should be updated every year by developing these forecasting models and making new forecasts every year.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Adgüzel, M., Şengüler, M., 2019. Investigation of Turkish Marble Sector and its Competitive Power. *Third Sector Social Economic Review*, 54 (3), 1530-1546.
- Akay, D., Atak, M., 2007. Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey. *Energy*, 32 (9), 1670-1675.
- Aydemir, E., Bedir, F., Ozdemir, G., 2013. The Grey System Approaches for Demand Forecasting. *Journal of Trends in Development of Machinery and Associated Technology*, 17 (1), 105-108.
- Başol, K., Durman, M., Çelik, M.Y., 2005. Leading of Development Process; Natural Process. *Journal of Social Sciences and Humanities Researches*, 14, 61-71.
- Carmona-Benítez, R.B., Nieto, M.R., 2020. SARIMA damp trend grey forecasting model for airline industry. *Journal of Air Transport Management*, 82, 101736.
- Chatfield, C., 1988. Apples, oranges and mean squared error. *International Journal of Forecasting*, 4, 515-518.
- Deng, J., 1989. Introduction to grey system theory. *Journal of Grey System*, 1, 1-24.
- Ding, S., Hipel, K.W., Dang, Y.G., 2018. Forecasting China's electricity consumption using a new grey prediction model. *Energy*, 149, 314-328.

- Ekincioglu, G., Akbay, D., 2021. Değerlendirme: 2020 Yılı Türkiye Doğal Taş Sektörü. Türkiye 11. Uluslararası Mermer ve Doğal Taş Kongresi ve Sergisi, 10-11 Aralık 2021, s. 127-136, Diyarbakır.
- Goodwin, P., Lawton, R., 1999. On the asymmetry of the symmetric MAPE. *International Journal of Forecasting*, 15 (4), 405-408.
- Hamzaçebi, C., Es, H.A., 2014. Forecasting the annual electricity consumption of Turkey using an optimized grey model. *Energy*, 70, 165-171.
- Hsu, C.C., Chen, C.Y., 2003. Applications of improved grey prediction model for power demand forecasting. *Energy Conversion and management*, 44 (14), 2241-2249.
- IMIB (Istanbul Mineral Exporters Association), 2021, Mineral Export Reports by Product Groups or Countries on a Monthly Basis, available at: <https://www.IMIB.org.tr/tr/raporlar/ihracat-istatistikleri> (accessed 01 March 2021)
- Kayacan, E., Ulutaş, B., Kaynak, O., 2010. Grey system theory-based models in time series prediction. *Expert systems with applications*, 37 (2), 1784-1789.
- Kocaman, F., 2006. Natural Stone Sector and Marketing Strategies, Master Thesis, Dumlupınar University, Kütahya, Turkey.
- Lewis, C.D., 1982. *Industrial and business forecasting methods*, London: Butterworths.
- Liu, S., Lin, Y., 2006. *Grey Information*, London: Springer-Verlag.
- Liu, S., Yang, Y., Forrest, J., 2017. *Grey Data Analysis: Methods, Models and Applications*, Singapore: Springer.
- Liu, S., Yang, Y., Xie, N.F., 2016). New progress of grey system theory in the new millennium. *Grey Systems: Theory and Application*, 6 (1), 2-31.
- Liu, X., Xie, N., 2019. A nonlinear grey forecasting model with double shape parameters and its application. *Applied Mathematics and Computation*, 360, 203-212.
- Makridakis, S., 1993. Accuracy measures: theoretical and practical concerns. *International Journal of Forecasting*, 9, 527-529.
- O'Connor, M., Remus, W., Griggs, K., 1997. Going up-going down: how good are people at forecasting trends and changes in trends? *Journal of Forecasting*, 16, 165-176.
- TCKB (TR Ministry of Development), 2018. Eleventh Development Plan (2019-2023) Mining Policies Specialization Commission Report, Ankara, Turkey, Kb: 3041 - JMC: 822.
- Wei, B.L., Xie, N.M., Yang, Y.J., 2019. Data-based structure selection for unified discrete grey prediction model. *Expert Systems with Applications*, 136, 264-275.
- Yang, X., Zou, J., Kong, D., Jiang, G., 2018. The analysis of GM (1, 1) grey model to predict the incidence trend of typhoid and paratyphoid fevers in Wuhan City, China. *Medicine*, 97 (34), e11787.
- Zhu, X., Dang, Y., Ding, S., 2021. Forecasting air quality in China using novel self-adaptive seasonal grey forecasting models. *Grey Systems: Theory and Application*, 11 (4), 596-618.



TI-6AL-4V SICAK İŞLENMESİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Levent UĞUR*

Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kesme Kuvveti,
Sıcaklık,
Sıcak İşleme,
Sonlu Elemanlar Yöntemi,
Ti-6Al-4V.

Öz

Sıcak işleme olarak bilinen ısı destekli işleme, kesilmesi zor metallerin ve alaşımların işlenebilirliğini artırmak için alternatif bir işleme yöntemidir. Bu çalışma, endüstride yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının sıcak işlenmesinde kesme kuvvetlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesini içermektedir. İşleme deneyleri sonlu elemanlar analiz yazılımı olan ThirdWave AdvantEdge programında yapılmıştır. Bu analizlerde sabit kesme derinliğinde, kesme hızı (V), ilerleme hızı (f), ve sıcaklık parametreleri üçer seviye olarak belirlenmiştir. Deney listesi Taguchi L_9 ortagonal dizilim ile oluşturulmuştur. L_9 deney tasarımına göre kesme kuvvetleri değerleri kaydedilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarına göre oda sıcaklığı koşullarının sıcak işleme koşullarına göre karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri 600°C sıcak işleme şartlarında gerçekleştirilen sayısal analizlerde ölçülmüştür.

EXAMINATION OF THE EFFECTS ON THE HOT MACHINING OF TI-6AL-4V WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

Keywords

Cutting Force,
Temperature,
Hot Machining,
Finite Element Method,
Ti-6Al-4V.

Abstract

Heat assisted machining, known as hot machining, is an alternative machining method to increase the machinability of hard-to-cut metals and alloys. This study includes the investigation of cutting forces in hot working of Ti-6Al-4V alloy, which is widely used in the industry, by finite element method. Processing experiments were performed with ThirdWave AdvantEdge, the finite element analysis software. Analyzes were determined at constant depth of cut, cutting speed (V), feed rate (f), and temperature parameters were determined as three levels. Experiment list was created with Taguchi L_9 orthogonal array. Cutting forces values were recorded according to the L_9 experimental design. According to the results of the numerical analysis, it was observed that the cutting forces decreased when the room temperature conditions were compared with the hot machining conditions. The lowest cutting force value was measured in numerical analyzes carried out at 600°C hot machining conditions.

Alıntı / Cite

Uğur, L., (2022). Ti-6al-4v Sıcak İşlenmesi Üzerine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 532-537.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

L.Uğur, 0000-0003-3447-3191

Makale Süreci / Article Process

| | |
|----------------------------------|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 20.10.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 19.12.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 19.12.2021 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Talaşlı imalat, istenilen şekil ve boyutu üretmek için iş malzemesinden istenmeyen malzemeyi uzaklaştıran bir kesme işlemidir (Kalpakjian, 2001). Günümüzde çeliklerin tornalama, frezeleme ve delme gibi işleme süreçleri talaşlı imalat endüstrilerinde önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemlerden en çok kullanılan işleme yöntemlerinden biri tornalamadır (Sahoo, Rout, & Das, 2015). Talaşlı imalatla sıklıkla kullanılan malzemelerden biri de titanyum

* İlgili yazar / Corresponding author: levent.ugur@amasya.com, +90-358-260 00 68 (1483)

alaşımalarıdır. Titanyum alaşımları, mükemmel mekanik özellikleri, yüksek korozyon ve kırılma direncine sahip olduğu için havacılık, nükleer, biyomedikal ekipman ve otomobil sektörlerinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir (Ma, Andrus, Condoor, & Lei, 2015; Ulutan & Ozel, 2011). Bahsedilen bu özelliklerden dolayı titanyum alaşımları geleneksel yöntemler ile işlenirken kesici kenar üzerinde yüksek sıcaklık ve basınç meydana gelmekte bu da takım ömrünü kısalmaktadır (Rashid, Birmingham, Sun, Wang, & Dargusch, 2013). Titanyum mekanik özelliklerinden dolayı avantajlı olsa da, talaşlı imalat endüstrileri için büyük zorluklar taşımaktadır (Smith, Schukken, & Gröhn, 2015).

Bu tür kesilmesi zor malzemelerin ve alaşımların işlenmesinde sıcak işleme veya ısı destekli işleme en etkili yollardan biridir. Sıcak işleme veya ısı destekli işleme prosesleri bir ısı kaynağı kullanılarak (gaz alevi, plazma ark, elektrik arkı, indüksiyon ısıtma, fırın ısıtma ve lazer ısıtma) malzemesinin kesme mukavemetini azaltmaktır (Ginta & Amin, 2013; Sun, Brandt, Barnes, & Dargusch, 2011; Upadhyay, Jain, & Mehta, 2013). Bu yöntemlerin her birinin kendisine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Sıcak işleme teknikleri talaşlı imalatta genellikle tornalama ve frezelemede kullanılmaktadır (Sofuoğlu, Çakır, Gürgen, Orak, & Kuşhan, 2018).

Literatürde kesilmesi zor malzemelerin işlenmesinde sıcak işlemenin kullanılmasını araştıran çeşitli makaleler bulunmaktadır. Zamani ve diğerleri, Ti6Al4V alaşımının lazer destekli kenar frezelemesinin sayısal ve deneysel araştırmasını incelemişlerdir. Lazerle ısıtma işlemi ile ve lazerle ısıtma olmadan kesme kuvvetini tahmin etmek için bir 3D modelleme yapılmıştır. Simülasyon için Johnson-cook malzeme modeli kullanılarak ve lazerle ısıtmanın kesme kuvvetini ve takım aşınmasını azalttığını bulmuşlardır (Zamani, Hermani, Sonderegger, & Sommitsch, 2012). Akasawa ve ark., sert çeliğin sıcak işlenmesi için elektrikli ısıtma kullanılarak kesilmesini, soğutulmuş kesici takım ile kesilmesini araştırmışlardır. Çeşitli takım malzemelerinin sıcak işleme testinde takım malzemesinin oksidasyon testi ve takım soğumasının etkisi incelenmiştir (Akasawa, Takeshita, & Uehara, 1987). İşlenebilirliği artırmak için plazmanın bir ısıtma kaynağı olarak kullanılması farklı araştırmacılar tarafından da incelenmiştir (Leshock, Kim, & Shin, 2001). Elkhateeb ve ark. Ti6Al4V/TiC kompozitlerin kesimine lazer ısıtmayı dahil etmişlerdir. İş parçasının azaltılmış yük transfer kapasitesi nedeniyle, normal ve teğetsel kuvvetler sırasıyla %78 ve %37 oranında azaltılmasının yanında takım aşınmasının da %68 oranında azaltıldığı görülmüştür (Elkhateeb & Shin, 2019). Diğer bir çalışmada, minimum miktarda yağlama ile Ti6Al4V alaşımının lazer destekli işlenmesinde, geleneksel işleme göre takım aşınmasının %49,1 yüzey pürüzlülüğünün ise %33,7 azaldığı kaydedilmiştir (Luan et al., 2021). Muhammed ve arkadaşları, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile sıcak delmeyi incelemişlerdir. Geleneksel delme ile karşılaştırıldığında, yüksek bir sıcaklıkta tork ve itme kuvvetinde azalma gözlemlenmiştir (Muhammad, Ahmed, Shariff, & Silberschmidt, 2012). Talaşlı imalatta sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır (Alatrushi, Bedir, & Yılmaz, 2020; Karagüzel, 2019; A. Parida & Maity, 2016; A. K. Parida & Maity, 2019; Ugur, 2019; Uğur & Kazan, 2020).

Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında sıcak işlemeyle ilgili deneysel ve sayısal çeşitli çalışmaların olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, kesme kuvveti açısından titanyum 6Al-4V ELI (grade 5) alaşımının sıcak işlenebilirliğinin sayısal olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Deney tasarımı olarak Taguchi L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Kesme kuvveti için optimum kesme parametreleri Taguchi analizi ile belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material And Method)

Bu çalışmada havacılık, nükleer, biyomedikal ekipman ve otomobil sektörlerinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı \varnothing 30 mm boyutlarında seçilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırası ile Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ti-6Al-4V kimyasal bileşimi (Chemical composition of Ti-6Al-4V)

| Element | Al | V | C | Fe | Si | O | Fe | Ti |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| % | 5.50 | 3.50 | 0.08 | 0.30 | 0.05 | 0.20 | 0.30 | Balance |

Tablo 2. Ti-6Al-4V Termo mekanik özellikleri (Thermo mechanical properties of Ti-6Al-4V) (Pan, Liang, Garmestani, & Shih, 2016)

| Properties | Ti-6Al-4V |
|------------------------------|---|
| Young's modulus (MPa) | 0.714T + 113.34*103 |
| Density (kg/m ³) | 4430 |
| Poisson's ratio | 0.34 |
| Heat capacity (J/kg °C) | 50.564exp(0.0007T) |
| Conductivity (W/(m °C)) | 7.039exp(0.0011T) |
| Expansion (µm/(m °C)) | 3*10 ⁻⁹ + 7*10 ⁻⁶ |

Talaşlı imalat simülasyonlarında, yüksek seviyedeki plastik gerinim, gerinim oranı ve sıcaklığa bağlı olarak iş parçalarında deformasyon meydana gelmektedir. Bu nedenle iş parçalarının gerilme-şekil değiştirme davranışı tanımlanırken gerinim hızına, iş sertleşmesine ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme modelleri kullanılmaktadır (Rao, Dandekar, & Shin, 2011; Shrot & Bäker, 2012). Bu çalışmada, iş parçasının mekanik davranışını tanımlamak için Johnson-Cook akma yüzeyi oluşturucu malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli, iş parçasının akış gerilimi için eşitlik 1'de olduğu gibi kullanılmaktadır.

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastic}} \underbrace{\left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right]}_{\text{Thermal Softening}} \quad (1)$$

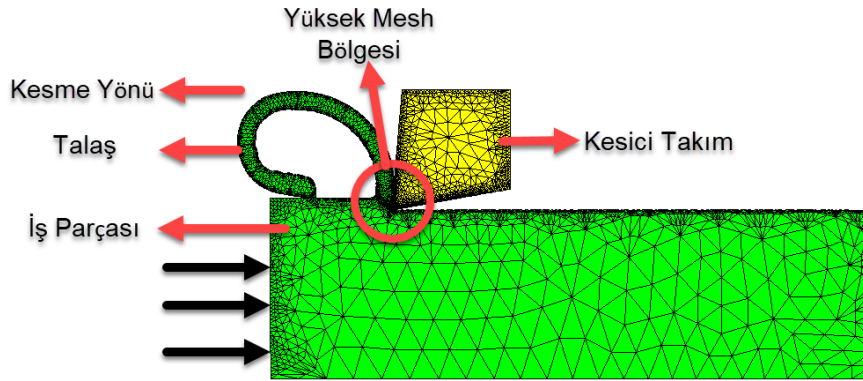
AdvantEdge™, aşağıdaki denklemde Coulomb sürtünmesi tarafından tanımlanan bir sürtünme katsayısı kullanır:

$$F_f = \mu F_n \quad (2)$$

Tornalama işleminin sayısal analizi (tornalama simülasyonları) Third Wave AdvantEdge® yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde sabit 1mm kesme derinliğinde 2B orthogonal kesme ve Lagrange yöntemleri kullanılmıştır. Kesme parametreleri üretici firma katalogları ve önceki çalışmalardan alınarak oluşturulmuştur. Belirlenen kesme parametreleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Tüm deneyler için takım talaş açısı (γ) -6° , Boşluk açısı (α) 6° , Kenar yarıçapı (r) 0.02 uygulanmıştır. İş parçası ve kesici takım ağ yapısı, maksimum takım elemanı boyutu 0,1 mm, minimum takım elemanı boyutu 0,02 mm ve ağ 0,4 mm olarak modellenmiştir. Şekil 1'de oluşturulan kesme modeli görülmektedir.

Tablo 3. Kesme parametreleri ve seviye değerleri (Cutting parameters and level values)

| Kesme parametreleri | | Seviye | | |
|---------------------------|---|----------|--------|-----------|
| | | Düşük -1 | Orta 0 | Yüksek +1 |
| Sıcaklık (°C) | T | 30 | 300 | 600 |
| Kesme Hızı (m/dk) | V | 50 | 75 | 100 |
| İlerleme Miktarı (mm/dev) | f | 0.20 | 0.35 | 0.50 |



Şekil 1. Ortogonal işleme modeli (Orthogonal machining model)

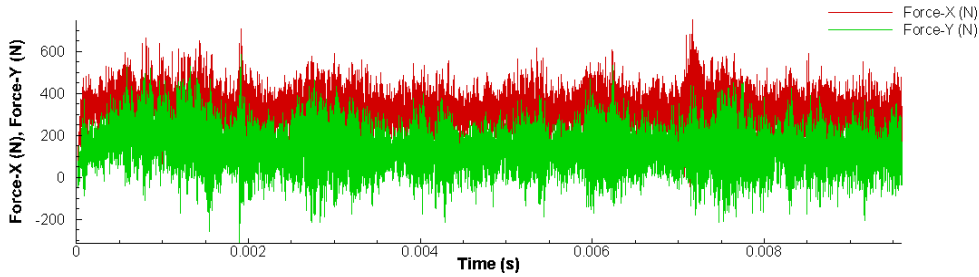
3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu bölümde analizler sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin; Taguchi L9 ve ANOVA kullanılarak, etkin ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesine yer verilmiştir. Taguchi metodunda en iyi kesme kuvveti değeri için gerekli olan optimum kesme parametreleri için en küçük en iyi sinyal gürültü oranı denklemi kullanılmıştır. MINITAB 19 programında en küçük en iyi denklemi kullanılarak S/N oranları, seviye değerleri hesaplanmıştır. Bu denklemin sonucuna göre elde edilen S/N oranları Tablo 4'te verilmiştir.

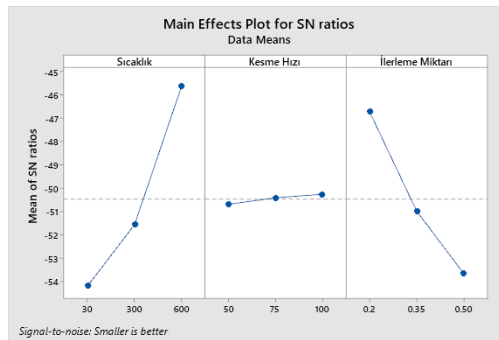
Tablo 4. Deney listesi ve analiz sonuçları (Experiment list and analysis results)

| Deney No | Sıcaklık (°C) | Kesme Hızı (m/dk) | İlerleme Miktarı (mm/dev) | Kesme Kuvveti (N) | S/N |
|----------|---------------|-------------------|---------------------------|-------------------|----------|
| 1 | -1 (30) | -1 (50) | -1 (0.2) | 336,4064 | -50,5373 |
| 2 | -1 (30) | 0 (75) | 0 (0.35) | 546,5774 | -54,753 |
| 3 | -1 (30) | +1 (100) | +1 (0.50) | 735,8981 | -57,3364 |
| 4 | 0 (300) | -1 (50) | 0 (0.35) | 419,1479 | -52,4473 |
| 5 | 0 (300) | 0 (75) | +1 (0.50) | 534,5212 | -54,5593 |
| 6 | 0 (300) | +1 (100) | -1 (0.2) | 242,3962 | -47,6905 |
| 7 | +1 (600) | -1 (50) | +1 (0.50) | 285,7079 | -49,1184 |
| 8 | +1 (600) | 0 (75) | -1 (0.2) | 125,2875 | -41,9582 |
| 9 | +1 (600) | +1 (100) | 0 (0.35) | 194,5353 | -45,78 |

AdvantEdge yazılımında yapılan analizler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri grafiği Şekil 2'de gösterilmektedir.

**Şekil 2.** Analizler sonucu elde edilen kesme kuvveti grafiği (The cutting force graph obtained as a result of the analysis.)

Analizler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri S/N oranının elde edilen yanıt grafikleri Şekil 3'de verilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde kesme hızının S/N oranına etkisi sıcaklık ve ilerleme miktarına göre daha düşüktür. Buna ilaveten 300-600° aralığındaki etkinin 30-300° sıcaklık değişimine göre daha etkili olduğu gözlemlenmektedir. Benzer şekilde 0.2-0.35 mm/dev ilerleme hızı aralığındaki değişkenliğin yüksek devirdeki değişkenlikten daha büyük etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetleri açısından incelendiğinde optimum kesme sıcaklığının 600° kesme hızı 100 m/dk, ilerleme hızı 0,20 mm/dev olarak belirlenmiştir.

**Şekil 3.** En küçük en iyi S/N oranına göre proses parametrelerinin kesme kuvveti üzerine etkisi (Effect of process parameters on cutting force according to smallest best S/N ratio)

Elde edilen S/N oranının kesme kuvveti için tepki tablosu Tablo 5'te verilmiştir. Tablo kesme kuvveti açısından incelendiğinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu görülmektedir. Sıcaklığı sırasıyla ilerleme miktarı ve kesme hızı takip eder.

Tablo 5. Sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu (Response table for signal-to-noise ratios.).

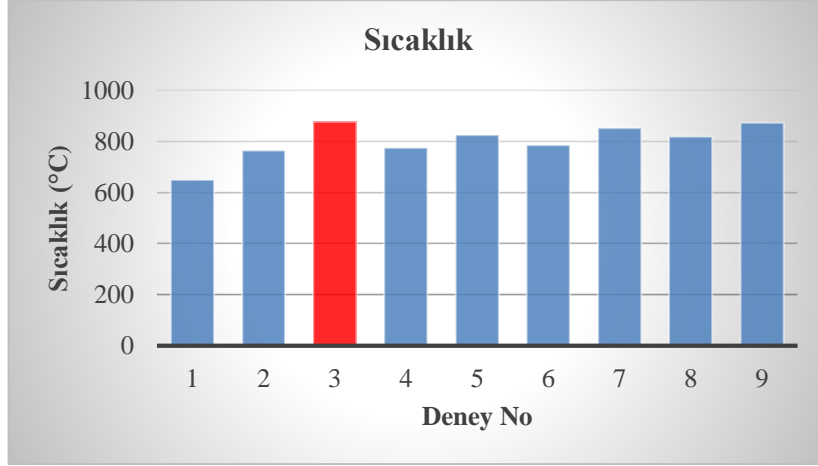
| Seviye | Sıcaklık | Kesme Hızı | İlerleme Miktarı |
|--------|----------|------------|------------------|
| 1 | -54,21 | -50,70 | -46,73 |
| 2 | -51,57 | -50,42 | -50,99 |
| 3 | -45,62 | -50,27 | -53,67 |
| Delta | 8,59 | 0,43 | 6,94 |
| Rank | 1 | 3 | 2 |

Yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen ANOVA değerleri Tablo 6'da gösterilmektedir. Tablolardaki p değerlerinin <0,05 olması bu model için anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Anova sonuçları (Anova results)

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Regression | 6 | 205,092 | 34,1820 | 30,29 | 0,032 |
| Sıcaklık | 2 | 122,813 | 61,4063 | 54,41 | 0,018 |
| Kesme Hızı | 2 | 0,651 | 0,3253 | 0,29 | 0,776 |
| İlerleme Miktarı | 2 | 81,629 | 40,8146 | 36,17 | 0,027 |
| Error | 2 | 2,257 | 1,1286 | | |
| Total | 8 | 207,349 | | | |

Ayrıca analizler sonucunda tornalama işleminde elde edilen sıcaklıklar Şekil 4'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerinin 3 nolu deneyde elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 4.** Sıcaklık sonuçları (Temperature results)

4. Sonuçlar (Results)

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V'nin sıcak işlenmesinin kesme kuvvetlerinin değişimi sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Analizler farklı kesme parametrelerine göre Taguchi L9 ortogonal deney listesine kullanılarak oluşturulmuştur. Kesme kuvveti değerlerinin doğrudan takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan ilişkili olmasından dolayı en düşük kesme kuvvetinin hangi seviyede olduğu ve en etkili kesme parametresinin ne olduğu araştırılmıştır. Analizden, aşağıdaki sonuçlar listelenmiştir:

- İstatistiksel analizler sonucunda sıcak işlemede kesme kuvvetlerine etkiyen en etkili parametrenin sıcaklık değişimi olduğu, daha sonra ise sırasıyla ilerleme ve kesme hızı olduğu bulunmuştur.
- İlerleme hızının artması tüm sıcaklık koşullarında kesme kuvvetini artırmaktadır.
- Sıcak işleme uygulaması nedeniyle iş parçasının akış stresinin azalmasıdır. Bundan dolayı kesme mukavemetinde azalma meydana gelir.
- En düşük kesme kuvveti değeri 8 numaralı deneyde yani 75 m/dk kesme hızında, 0,2 mm/dev ilerleme miktarında ve 600°C sıcak işleme şartlarında gerçekleştirilen 8 numaralı deneyde 125,2875 N olarak ölçülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Akasawa, T., Takeshita, H., & Uehara, K. (1987). Hot machining with cooled cutting tools. *CIRP Annals*, 36(1), 37-40.
- Alatrushi, L. K. H., Bedir, F., & Yılmaz, N. (2020). The Basic Concepts of Micro-Milling Process And Its Review in Terms of Distinctive Parameters. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 643-654.
- Elkhateeb, M. G., & Shin, Y. C. (2019). Investigation of the machining behavior of Ti6Al4V/TiC composites during conventional and laser-assisted machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(5).
- Ginta, T. L., & Amin, A. N. (2013). Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 14(2), 194-212.
- Kalpakjian, S. (2001). *Manufacturing engineering and technology*: Pearson Education India.

- Karagüzel, U. (2019). Ti6Al4V Alaşımının Talaşlı İmalatı Sirasında Termal Kamera ile Sıcaklık Ölçümü ve Sonlu Elemanlarla Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 265-271.
- Leshock, C. E., Kim, J.-N., & Shin, Y. C. (2001). Plasma enhanced machining of Inconel 718: modeling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(6), 877-897.
- Luan, X., Meng, J., Huang, B., Dong, X., Hu, Y., Zhao, Y., . . . Qu, L. (2021). Machining characteristics of Ti6Al4V alloy in laser-assisted machining under minimum quantity lubricant. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 775-785.
- Ma, J., Andrus, P., Condoor, S., & Lei, S. (2015). Numerical investigation of effects of cutting conditions and cooling schemes on tool performance in up milling of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4), 361-383.
- Muhammad, R., Ahmed, N., Shariff, Y. M., & Silberschmidt, V. V. (2012). *Finite-element analysis of forces in drilling of Ti-alloys at elevated temperature*. Paper presented at the Solid State Phenomena.
- Pan, Z., Liang, S. Y., Garmestani, H., & Shih, D. S. (2016). Prediction of machining-induced phase transformation and grain growth of Ti-6Al-4 V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 859-866.
- Parida, A., & Maity, K. (2016). *Finite element method and experimental investigation of hot turning of Inconel 718*. Paper presented at the Advanced Engineering Forum.
- Parida, A. K., & Maity, K. (2019). Hot machining of Ti-6Al-4V: FE analysis and experimental validation. *Sādhanā*, 44(6), 1-6.
- Rao, B., Dandekar, C. R., & Shin, Y. C. (2011). An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool performance and surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 294-304.
- Rashid, R. R., Bermingham, M., Sun, S., Wang, G., & Dargusch, M. (2013). The response of the high strength Ti-10V-2Fe-3Al beta titanium alloy to laser assisted cutting. *Precision Engineering*, 37(2), 461-472.
- Sahoo, A., Rout, A., & Das, D. (2015). Response surface and artificial neural network prediction model and optimization for surface roughness in machining. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6(2), 229-240.
- Shrot, A., & Bäker, M. (2012). Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations. *Computational Materials Science*, 52(1), 298-304.
- Smith, R. L., Schukken, Y. H., & Gröhn, Y. T. (2015). A new compartmental model of Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis infection dynamics in cattle. *Preventive veterinary medicine*, 122(3), 298-305.
- Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., Gürgen, S., Orak, S., & Kuşhan, M. C. (2018). Experimental investigation of machining characteristics and chatter stability for Hastelloy-X with ultrasonic and hot turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 83-97.
- Sun, S., Brandt, M., Barnes, J., & Dargusch, M. (2011). Experimental investigation of cutting forces and tool wear during laser-assisted milling of Ti-6Al-4V alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(9), 1512-1527.
- Ugur, L. (2019). 3D end milling of AISI 1040 finite element thermal analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 8(2), 1286-1290.
- Uğur, L., & Kazan, H. (2020). Finite element modeling of power consumption in turning of AISI 1040 steel. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 9(2), 1597-1601.
- Ulutan, D., & Ozel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250-280.
- Upadhyay, V., Jain, P., & Mehta, N. (2013). *Machinability studies in hot machining of Ti-6Al-4V alloy*. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Zamani, H., Hermani, J. P., Sonderegger, B., & Sommitsch, C. (2012). *Numerical and experimental investigation of laser assisted side milling of Ti6Al4v alloy*. Paper presented at the Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2012, MS and T 2012.



BİR GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMİNİN DAĞITIM SİSTEMİ GÜVENİLİRLİĞİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Sıtkı GÜNER^{1*}, Serkan YAZICI²

¹ Eskişehir Tek. Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Dağıtık Üretim,
Fotovoltaik,
Güneş Enerjisi Santrali,
Yenilenebilir Enerji Kaynağı.*

Öz

Günümüzde artan nüfus doğrultusunda talep edilen enerjinin de artmasıyla, alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımı gün geçtikçe artmakta ve özellikle güneş enerjisinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisinin kullanımı, temiz ve ekonomik olmasından dolayı mevcut enerji piyasasında önemli bir yer elde etme yolunda ilerlemektedir. Güç sistemleri yönetiminin öncelikli hedeflerinden bir kaliteli ve güvenilir enerjinin tüketiciye sağlanmasıdır. Her sistemde olduğu gibi GES'lerde de önemli sorunlardan biri arızalardır. Enerji talep eden tüketici ile elektrik iletim sistemi arasında dağıtım sistemi bulunmaktadır. Bu sistemlerde meydana gelebilecek herhangi bir arıza durumunda, arızadan sadece dağıtım şebekesinin bulunduğu bölge etkilenmesi istenmemektedir. Bu amaçla sistemin sürekliliği sağlanabilmesi için sistemin güvenilir olması gerekmektedir. Dağıtım sistemlerinin çalıştığı süre boyunca istenilen görevleri yerine getirebilmesine güvenilirlik denmektedir. Bu amaç doğrultusunda yapılan bu çalışmada, dağıtım sistemine entegre edilmiş bir güneş enerjisi santralinin (GES) güvenilirlik analizi yapılmıştır. İstanbul ili Büyükçekmece ilçesinde belirlenen yere bir benzetim programıyla GES tasarlanmıştır. Bu çalışmada 5113 m² alan içinde 3014 adet Canadian Solar 320 Wp panel, ABB 5.k kW invertör kullanılmıştır. Toplamda 1000 kWp güç üretecek santralin, bir benzetim programında 365 gün üreteceği enerjinin analizi yapılmıştır. Aylık ve saatlik tüketim bilgisi kullanılarak projenin günlük yük eğrisi elde edilmiştir.

THE ANALYSIS OF IMPACTS OF A PV SYSTEM ON THE DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY

Keywords

*Distributed Generation,
Photovoltaik,
PV Generation System,
Renewable Energy Source.*

Abstract

Today, in line with the increasing population and also with the increasing demanded energy, the tendency towards alternative energy sources has increased. As a result, the use of renewable energy sources (RES) is increasing day by day and especially the use of solar energy is becoming widespread. The use of solar energy has gained an important place in the current energy market because of its clean and economical feature. Malfunctions are one of the significant problems in solar power plants (SPP) as in every system. There is a distribution between the consumer demanding energy and the electricity transmission system. It is not desired to be affected of areas where the distribution network is located in case of any malfunction that may occur in these systems. For that purpose, the system must be reliable in order to ensure the continuity of the system. The ability that fulfilling the desired tasks during their operation is called reliability. The reliability analysis of a solar power plant (SPP) integrated into the distribution system has been made conducted for this purpose in this study. SPP has been designed with a simulation program to the place determined in Büyükçekmece which is the district of Istanbul. In this study, 3014 Canadian solar 320wp panels and ABB 5.k kW inverter have been used in a 5113m² area. The energy analysis to be generated power in 365 days of a power plant is to produce 1000kwp power in total has been done in a simulation program. The daily

* İlgili yazar / Corresponding author: sguner@eskisehir.edu.tr, +90-222-321-3550

load curve has been obtained by using monthly and hourly consumption information.

Alıntı / Cite

Güner, S., Yazıcı, S., (2022). Bir Güneş Enerji Sisteminin Dağıtım Sistemi Güvenilirliğine Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 538-549.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Güner, 0000-0003-1085-0474
S. Yazıcı, 0000-0002-7014-6924

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 20.10.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 18.02.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 16.03.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

1.1. Motivasyon (Motivation)

Güç sisteminin yönetiminde sistem operatörlerinin performanslarının ölçülmesinde güvenilirlik analizi ölçütleri kullanılmaktadır. Özellikle ülkemizde serbestleşmiş dağıtım şebekelerinin operatörlerinin sistemi yönetme kabiliyetlerinin ölçülmesi ve tüketiciye kaliteli ve güvenilir enerjinin sağlandığının belirlenmesi için dağıtım sistemi güvenilirlik analizi ölçütleri kullanılmaktadır.

Ülkemizdeki radyal dağıtım sistemi, yapısında tek yönlü bir enerji akışı olduğundan dolayı birçok arıza sistemdeki çoğu tüketiciyi etkilemektedir. Arızalardan etkilenen müşteri sayısının azaltılması için dağıtım üretim sistemlerinin (DÜS) yaratacağı olumlu etki şüphe götürmez bir gerçektir. DÜS'lerinin dağıtım sistemi güvenilirliğine etkilerinin incelenmesi kurulacak yeni üreteçlerin öneminin belirlenmesi için kullanılabilir.

Bu çalışmada İstanbul'da 1 MW gücünde kurulacak bir lisansız üretim sisteminin gerçek bir dağıtım sistemi güvenilirliğine etkileri incelenmiştir. Çalışmada dağıtım sistemi güvenilirlik ölçütlerinden SAIDI (Sistem Ortalama Kesinti Süresi Ölçütü), SAIFI (Sistem Ortalama Kesinti Ölçütü), ENS (Enerji Sağlanamaması) ölçütleri güneş enerji sisteminin (GES) dağıtım sistemi güvenilirliğine etkilerinin incelenmesi için kullanılmıştır.

Bu çalışmada bir dağıtım fiderine bağlanan bir GES'nin yarattığı etki incelenmiştir. Bu GES'nin kendine yakın olan yük noktalarında yarattığı iyileşme sistem için çok anlamlıdır. Bu noktadan yola çıkarak sisteme katılacak birde çok GES'nin öncelikle kendisine yakın bölgelerde yaratacağı etkilerle sistem güvenilirliğinde daha fazla iyileşme sağlanabilir. Bu da ülkemizdeki dağıtım sistemlerinin en büyük sorunu olarak tüketiciye kesintisiz enerji sağlanamamasının önüne geçilmesine yardımcı olabilir. Bu çalışmanın devamında GES'leriyle depolama birimlerinin birleştirmesinin optimum yönetimi ve şebekede yaratacağı iyileşmenin belirlenmesi hedeflenmektedir.

1.2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminin güç sistemlerinde artmasının en önemli nedenlerinden biri küresel ısınmanın etkisini her geçen gün artırmasıdır. GES'leri de yeşil enerjiden elektrik enerjisi üretimi noktasında en yaygın kullanılanlardanır. Şebekeye bağlı GES'leri gün geçtikçe artmaktadır. DÜS olarak GES'leri dağıtım sistemlerindeki genel görüşü değiştirmektedir. Gelişen ve değişen güç sistemlerinde fotovoltaik sistemler ile şebekeden bağımsız çalışarak tüketicilerin enerji ihtiyacının bireysel olarak karşılaması sağlanırken, şebekeye bağlı olarak çalıştığında tüketicilerin yük ihtiyaçlarına göre şebekeyle etkileşimi sağlanmaktadır. GES'lerinin şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olarak çalışmasının elektrik üretimine etkileri (İga vd., 2002)'de ortaya konmuştur. Ayrıca, MW boyutundaki GES'leri de sadece şebekeyi besleme yönünde çalışmaktadır ve gün geçtikçe dağıtım seviyesinden güç sistemine bağlanan GES'lerinin sayıları artmaktadır. Bu noktada karşılaşılan sorunların başında gelen hat empedansı ve yük değişiklikleri şebekenin güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bundan dolayı, dağıtım GES'lerle dağıtım sistemi gerilim profiline iyileşme yönünde yaptığı etki (Thomas vd., 2018) ortaya konmuştur.

Daha önce de belirtildiği gibi, fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşmasıyla beraber farklı uygulamalar ortaya çıkmaktadır. (Barker ve Bing, 2005)'de, son dönemde fotovoltaik sistem uygulamaları alanında meydana gelen gelişmelere sunulmuştur. Akıllı şebeke ortamıyla beraber özellikle elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması bu araçların şarj ihtiyacının temiz enerjiden karşılanması ihtiyacını ortaya çıkartmıştır. Bu sorunun çözülmesi için elektrikli araçlar için güneş enerjili şarj istasyonunun tasarımı ve analizini içeren bir çalışma (Mollah, 2012)'de yayınlamıştır. Elektrikli araçların şarj yükünün karşılanması için akıllı otopark sistemleriyle fotovoltaik sistemlerinin elektrikli araçlarla optimum yönetimi hem güneşten elektrik üretimine katkı sunarken, hem de elektrikli araçların temiz enerjiden enerji ihtiyacının karşılanmasına imkan verecektir. (Honarmanda vd., 2015)'de

tasarlanan akıllı otopark sisteminde, güneş radyasyonu belirsizliği, rezerv gereksinimleri ve elektrikli araç sahiplerinin memnuniyeti de dikkate alınmıştır. Ayrıca elektrikli araçların şarj ve deşarjının ekonomik ve teknik yönleri de akıllı otopark sistemine eklenmiştir.

Fosil kaynakların artan maliyetleri özellikle güneş ve rüzgar enerjisi kullanılarak elektrik üretiminin artmasına katkıda bulunmaktadır. (Aminifar vd., 2020)'de yapılan çalışmada GES'lerinin şebekeyle entegrasyonunun yarattığı ekonomik faydalar ve iş istihdamı gibi olumlu etkileriyle şebeke tarafında yarattığı sorunlar incelenmiştir. Bu noktada GES'lerinin şebekeye katılımı ileri mühendislik çözümleriyle beraber incelenmesi gerekmektedir (Singh vd., 2019; Nguyen ve Tsuji, 2019). Ayrıca akıllı şebeke ortamında yönetim kolaylaşan mikro şebekelerle birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarıyla depolama birimlerinin birleştirilmesiyle kendi kendine yeterek sistem güvenilirliğini artıran çözümler oluşturulmaktadır. (López-Prado vd., 2020)'de mikro şebekeye sahip dağıtım sistemlerindeki güvenilir değerlendirme yapan çalışmaların sınıflandırması bulunmaktadır. Bu literatür özetinde GES'lerinin müşteri tabanlı güvenilirlik ölçütlerinde yarattığı iyileşme ortaya konmaktadır. Ada modu çalışma mantığı DÜS'leriyle birlikte sıklıkla kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistem, dizel generatör ve bataryalardan oluşan hibrit bir yapıyla şebeke arızalarından daha az müşterinin etkilenerek dağıtım sistemi güvenilirliğinin iyileştirilmesi mümkündür (Esan vd., 2019). GES'lerinden sağlanacak maddi kazancın artırılması için depolama birimleriyle entegra olarak kullanılmaktadır. Bu GES'leriyle ilgili işletme şekli dağıtım sistemi güvenilirliğini iyileştirmek için de kullanılmaktadır (Ostovar vd., 2021).

GES'lerinin şebekelere dahil olmasıyla beraber sahip oldukları güç elektroniği ve kontrol ekipmanlarından dolayı dağıtım sisteminin enerji kalitesi kötü yönde etkilenmektedir. (Zainal vd., 2013)'de GES'nin 11 kV gerilim seviyesine sahip dağıtım sistemi için bir vaka analizi yapılarak harmonik distorsiyonun IEEE 519-1992 standardından daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Aktif ve reaktif güç kontrolü için GES'lerinin optimum çalışma noktasının belirlenmesi için yapılan çalışmanın sonucunda GES'lerinin dağıtım sistemlerine katılım oranını artırmasının güç kalitesine olumlu etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır (Hsu vd., 2013). GES'lerinin sadece dağıtım sistemi özelinde sistem güvenilirliğinde yarattığı iyileşmenin yanında iletim sistemi güvenilirlik ölçütlerinden LOLP (Loss of Load Probability) ve LOEP (Loss of Energy Probability) iyileşme yarattığı (Bouhours vd., 2010)'de ortaya konmuştur.

Güç sistemlerinde yaşanacak arızalarda gerekli anahtarlama koordinasyonu ile tüketicilerin bir bölümüne enerjinin GES'leriyle sağlanması sistem güvenilirliğine etkileri (Stember vd., 1982)'de incelenmiştir. Akıllı şebeke ortamında ve gelişen dünya düzeninde artık tüketicinin kaliteli ve sürekli enerji isteği daha fazla karşılık bulmaktadır. Geleneksel enerji sistemlerinde üretim ve iletim sisteminde yaşanabilecek arıza ve kesintiler daha fazla kullanıcıyı etkilediğinden güç sistemi operatörleri dağıtım sisteminde yaşanacak olumsuzluklara daha az önem vermekteydi (Güner, 2018). Dağıtım sisteminde yaşanacak arızalardan daha az kullanıcının etkilenmesi için DÜS'lerinin yapacağı olumlu etkinin ortaya konulması dağıtım sistemi işletmesine de yardımcı olacaktır.

1.3. Çalışmanın Katkıları ve Organizasyonu (Contributions and Organisation of Studies)

Bu çalışmada gerçek bir bölgeye kurulabilecek GES'nin tasarımı her aşaması ile yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda hem üretim bilgileri hem de bağlantı şemaları kullanılarak belirtilen bölgede GES kurulum imkânı vermektedir. Bu çalışmanın sonuçları YEK'larından elektrik enerji üreten sistemlerin dağıtım sistemine entegre edileceği projelere yol gösterecektir. Bu çalışma gerçek bir GES kurulabilecek konum seçilip gerçek bir dağıtım sistemi kullanılıp, gelecekte İstanbul'da kurulabilecek bir GES için ön çalışma niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma, aşağıdaki ana aşamalardan oluşmaktadır:

- Belirlenen alanda kurulacak GES üretim bilgilerinin hesaplanması için bir benzetim programı kullanılarak alanın coğrafik konumu bilgisi ile beraber tasarımı yapılmıştır. Bu şekilde GES'nin yılın her ayı için toplam üretim bilgisine ulaşılır.
- İstanbul ili özelinde kurulacak bir GES'nin dağıtım sistemi güvenilirliğine etkileri kötü senaryo Ocak ayına ait üretim bilgileri, orta senaryo Mayıs ayına ait üretim bilgileri ve iyi senaryo Temmuz ayına ait üretim bilgileri kullanılarak gözlemlenmiştir. Bu şekilde GES'nin dağıtım sistemi güvenilirliğinde yarattığı iyileşme her durum için incelenmiştir.
- Bu çalışmayla GES'lerinin dağıtım sistemi güvenilirliğine etkilerini inceleyerek Türkçe literatürdeki eksik olan bir konuda literatüre katkı sunmak amaçlanmıştır.
- Oluşturulan modellerden en fazla enerjinin Temmuz ayında alınmasına rağmen sistem güvenliği ve analizi açısından en verimli ayın Mayıs olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada GES üretim, sistem bilgileri ve GES'nin bağlanabileceği dağıtım fiderinin günlük yük eğrisinin hesaplanması ile ilgili süreçler 2. bölümde, benzetim, güvenilirlik analizi ve analiz sonuçları ise 3. bölümde anlatılmıştır. Çalışmanın sonuç kısmı 4. bölümde sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Güç sistemi yöneticileri başlıca görevi, tüketicilere mümkün olduğunca ekonomik, kesintisiz ve kaliteli enerji sağlamaktır. Gelişen dünyada tüketici ihtiyaçları da değişmektedir. Elektrik enerjisi kullanımının hane başına artması güç sistemlerinin sınır değerlerde çalıştırılmasına neden olmaktadır. Bu durum güç sistemlerinde rastgele bileşen (donanım ve yazılım) arızalarına ve enerji kesintilerine neden olur. Enterkonnekte güç sistemlerinde üretimin iletiminin ve tüketimin bütünleştiği bir yapı vardır. Bu bütünleşik yapı şebekenin herhangi bir noktasında yaşanan arızalardan az sayıda tüketicinin etkilendiği gibi şebekenin büyük bir kısmına elektrik enerjisi sağlanamamasına neden olabilir. Bu kesintilerin hem ekonomik hem çevresel hem de toplumsal etkileri vardır. Güç sistemlerinde yaşanan kesintilerinin sıklığı, süresi, sağlanamayan enerji değeri olasılıksal modellemeler kullanılarak güvenilirlik analizleriyle belirlenir. Güç sistemlerinde yaşanabilecek kesintilerin sıklığı, süreleri ve ekonomik sonuçları, olasılıksal olarak yapılan güvenilirlik analizleri ile belirlenir (Kim vd., 2016).

Güç sistemlerinde güvenilirlik analizi üretim iletim ve dağıtım sistemleri olarak üç işlevsel bölgeye ayrılarak yapılır. Üretim ve iletim sistemlerinde güvenilirlik analizleri enerji yokluğu ve enerji yokluğu olasılığı gibi ölçütler kullanılarak yapılır. Buna karşın dağıtım sistemlerinde güvenilirlik analizleri temel ölçütler kullanılarak hesaplanır (Dhillon ve Singh, 1981; Billington ve Allan, 1988). Temel ölçütler;

- Yük noktası arıza oranı (λ),
- Ortalama arıza süresi (r) ve
- Yıllık kullanılamazlık (yokluk) (U).

Bu temel ölçütler eşitlik (1), (2) ve (3)'de verildiği gibi hesaplanır. Bu ölçütler yük noktasındaki tüketicilerin yaşadığı kesintileri belirlemek için kullanılır. Analiz edilen dağıtım sisteminin veya dağıtım fiderinin güvenilirlik ölçütleri sistemindeki bütün yük noktaları ve ekipmanlar dikkate alınarak hesaplanır. Bu hesaplamaların değişik ölçütler kullanılarak bütün sistemin güvenilirlik analizi yapılır (Billington ve Allan, 1996). Bu çalışmada Sistem Ortalama Kesinti Sıklığı İndisi (SAIFI), Sistem Ortalama Kesinti Süresi İndisi (SAIDI), Sağlanamayan enerji (ENS) ölçütleri kullanılmıştır. Bu ölçütlerin eşitlik (4), (5) ve (6)'de verildiği gibi hesaplanır. Ayrıca,

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i \quad (1)$$

$$U_s = \sum_i \lambda_i r_i \quad (2)$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i r_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (3)$$

$$SAIFI = \frac{\text{Yıllık toplam kesintiye uğrayan tüketici sayısı}}{\text{Toplam tüketici sayısı}} = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (4)$$

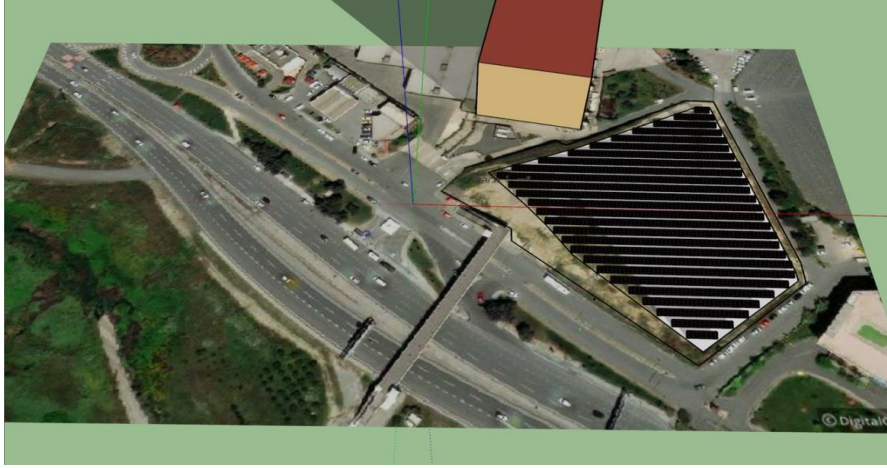
$$SAIDI = \frac{\text{Yıllık toplam kesintiye uğrayan tüketici sayısı}}{\text{Toplam etkilenen tüketici sayısı}} = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_{ai}} \quad (4)$$

$$ENS = \text{Yıllık toplam sağlanamayan enerji} = \sum_i \lambda_i L_i \quad (6)$$

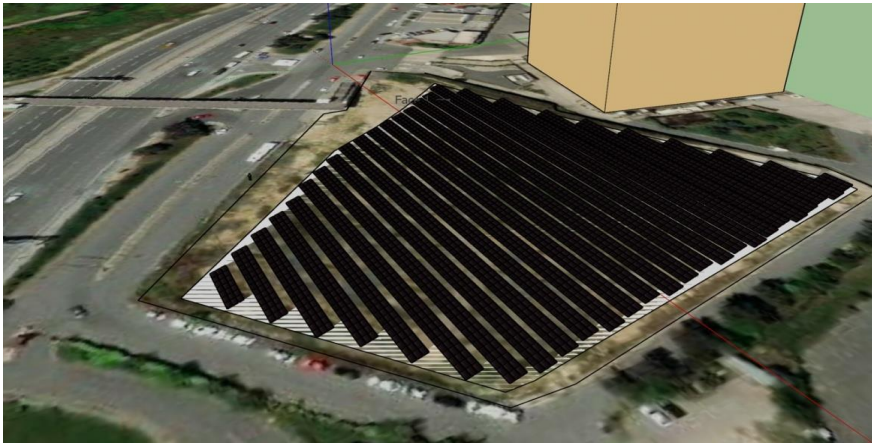
i yük noktası indisini, N_i ise i yük noktasındaki toplam tüketici sayısını, L_i ise i yük noktasındaki toplam yükü ifade eder. Bu çalışmada yukarıda anlatılan matematiksel alt yapı kullanılarak örnek dağıtım fiderinin güvenilirlik ölçütleri GES olmadan ve olduğu durumlar için Monte-Carlo benzetimi kullanılarak hesaplanır.

2.2. GES'nin Üretim Bilgileri (The Generation Information of The PV System)

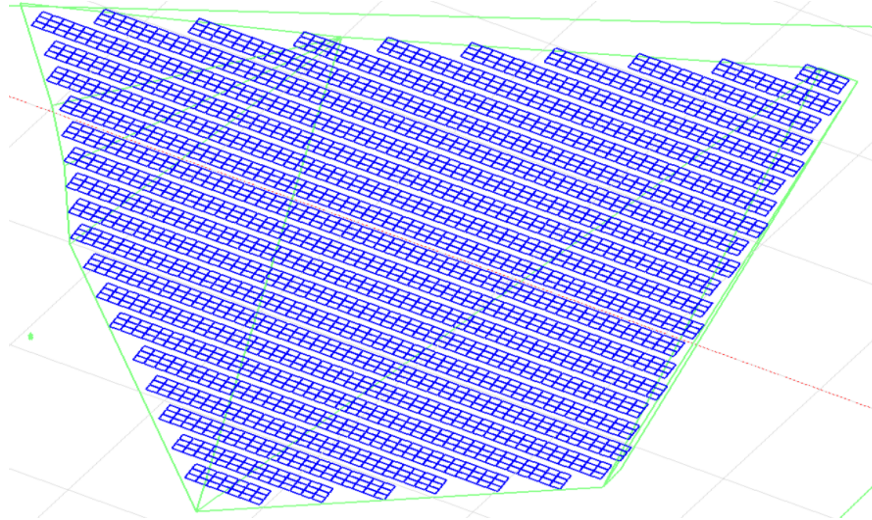
Bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi Hadımköy yolu caddesi yanında bulunmaktadır. Tasarımın konumu olarak 41°01'25" kuzey enlemi ile 28°37'29" doğu boylamı belirlenmiştir. GES'nin panellerinin eğimi 10° belirlenmiş, azimut açısı 13° olarak hesaplanmıştır. GES'nin 5113 m² alana kurulması planlanmıştır. Bu alanda 3014 adet Canadian Solar 320 Wp panel kullanılarak ABB 5 kW invertörün seçilmiştir. GES'nin tasarımı bir benzetim programı kullanılarak Şekil 1 ve Şekil 2'de verildiği gibi çizilmiştir. Ayrıca, GES'nin panellerinin tasarım yerleşimini Şekil 3'de, GES'in yapılması planlanan konumun iso gölgelendirmesi Şekil 4'de verilmiştir.



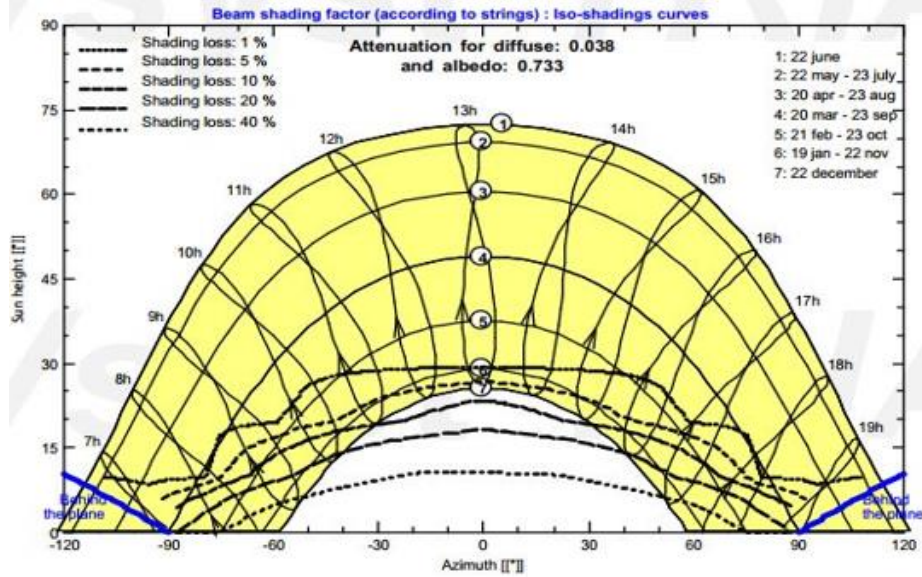
Şekil 1. GES'nin bir tasarım programında Çizimi-1 (The drawing of the PV system with a simulation program -1)



Şekil 2. GES'nin bir tasarım programında Çizimi-2 (The drawing of the PV system with a simulation program -2)



Şekil 3. GES 'nin yerleşimi (The allocation of PV system)

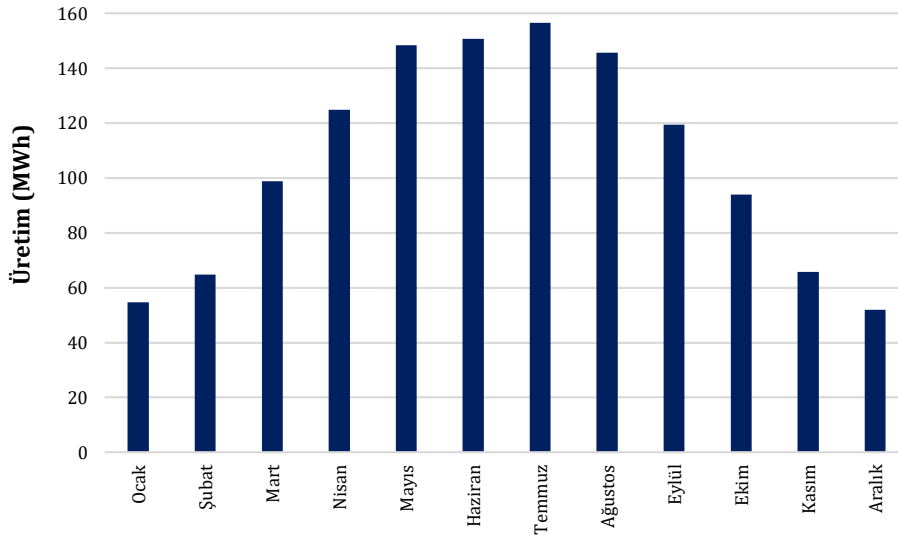


Şekil 4. GES'nin bulunduğu konumun iso gölgelendirmesi (The iso curve of the location of PV system)

GES'nin bir yıllık üretimi bir benzetim programı kullanılarak daha önce verilen bilgilerle hesaplanmıştır. GES'nin aylara göre üretimi Tablo 1'de verildiği gibi bulunmuştur, ayrıca Şekil 7'de görselleştirilmiştir. Tablo 1'de de görüldüğü gibi GES en yüksek üretime Temmuz ayında 156.60 MWh değerine ulaşırken, Aralık ayında 51.96 MWh değerinde kalmıştır.

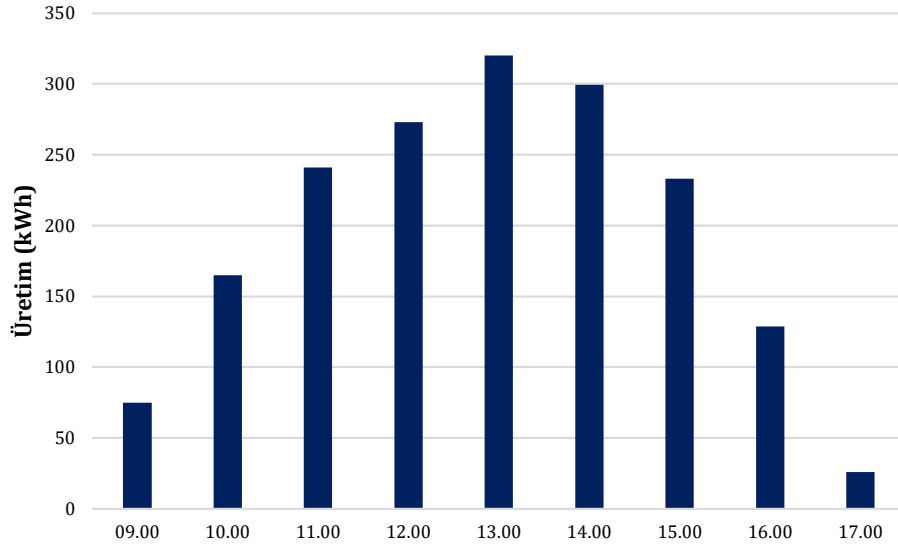
Tablo 1. GES'nin aylık üretimi (Monthly generation of the PV system)

| Aylar | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
|--------------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|--------|
| Üretim (MWh) | 54.62 | 64.91 | 98.78 | 124.81 | 148.34 | 150.84 | 156.60 | 145.76 | 119.55 | 93.89 | 65.83 | 51.96 |

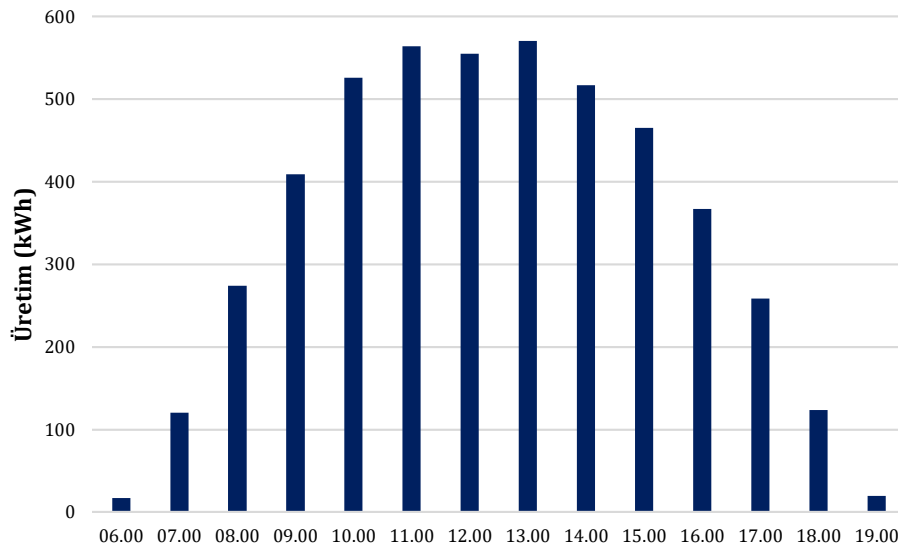


Şekil 5. GES'nin aylık üretimi (Monthly generation of the PV system)

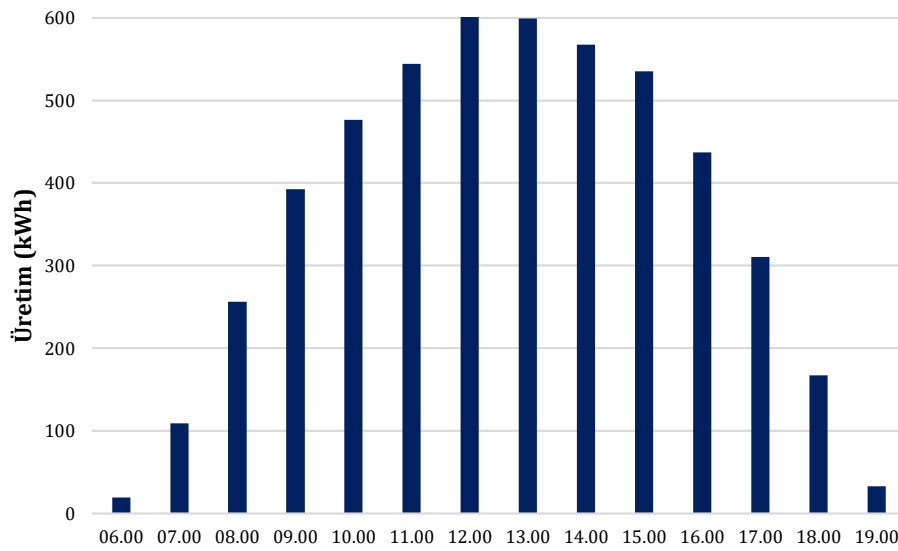
GES'nin dağıtım sisteminin güvenilirliğine etkilerini gözlemlemek için kötü, orta ve iyi senaryolar için sırasıyla GES'nin Ocak, Mayıs ve Temmuz üretimine odaklanılmıştır. GES'nin gün içi saatlerdeki ortalama değerleri benzetim programının sonuçları kullanılarak bulunmuştur. Bulunan üretim değerleri Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verildiği gibidir. Bu üretim değerleri gün için saatler için ortalama üretim değerleridir.



Şekil 6. GES'nin Ocak ayına ait ortalama üretimi (Daily average generation of the PV system for January)



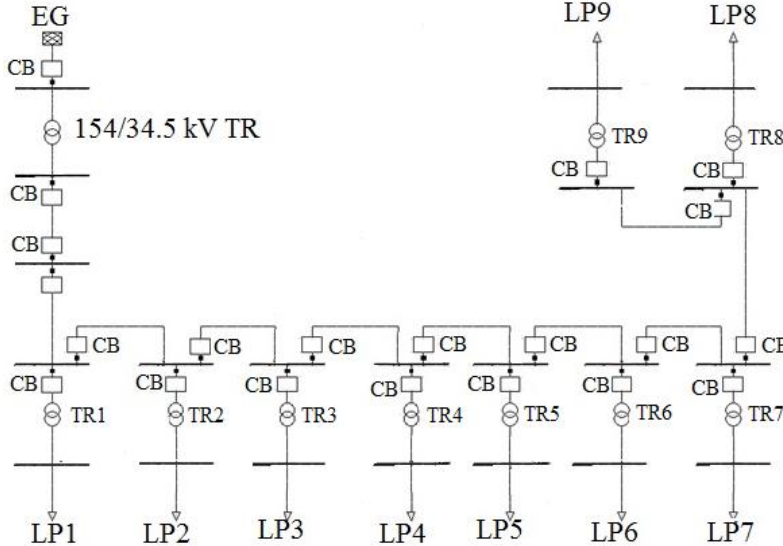
Şekil 7. GES'nin Mayıs ayına ait ortalama üretimi (Daily average generation of the PV system for May)



Şekil 8. GES'nin Temmuz ayına ait ortalama üretimi (Daily average generation of the PV system for July)

2.3 Dağıtım Fiderinin Bilgileri (Distribution Feeder Configuration)

GES'nin bağlanabileceği dağıtım fiderinin bilgileri BEDAŞ tarafından sağlanmıştır. Bu bilgiler dağıtım fiderinin tek hat şeması (Şekil 9), yük noktalarının yük ve tüketici bilgileri (Tablo 2), 34.5/0.4 kV transformatörlerin anma değerleri (Tablo 3) ve dağıtım fider elemanlarının arıza oranı ve ortalama onarım süre bilgileri (Tablo 4) içermektedir. Bu şebekede 9 adet 34.5/0.4 kV trafo merkezi (Transformer – TR) 9 adet yük noktasının (Load Point – LP) fider ile bağlantısını sağlamaktadır. Ayrıca devrede koruma ekipmanı olarak kesiciler (Circuit Break – CB) bulunmaktadır. Şekil 9'da harici şebeke (External Grid - EG) olarak belirtilen kısım fiderin bağlı olduğu iletim sistemini ifade etmektedir.



Şekil 9. Dağıtım Fiderinin Tek Hat Şeması (The Single Line Diagram of The distribution Feeder)

Tablo 2. Yük noktalarındaki maksimum yük ve tüketici bilgileri (Maximum load and number of consumer at load points)

| Aylar | LP1 | LP2 | LP3 | LP4 | LP5 | LP6 | LP7 | LP8 | LP9 |
|-----------------|--------|---------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|-----|
| Yük (kVA) | 125.32 | 1553.54 | 227.85 | 508.85 | 115.22 | 116 | 388.39 | 336.81 | 150 |
| Tüketici Sayısı | 333 | 1333 | 333 | 417 | 333 | 210 | 333 | 210 | 1 |

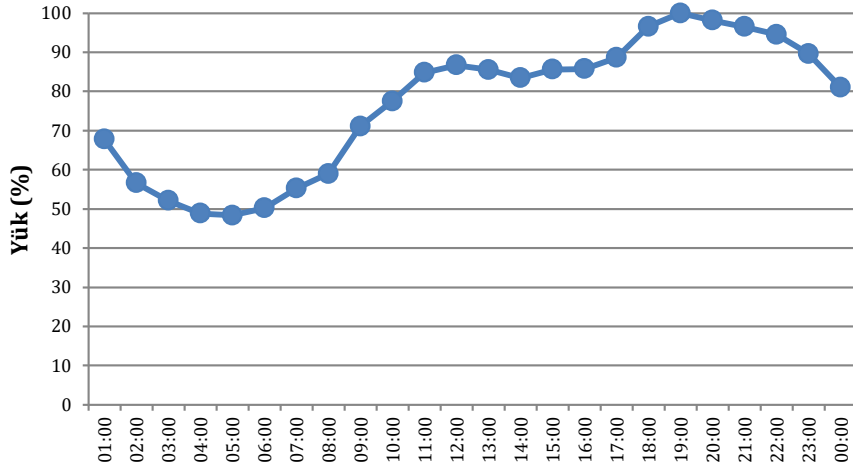
Tablo 3. 34.5/0.4 kV Transformatörlerin anma gücü bilgileri (Power rating of 34.5/0.4 kV transformers)

| Aylar | TR1 | TR2 | TR3 | TR4 | TR5 | TR6 | TR7 | TR8 | TR9 |
|-----------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|
| Güç (kVA) | 1000 | 4000 | 1000 | 1250 | 1000 | 630 | 1000 | 630 | 1000 |

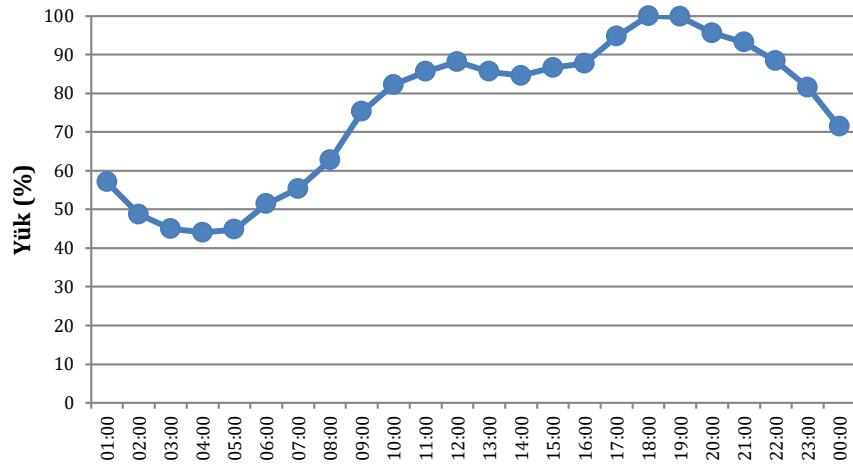
Tablo 4. Dağıtım fider elemanlarının arıza oranı ve ortalama onarım süre bilgileri (Failure rate and repair time of each element in distribution feeder)

| Aylar | Harici Şebeke | Dağıtım Transformatörleri | Bara | Kablo |
|--|---------------|---------------------------|------|-------|
| λ (1/yıl) [Kablo için 1/(yıl.km)] | 0.1 | 0.5 | 0.25 | 0.75 |
| r (saat/yıl) | 8.7 | 3 | 4 | 4 |

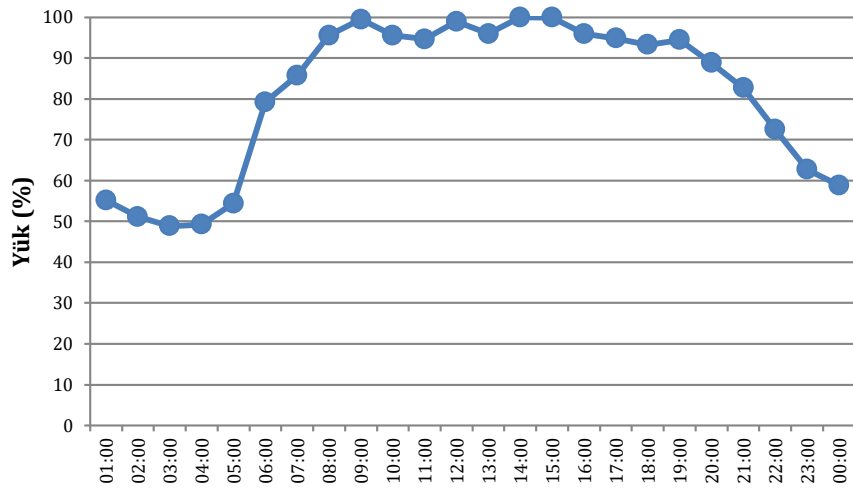
Ayrıca BEDAŞ tarafından sağlanan veri kullanılarak kış, yaz ve bahar aylarına ait dağıtım fiderinin günlük yük eğrileri elde edilmiştir. Dağıtım fiderinin bulunduğu bölgenin yük karakteri %60 işletme, %40 meskendir. Her mevsim kendi ayları içinde gruplandırılarak oluşturulmuş, yük eğrileri yüzdeler olarak gösterilmiştir. Her mevsimin puant yük değeri farklıdır, Bu değer kış mevsimi için 3.42 MVA, bahar mevsimi için 2.84 MVA, yaz mevsimi için 2.32 MVA'dır. Ayrıca belirtilen üç mevsim için hesaplanan günlük yük eğrisi Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 10. Kış ayları için dağıtım fideri yük eğrisi (Daily load curve of the distribution feeder for winter months)



Şekil 11. Bahar ayları için dağıtım fideri yük eğrisi (Daily load curve of the distribution feeder for spring months)



Şekil 12. Yaz ayları için dağıtım fideri yük eğrisi (Daily load curve of the distribution feeder for summer months)

3. Benzetim Sonuçlar (Experimental Results)

Kurulan GES'in üretim hesaplamaları ve üretim sonuçları bir önceki bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Güvenilirlik analizi için oluşturulan GES'in, Şekil 5'de verilen dağıtım fideri tek hat şemasında belirtilen LP9 noktasına bağlanması planlanmıştır. GES'in bu fiderin güvenilirlik ölçütlerine yarattığı iyileşmenin hesaplanabilmesi için öncelikle GES'nin sisteme dâhil olmadan fiderin sistem ve yük noktası güvenilirlik ölçütleri hesaplanmıştır. Sistemin temel durumuna ait bilgiler Tablo 5'de gösterilmiştir. Bu tabloda SAIFI ve LPIF

ölçütlerinin birimi $\frac{\text{arıza (failure)}}{\text{müşteri (customer).yıl (year)}} \left(\frac{f}{c.y}\right)$ 'dır, SAIDI ve LPID ölçütlerinin birimi $\frac{\text{saat (hour)}}{\text{müşteri (customer).yıl (year)}} \left(\frac{h}{c.y}\right)$ 'dır, ENS ve LPENS ölçütlerinin birimi $\frac{MWh}{\text{yıl (year)}} \left(\frac{MWh}{y}\right)$ 'dır.

Tablo 5. Temel durum için güvenilirlik ölçütleri (Base case reliability indices)

| Fider Güvenilirlik İndeksleri | | Yük Noktası Güvenilirlik İndeksleri | Yük Noktaları | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | LP1 | LP2 | LP3 | LP4 | LP5 | LP6 | LP7 | LP8 | LP9 |
| SAIFI $\left(\frac{f}{c.y}\right)$ | 5.87 | LPIF $\left(\frac{f}{c.y}\right)$ | 2.92 | 3.92 | 4.92 | 5.92 | 6.92 | 7.92 | 8.92 | 9.92 | 11.17 |
| SAIDI $\left(\frac{h}{c.y}\right)$ | 23.44 | LPID $\left(\frac{h}{c.y}\right)$ | 11.64 | 15.64 | 19.64 | 23.64 | 27.64 | 31.64 | 35.64 | 39.64 | 44.64 |
| ENS $\left(\frac{MWh}{y}\right)$ | 60.28 | LPENS $\left(\frac{MWh}{y}\right)$ | 1.06 | 17.74 | 3.27 | 8.78 | 2.32 | 2.68 | 10.10 | 1.12 | 10.97 |

GES dağıtım fiderine bağlandığı durumda dağıtım sisteminin güvenilirlik ölçütlerinde yarattığı iyileşme 3 farklı ayın ortalama günlük üretim bilgileri kullanılarak oluşturulan kötü (Ocak), orta (Mayıs) ve iyi (Temmuz) senaryoları için güvenilirlik ölçütleri tekrar hesaplanmıştır. Bu hesaplamada dağıtım sistemindeki bütün ekipmanların arıza sıklıkları ve arıza süreleri dikkate alınarak olasılıksal bir modellemeyle hesaplanmıştır. Güvenilirlik analizi hesaplamaları GES sisteme dahil olduğu durum için de sistemde olmadığı durum için aynı hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bölüm 2.1'de verilen güvenilirlik ölçütlerinin matematiksel formülleri güvenilirlik analizinin her aşamasında kullanılmıştır. Belirlenen senaryolar GES'nin üretimi değerlerine göre kötü, orta ve iyi olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda hesaplanan güvenilirlik ölçütleri Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 6. Kötü senaryo için güvenilirlik ölçütleri (Worst case reliability indices)

| Fider Güvenilirlik İndeksleri | | Yük Noktası Güvenilirlik İndeksleri | Yük Noktaları | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | LP1 | LP2 | LP3 | LP4 | LP5 | LP6 | LP7 | LP8 | LP9 |
| SAIFI $\left(\frac{f}{c.y}\right)$ | 5.78 | LPIF $\left(\frac{f}{c.y}\right)$ | 2.92 | 3.92 | 4.92 | 5.92 | 6.92 | 7.92 | 8.92 | 9.5 | 9.77 |
| SAIDI $\left(\frac{h}{c.y}\right)$ | 23.10 | LPID $\left(\frac{h}{c.y}\right)$ | 11.64 | 15.64 | 19.64 | 23.64 | 27.64 | 31.64 | 35.64 | 37.99 | 39.06 |
| ENS $\left(\frac{MWh}{y}\right)$ | 58.74 | LPENS $\left(\frac{MWh}{y}\right)$ | 1.06 | 17.74 | 3.27 | 8.78 | 2.32 | 2.68 | 10.10 | 1.07 | 9.44 |

Tablo 7. Orta senaryo için güvenilirlik ölçütleri (Moderate case reliability indices)

| Fider Güvenilirlik İndeksleri | | Yük Noktası Güvenilirlik İndeksleri | Yük Noktaları | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | LP1 | LP2 | LP3 | LP4 | LP5 | LP6 | LP7 | LP8 | LP9 |
| SAIFI $\left(\frac{f}{c.y}\right)$ | 5.53 | LPIF $\left(\frac{f}{c.y}\right)$ | 2.92 | 3.92 | 4.92 | 5.92 | 6.92 | 7.92 | 8.18 | 6.20 | 6.98 |
| SAIDI $\left(\frac{h}{c.y}\right)$ | 22.06 | LPID $\left(\frac{h}{c.y}\right)$ | 11.64 | 15.64 | 19.64 | 23.64 | 27.64 | 31.64 | 32.67 | 24.78 | 27.90 |
| ENS $\left(\frac{MWh}{y}\right)$ | 55.08 | LPENS $\left(\frac{MWh}{y}\right)$ | 1.06 | 17.74 | 3.27 | 8.78 | 2.32 | 2.68 | 9.29 | 0.70 | 6.87 |

Geliştirilen senaryolardaki GES'nin dağıtım sistemi güvenilirliğinde yarattığı iyileşme Tablo 9'da verildiği gibidir. Dağıtım fiderine bağlanan 1 MW güce sahip GES'nin dağıtım sistemi güvenilirlik ölçütlerinden ENS ölçütünde 8%'e varan, SAIDI ve SAIFI ölçütlerinde %6'ya varan iyileşmeler yarattığı bu çalışmanın önemli sonuçlarıdır. Ayrıca, Tablo 10'da verildiği gibi GES'nin yük noktalarının LPENS ölçütünde yarattığı iyileşme gösterilmektedir. GES'nin kapasitesi arıza veya kesinti durumunda LP7, LP8 ve LP9 yük noktalarının enerji ihtiyacını

karşılayabildiğinden bu noktaların güvenilirlik ölçütüne katkı Tablo 10'da gösterilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi yük noktalarında %42'ye varan iyileşme sağlanması bir GES ile mümkündür.

Tablo 8. İyi senaryo için güvenilirlik ölçütleri (Best case reliability indices)

| Fider Güvenilirlik İndeksleri | | Yük Noktası Güvenilirlik İndeksleri | Yük Noktaları | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | LP1 | LP2 | LP3 | LP4 | LP5 | LP6 | LP7 | LP8 | LP9 |
| SAIFI ($\frac{f}{c.y}$) | 5.56 | LPIF ($\frac{f}{c.y}$) | 2.92 | 3.92 | 4.92 | 5.92 | 6.92 | 7.92 | 8.91 | 5.79 | 6.51 |
| SAIDI ($\frac{h}{c.y}$) | 22.20 | LPID ($\frac{h}{c.y}$) | 11.64 | 15.64 | 19.64 | 23.64 | 27.64 | 31.64 | 35.64 | 23.12 | 26.04 |
| ENS ($\frac{MWh}{y}$) | 55.31 | LPENS ($\frac{MWh}{y}$) | 1.06 | 17.74 | 3.27 | 8.78 | 2.32 | 2.68 | 10.10 | 0.65 | 6.36 |

Tablo 9. GES'nin sistem güvenilirlik ölçütlerinde yarattığı yüzdelik iyileşme (Percentage reliability improvement created by PV system on system reliability indices)

| | SAIFI | SAIDI | ENS |
|---------------|-------|-------|-------|
| OCAK | 1,533 | 1,45 | 2,554 |
| MAYIS | 5,792 | 5,887 | 8,626 |
| TEMMUZ | 5,281 | 5,29 | 8,244 |

Tablo 10. GES'nin LPENS Güvenilirlik Ölçütlerinde yarattığı yüzdelik iyileşme (Percentage Reliability Improvement Created by PV system on System Reliability Indices)

| | SAIFI | SAIDI | ENS |
|---------------|-------|--------|--------|
| OCAK | 0 | 4,464 | 13,947 |
| MAYIS | 8,019 | 37,5 | 37,374 |
| TEMMUZ | 0 | 41,964 | 42,023 |

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Karbon emisyonunu azaltılması için oluşan farkındalık ve pandemi kaynaklı fosil kaynakların fiyatlarındaki artış GES gibi YEK kullanarak enerji üretiminin güç sistemlerindeki payının artmasına katkıda bulunacaktır. Ülkemizde de yerli üretimin desteklenmesinin en önemli adımı yerli ve YEK'larından elektrik enerjisi üretmekten geçmektedir. Bu noktadan yola çıkarak İstanbul gibi bir metropolde kurulabilecek bir GES'nin dağıtım sistemine nasıl bir katkı sunduğu güvenilirlik analizi bakış açısından ortaya konmuştur. Bu çalışmanın en önemli katkılarından biri türkçe mühendislik literatüründe bulunmayan bir konu olan GES'lerinin dağıtım sistemi güvenilirliğine etkilerinin incelenmesidir.

Çalışma sonucundan ulaşılan sonuçlar tek bir GES'nin dağıtım sisteminin küçük bir parçasında %8 daha az elektrik enerjisinden mahrum kalmasını sağladığını göstermektedir. Aynı şekilde GES'nin kurulduğu bölgedeki kullanıcıların bu durumdan daha fazla fayda elde ederek yaklaşık %42 oranında daha az elektrik enerjisinden mahrum kalmasını sağlamaktadır.

Oluşturulan 3 senaryonun temel amacı GES'nin mevsimsel koşullara çok duyarlı olmasından dolayıdır. Fakat bu çalışmanın sonuçları en yüksek üretimin yapıldığı Temmuz ayında sağlanan sistem güvenilirliğindeki iyileşme Mayıs ayında sağlanandan daha azdır. Tespit edilen bu durumun en önemli nedeni tüketicilerin enerjiye ihtiyaç duydukları zaman aralığındaki farktır. Özellikle rüzgar ve güneş kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin kesikli bir yapısının olmasının önüne depolama birimleriyle geçilebilir. Gelecek çalışmalarında depolama birimlerinin de dahil edileceği bir sistemde optimum enerji yönetimiyle GES'lerinin güç sistemi güvenilirliğine etkilerinin incelenmesi temel hedeftir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş'ye (BEDAŞ) bu çalışmaya örnek bir dağıtım şebekesinin istatistiksel ve teknik verilerini sağlayarak katkıda bulunduğu için teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Aminifar, F., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., Abusorrah, A., Al-Turki, Y., 2020. The Proliferation of Solar Photovoltaics: Their Impact on Widespread Deployment of Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 8(3), 79–91.
- Barker, P. P., & Bing, J. M., 2005. Advances in solar photovoltaic technology: An applications perspective. *2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2, 1955–1960.
- Billinton, R., Allan, R. N., 1988. *Reliability Assessment of Large Electric Power Systems*. US, Springer.
- Billinton, R., Allan, R. N., 1996. *Reliability Evaluation of Power Systems*. New York, Springer.
- Bouhouras, A. S., Marinopoulos, A. G., Labridis, D. P., Dokopoulos, P. S., 2010. Installation of PV systems in Greece—Reliability improvement in the transmission and distribution system. *Electric Power Systems Research*, 80, 547–555.
- Dhillon, B. S., Singh, C. 1981. *Engineering Reliability: New Techniques and Applications*. John Wiley & Sons Inc.
- Esan, A. B., Agbetuyi, A. F., Oghorada, O., Ogbeide, K., Awelewa, A. A., Afolabi, A. E., 2019. Reliability assessments of an islanded hybrid PV-diesel-battery system for a typical rural community in Nigeria. *Heliyon*, 5.
- Güner, S. 2018. Elektrikli Araç Otoparklarının Dağıtım Sistemi Güvenilirliğine Etkilerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Honarmanda, M., Zakariazadeha, A., Jadid, S., 2015. Self-scheduling of Electric Vehicles in an Intelligent Parking Lot Using Stochastic Optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 352, 449-467.
- Hsu, C. T., Tsai, L. J., Cheng, T. J., Chen, C. S., Hsu, C. W., 2013. Solar PV generation system controls for improving voltage in distribution network. *ISNE 2013 - IEEE International Symposium on Next-Generation Electronics 2013*, 486–489.
- Iga, A., Kaneko, T., Ishihara, Y., 2002. Research of an evaluation method of photovoltaic output and generated energy connected with a power grid. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 3, 1641–1646.
- Kim, E., Kim, Y., Ko, W., 2016. A dynamic electricity tariff survey for smart grid in South Korea. *The 20th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2016)*, USA, Orlando, Florida, Temmuz 5–8.
- López-Prado, J. L., Vélez, J. I., Garcia-Llinás, G. A., 2020. Reliability Evaluation in Distribution Networks with Microgrids: Review and Classification of the Literature. *Energies*, 13(23).
- Mollah, M. B. 2012. An analysis, design and opportunity of solar based recharging stations for electric vehicles in Bangladesh. *Proceedings of 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology, ICDRET 2012*, 43–47.
- Nguyen, H. X., Tsuji, T., 2019. Multi-layer Reactive Power Control of Solar Photovoltaic Systems in MV Distribution Network. *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe 2019*.
- Ostovar, S., Esmaili-Nezhad, A., Moeini-Aghaie, M., Fotuhi-Firuzabad, M., 2021. Reliability assessment of distribution system with the integration of photovoltaic and energy storage systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 28.
- Singh, R., Tripathi, P., Yatendra, K., 2019. Impact of Solar Photovoltaic Penetration In Distribution Network. *2019 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering, RDCAPE 2019*, 551–556.
- Stember, L. H., Huss, W. R., Bridgman, M. S., 1982. A Methodology for Photovoltaic System Reliability & Economic Analysis. *IEEE Transactions on Reliability*, R-31(3), 296–303.
- Thomas, N., Jayabarathi, R., Nambiar, T. N. P., 2018. Effect of Line Impedance and Loading on Voltage Profile in Distribution Network with Distributed Solar Photovoltaic System. *Proceedings of the 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2018*, 962–968.
- Zainal, Z., Ang, S. P., Salam, M. A., Weira, P. J., Goh, R., 2013. Measurement of harmonics in different sectors on 11 kV distribution networks. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*.



GAN GÜÇ ANAHTARLARI İLE GERÇEKLENEN YARIM KÖPRÜ GELİŞTİRME KARTININ ISIL BAŞARIMININ İNCELENMESİ

Ömer Faruk GÖKSU^{1,2}, Mehmet Onur GÜLBAHÇE^{2*}, Serkan DÜŞMEZ³

¹ Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Güç Yönetimi Çözümleri İş Birimi, Wat Motor, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

GaN FET,
Isıl Yönetim,
Sürekli Hal Isıl Analiz,
Sonlu Elemanlar Yöntemi,
EPC2215,
EPC9099.

Öz

GaN FET anahtarlar ufak paket boyutlarına sahip olması ve yüksek çalışma gerilim-akım değerlerini yüksek anahtarlama frekanslarında sağlayabilmesinden dolayı güç elektroniği çeviricilerinde yeni ufuklar açmıştır. Bu çalışma EPC firması tarafından üretilmiş olan küçük paket boyutlarındaki EPC2215 ($V_{DS}=200V$, $I_D=32A$, $R_{DS(on)}=8m\Omega$) GaN FET anahtarların sonlu elemanlar yöntemi tabanlı ısıl modelinin elde edilmesini ile ilgilidir. JEDEC standartlarınca belirlenen deney talimatları kurulan benzetim modeline uygulanmıştır. Anahtarın jonksiyondan kılıfa, jonksiyondan dış ortama ve jonksiyondan devre kartına olan ısıl dirençleri benzetim modeli ile hesaplanmış ve firmanın veri föylerinde paylaştığı ısıl direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra yine aynı firmaya ait olan, EPC2215 anahtarları ile yapılan, EPC9099 yarım-köprü geliştirme kartının ısıl modellemesi yapılmıştır. Firma tarafından veri föyünde paylaşılan kayıp güç değerleri benzetim modeline uygulanmıştır. Benzetim sonucunda geliştirme kartının ısıl yönden zorlandığı bölgeler belirlenmiştir. Daha sonra benzetim ile elde edilen ısıl dağılım sonuçları ile deneysel termal kamera görüntüleri karşılaştırılmıştır.

INVESTIGATION OF THE HEAT PERFORMANCE OF THE HALF-BRIDGE DEVELOPMENT BOARD WITH GAN POWER DEVICES

Keywords

GaN FET,
Thermal Management,
Steady-State Thermal
Analysis,
Finite Element Method,
EPC2215,
EPC9099.

Abstract

GaN FET switches have opened new horizons in power electronics converters due to their small package size and their ability to provide high operating voltage-current values at higher switching frequencies. This study presents the finite element method (FEM) based thermal model of EPC2215 ($V_{DS}=200V$, $I_D=32A$, $R_{DS(on)}=8m\Omega$) GaN FET switches produced by EPC company in small package sizes. Firstly, the test procedures determined by the JEDEC standards have been applied to the established FEM-based model. The thermal resistances of the switch from junction to case, junction to ambient, and junction to board have all been estimated using the FEM-based simulation model and compared with the thermal resistance values given in the datasheet. Afterwards, the thermal model of the EPC9099 half-bridge development board that uses EPC2215 switches has been developed. The power loss values given in the datasheet have been applied to the thermal model. As a result of the simulation, the regions where the development board was subjected to thermal stress were identified. Finally, the thermal map results obtained by the simulation have been compared with the thermal camera readings captured during experiments.

Alıntı / Cite

Göksu, Ö. F., Gülbahçe, M. O., Düşmez, S. (2022). GaN Güç Anahtarları ile Gerçeklenen Yarım Köprü Geliştirme Kartının Isıl Başarımının İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 550-560.

* İlgili yazar / Corresponding author: mogulbahce@fsm.edu.tr

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| Ö. F. Göksu, 0000-0002-5192-7055 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 19.11.2021 |
| M. O. Gülbahçe, 0000-0002-6689-8445 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 15.02.2022 |
| S. Düşmez, 0000-0002-3728-900X | Kabul Tarihi / Accepted Date | 08.03.2022 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, üretilen elektriksel cihazlarda ve bu cihazlarda kullanılan tümdevrelerin boyutlarında sürekli küçülme eğilimi görülmektedir. Bu sayede güç elektroniği yapılarının boyutlarında küçülme olmasına rağmen ihtiyaç duyulan enerji gereksiniminin her geçen gün artış göstermesi, istenen birim hacim başına güç yoğunluklarının da artmasına sebep olmuştur. İstenen gerilim ve akım değerlerini sağlayacak anahtarlama elemanlarının boyutlarının küçülmesi, günümüzde bu anahtarların yonga-boyutlu paketler şeklinde üretilmesini sağlamıştır. Ufak paket boyutlarına sahip olması, yüksek gerilim ve akım değerlerini yüksek anahtarlama frekans değeri ile sunmasından dolayı Galyum-Nitrat (GaN) FET anahtarlar, yüksek enerji verimliliği sebebi ile güç dönüştürücü yapılarında tercih edilmektedir. EPC firmasının 200 V savak-kaynak geriliminde ve sürekli halde 32 A savak akımında çalışabilecek GaN FET anahtarlarının paketleri sadece 7 mm² bir alana sahiptir. Bu özellikleri ile GaN FET tabanlı güç çeviricileri 6 kW güç değerine kadar tasarlanabilmektedir (Jones ve Rooij, 2018; Bulut vd., 2021).

Güç elektroniği devresi tasarımında anahtar paketi seçilirken, birçok etken ve fiziksel özelliğin dikkate alınması gerekmektedir. Güç elektroniğinde çeviricilerinde dikkat edilmesi gereken etken ve özelliklerin başında güvenlik, ısı yönetimi, seri üretime uygun tasarım ve uzun kullanım ömrü gelmektedir. Anahtarlar üzerinde açığa çıkan ısı enerjisinin verimli bir şekilde yapıdan uzaklaştırılması, yapının uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışması açısından en önemli etkidir. Fakat ısının güç çevirici yapısından uzaklaştırılması anahtar paket boyutlarının küçülmesi ile daha da zorlu bir hedefe dönüşmüştür. Sıcaklık artışı anahtar iletim dirençlerinin değişmesine neden olurken tasarlanan çeviricinin de veriminin düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar güç anahtarlarının ömürlerini azaltmakta ve güvenli çalışma bölgesi eğrilerini ciddi şekilde etkilemektedir. Bu nedenle bir güç elektroniği devresi tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden bir tanesi ısı yönetimidir (Ilhan ve BAŞKAYA, 2020; Gautam vd., 2013; Laloya vd., 2016).

Güç dönüştürücü yapılarında bulunan ısı yönetimi sisteminin iki önemli problemin önüne geçmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki yüksek güç kayıpları sonucunda ortaya çıkan ısı enerjisidir. Diğer ise bu ısı enerjisinin küçük paket boyutlarından dolayı anahtarlardan uzaklaştırılmasıdır. Bu problemlerin çözülmesi için pahalı, hacim olarak büyük ve ağır ısı yönetimi sistemleri tasarlandığı literatürde görülmektedir. Bu sistemler ısıyı yapıdan hızlı bir şekilde uzaklaştırmasına rağmen güç dönüştürücü yapısının maliyetini arttırmakta ve ısı yönetimi sistemi için harcanan güç arttığından dolayı verimi düşürmektedir (Huai vd., 2013; Ke and Blaabjerg, 2014).

Sistemdeki ısının uzaklaştırılması ile GaN FET anahtar tabanlı güç dönüştürücü yapılarının güç yoğunluğu artırılabilir. Yeni GaN FET anahtarlarının küçük yüzey alanına sahip olması, açığa çıkan ısı enerjisinin uzaklaştırılması sırasında darboğaza sebep olmaktadır. Verimli ısı yönetimi sistemlerinin kullanılması ile bu darboğaz aşılabilmekte ve istenilen verimli soğutma elde edilebilmektedir (Jones and Rooij, 2019; Gao vd., 2014).

Güç elektroniği devrelerindeki ısı analizler, hesaplamalı akışkan dinamiği ve sonlu elemanlar yönteminin birlikte kullanıldığı bir benzetim programları ile yapılabilir. Bu benzetim programları sayesinde sıcaklık analizi, ısı dağılımı ve sıcaklık gerilim testleri kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu testlerin amacı, tasarlanan güç elektroniği devre yapısı ve ısı yönetimi sisteminin birlikte çalışması sırasında meydana gelebilecek en yüksek çalışma sıcaklığını öngörebilmektir. Buna ek olarak devre üzerinde ısının yoğunlaştığı ve ısı yönetimi sistemindeki iyileştirilme yapılması gereken bölgelerin de tespiti yapılabilmektedir (Çiçek ve Şahin, 2020; Bulut vd. 2021).

Açığa çıkan ısının güç elektroniği elemanlarından uzaklaştırılması sağlıklı ve uzun ömürlü çalışma için önemlidir. Güç elektroniği devrelerinde ısıyı uzaklaştırmak amacıyla kullanılan en yaygın yöntem hava akışı ile elemanın soğutulmasıdır. Sistem üzerinde ısının ortaya çıktığı bazı bölgeler, tasarımdan dolayı hava akışının geçmesine uygun olmamaktadır. Bu durumlarda oluşan ısının hava akışının olduğu bölgeye taşınması gerekmektedir. Ayrıca bu ısının daha geniş yüzeylere taşınması da hava akışı ile soğutmaya yardımcı olmaktadır. Bu amaçla ısıyı hızlıca iletebilen katı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler iletim plakaları, ısı yalıtım malzemesi ve alüminyum ya da bakırdan üretilmiş soğutuculardır. Oluşan ısıyı güç elektroniği devresinden uzaklaştırmak için kullanılan üç temel yöntem bulunmaktadır; doğal hava akışı, zorlanmış hava akışı, sıvı soğutma. Doğal hava akışı, oluşan ısının ortamdaki hava yolu ile uzaklaştırılmasıdır. Zorlanmış hava akışı, oluşan ısının bir fan ya da hava akışını arttıran bir cihaz kullanılarak soğutma işleminin gerçekleştirilmesidir. Sıvı soğutma yöntemi, oluşan ısının sıvı malzemeye

aktarılması ve sonrasında bu sıvı malzemenin soğutulması ile gerçekleştirilen soğutma yöntemidir (Laloya vd.,2016; Blinov vd., 2011).

Bu çalışmada, öncelikle EPC firması tarafından üretilmiş olan EPC 2215 ($V_{DS}=200V$, $I_D=32A$, $R_{DS(on)}=8m\Omega$) GaN FET anahtarlarının ısı modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. JEDEC standartları gereği oluşturulan deney platformu kurulan sonlu elemanlar yöntemine dayalı ısı model üzerinde oluşturulmuştur. Anahtarın jonksiyondan kılıfa, jonksiyondan dış ortama ve jonksiyondan devre kartına olan ısı dirençleri sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve firmanın veri föylerinde paylaştığı ısı direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra yine aynı firmaya ait olan EPC9099 yarım-köprü geliştirme kartı ısı modeli elde edilmiş ve firma tarafından veri föyünde paylaşılan kayıp güç değerleri benzetim modeline uygulanmıştır. Geliştirme kartının anma çalışması sırasında ortaya çıkan ısı dağılımı elde edilmiş, devrenin ısı yönden zorlandığı noktalar belirlenmiştir. Daha sonra benzetim ile elde edilen sonuçlar ile termal kamera görüntülerinin elde edildiği deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Isıl Modelleme Yaklaşımı (Thermal Modeling Approach Based on Finite Element Method)

Güç elektroniği devrelerinde kullanılan bileşenlerin üreticinin belirlediği sıcaklık aralığında çalıştırılması gerekmektedir. Bu değer aralığının dışında kullanım bileşenleri tahrip olmasına veya istenilen şekilde çalışmamasına sebep olmaktadır. GaN FET anahtarları için üreticinin belirlediği sıcaklık değeri genellikle $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ile $125\text{ }^\circ\text{C}$ aralığındadır. Devre üzerindeki GaN FET anahtarların anma çalışmasındaki eriştiği sıcaklık değerini belirlemek için ısı modeli elde edilmelidir. Güç elektroniği devrelerinde kullanılan elemanların ısı yönden modellenmesi yapılırken ısı akışı sürekli, laminer ve sıkıştırılmaz kabulü ile Eşitlik (1)'de verilen Laplace denklemi çözülür. Bu denklemde T sıcaklığı temsil etmektedir.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Isı transferi yasaların göre bir malzemenin ısının iletilme hızı, ısı akışına normal alan ve ısı akış yolu boyunca sıcaklık gradyanıyla orantılıdır. Güç elektroniğinde kullanılan yarı iletken anahtarlarındaki aktif bölge, anahtarlama bölgesi, kılıf bölgesi, tümdevre bacak bölgesi gibi bölgelerin modellenmesi sırasında Eşitlik (1)'deki denklemin tek boyutlu özel hali olan Fourier denkleminin yararlanır. Burada Q birim zamanda transfer edilen ısı miktarını (W), k ısı iletkenliği ($W/(m^2K)$), A ısı geçişine dik olan yüzey alanını (m^2), T sıcaklığı (K) ve L ise malzemenin kalınlığını (m) göstermektedir.

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

Bir malzemenin ısı iletkenliği, birim alan başına ve birim sıcaklık farkı başına malzemenin birim kalınlığı boyunca ısı transfer hızı olarak tanımlanır ve malzemenin ısıyı iletme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Isıl iletkenlik tanımından yola çıkarak güç elektroniği anahtarlarındaki her bir bölgenin ısı dirençleri (R_θ) elde edilebilir.

$$R_\theta = \frac{L}{k \cdot A} \quad (3)$$

Güç elektroniği devrelerinde jonksiyondan kılıfa ya da kılıftan ortama ısı transferinin taşınım yöntemi ile mümkündür. Taşınım yöntemi ile ısı transferi ise Newton'un soğuma denklemi (Eşitlik 4) ile ifade edilebilir. Denkleminde Q birim zamanda transfer edilen ısı miktarını (W), h ısı taşınım katsayısını ($W/(m^2K)$), A ısı geçişine dik olan yüzey alanını (m^2), ΔT sıcaklık farkını (K) temsil eder.

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

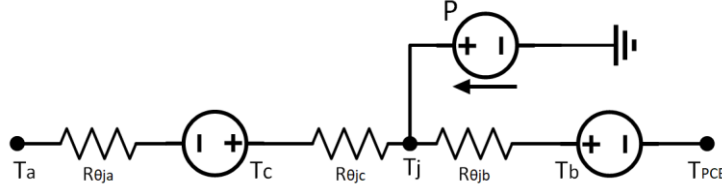
Isı taşınım katsayısı (h) birim yüzey alanından, birim sıcaklık farkında ve birim sürede taşınan ısı miktarıdır. Jonksiyondan kılıfa ya da kılıftan ortama herhangi iki yüzey arasındaki ısı transferini modellemek için Eşitlik (5)'te verilen ısı direnç yaklaşımı kullanılabilir. Burada $R_{\theta ij}$ yarıiletkeni çevreleyen herhangi bir ortam ile jonksiyon arasındaki ısı geçişini tanımlayan ısı direnci temsil etmektedir.

$$R_{\theta ij} = \frac{1}{(h \cdot A)} \quad (5)$$

Genellikle güç elektroniği devrelerinde kullanılan yarı iletkenlerin soğutulması için Eşitlik (4) ve Eşitlik (5)'den yola çıkarak Eşitlik (6)'daki genelleştirilmiş denklem elde edilir. Buradaki P yarı iletken üzerindeki kayıp gücü, T_i aktif bölge haricindeki dış bölgenin sıcaklığını, T_j ise jonksiyon sıcaklığını temsil eder.

$$R_{\theta ij} = \frac{(T_i - T_j)}{P} \quad (6)$$

Basit bir güç elektroniği anahtarının sürekli-hal ısı analizi için kullanılan eşdeğer ısı devre modeli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Anahtar eşdeğer ısı devre modeli (Equivalent thermal circuit model of switch)

T_j , T_C , T_B ve T_A sırasıyla jonksiyon sıcaklığını, tümdevre kılıf sıcaklığını, tümdevre taban sıcaklığını ve ortam sıcaklığını belirtmektedir. P ise ısıya dönüşen güç kaybını ifade eder. Isıl direnç değerleri ($R_{\theta JC}$, $R_{\theta JB}$ ve $R_{\theta JA}$) üretici firma tarafından belirtilen ve sonradan değiştirilemeyen değerlerdir. Fakat oluşan ısı enerjisi jonksiyondan uzaklaştırılırken, tümdevre kılıfı ve ortam arasındaki ısı direnç değeri ($R_{\theta CA}$) önem kazanmaktadır. Kullanılan soğutma yöntemine göre $R_{\theta CA}$ direnci değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle tasarım hedeflerini sağlayabilecek en uygun soğutma sisteminin seçilmesi gerekmektedir (Laloya vd.,2016).

Her ne kadar güç elektroniğindeki anahtarlama elemanları için bir boyutlu ısı dirence dayalı modelleme yaklaşımı basit olsa da doğruluğu tatmin edici değildir. Bu yüzden bir boyutlu ısı dirence ek olarak tüm boyutların hesaba katıldığı eşdeğer ısı yayılma direnci tanımı daha doğru bir yaklaşımdır. Fakat yarı iletken içindeki ısı yayılma direncini hesap etmek pek de kolay değildir. Yayılma direnci, küçük bir ısı kaynağı daha büyük bir soğutucu tabanı ile temas ettiğinde ortaya çıkar. Isı, soğutucu tabanı boyunca düzgün bir şekilde dağılmaz ve sonuç olarak taşınım ile soğutma için kanatlara verimli bir şekilde aktarılmaz. Bu özel problemin çözümü için izotropik ısı akış kanalının bir ucuna düzlemsel dikdörtgen bir ısı kaynağı yerleştirilir. Isı akışı kanalı ya yarı sonsuzdur ya da alt yüzey boyunca düzgün bir taşınım katsayısı ile soğutulur. Tanımlanan dikdörtgensel akış kanalı problemi ile Eşitlik (6)'da verilen ısı direnç Eşitlik (7)'deki gibi yeniden yazılır. Buradaki R_{toplaml} toplam ısı direnci, R_{1D} bir boyutlu ısı direnci, R_s ise ısı yayılma direncini temsil eder.

$$R_{\text{toplaml}} = R_s + R_{1D} \quad (7)$$

Isıl yayılım direnci bazı geometrik ve termofiziksel parametrelere bağlı olarak değişir. (Muzychka vd., 2003) Devredeki bulunan yarı iletken sayısına, çeşidine ve kullanılan soğutucu yapılarına göre çözümü oldukça karmaşık olabilir.

Bu çalışmada problemin karmaşıklığından dolayı ısı modelleme yapılırken sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, bütün bir parçayı, daha ufak parçalara bölerek bu ufak parçalarda ısı akışı denklemlerinin çözümüne dayanır. İlk adım, problemin alanını eleman adı verilen alt bölümlere ayrılmasıdır. Bu elemanlar üçgen veya dörtgen gibi birçok farklı şekil alabilir. Her bir elemanın geometrisini tanımlayan belirli sayıda düğüm ile karakterize edilirler. Problem ayrıklaştırıldıktan sonra, oluşturulan her bir eleman için yaklaşık çözümler varsayılır. Bu çözümlere şekil fonksiyonları da denir. Bunlar kolayca türevlenebildikleri için genellikle ikinci dereceden fonksiyonlardır. Şekil 2'de tek boyutlu bir doğrusal eleman gösterilmektedir. Bu eleman boyunca sıcaklık için genel bir çözüm Eşitlik 8'deki gibi yazılabilir (Logan, 2011; Razavi, 2016; Zienkiewicz vd., 2013);



Şekil 2. Bir boyutlu doğrusal eleman (One dimensional linear element)

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x \quad (8)$$

Buradaki α_1 ve α_2 çözülecek sabitlerdir ve her bir düğüm için yerine yazılırsa Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'daki denklem sistemi elde edilir.

$$T_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_1 \quad (9)$$

$$T_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_2 \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 α_1 ve α_2 katsayıları için çözümlerse Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 elde edilir.

$$\alpha_1 = \frac{T_1 x_2 - T_2 x_1}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (12)$$

Elde edilen eşitlikler Eşitlik 8'de yerine yazılırsa:

$$T = T_1 \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} + T_2 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = T_1 N_1 + T_2 N_2 \quad (13)$$

Eşitlik 13'ün türevi alınırsa her bir elemandaki sıcaklık değişimi elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= T_1 \frac{dN_1}{dx} + T_2 \frac{dN_2}{dx} \\ &= -T_1 \frac{1}{x_2 - x_1} + T_2 \frac{1}{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad (14)$$

Çok sayıda eleman ve düğümden oluşan bir sistem için bu işlem, tüm elemanlara şekil fonksiyonları uygulanarak yinelenmeli olarak yapılır. Buradan, tüm denklem sistemi Eşitlik 15'te gösterilen bir matris formuna dönüşür. Burada K matrisi T matrisinin katsayılarını, T matrisi ise sıcaklıkları ve sıcaklık değişimlerini, f matrisi ise bilinen parametreleri içermektedir.

$$[K][T] = [f] \quad (15)$$

Bu çalışmada modellenen GaN FET EPC firmasının EPC2215 isimli güç tranzistörüdür. Bu tranzistör 200 V savak-kaynak (V_{DS}) gerilim değerine, 32 A I_D akım değerine ve 8 m Ω (R_{DSon}) iletim direncine sahiptir. Tranzistöre ait üretici tarafından belirtilen ısıl karakter özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler, ortaya çıkan birim ısı enerjisi karşılığında yüzeyler arasında oluşan ısı farkını göstermektedir.

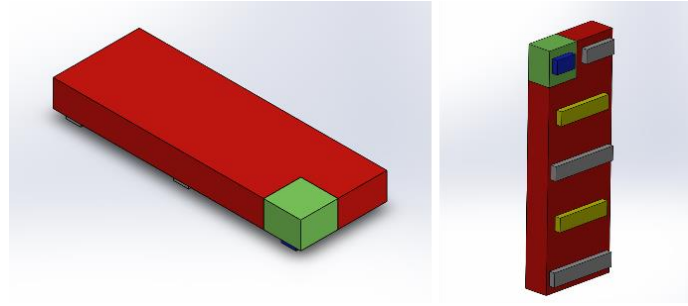
Tablo 1. EPC2215 GaN güç tranzistörü ısıl karakter özellikleri (EPC2215 GaN power transistor thermal characteristics)

| Parametre | $R_{\theta JC}$ | $R_{\theta JB}$ | $R_{\theta JA}$ |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Isıl Direnç | 0,5 C/W | 2,5 C/W | 52 C/W |

$R_{\theta JC}$ değeri, tranzistör aktif bölgesi ile kılıf üst yüzeyi arasındaki ısıl direnç değerini, $R_{\theta JB}$ değeri tranzistör aktif bölgesi ile tranzistör bacak alt yüzeyi arasındaki ısıl direnç değerini, $R_{\theta JA}$ değeri ise tranzistör aktif bölgesi ile bulunan hava ortamı arasındaki ısıl direnç değerini belirtmektedir. $R_{\theta JA}$ değeri üreticinin belirtmiş olduğu şartlarda ve ilave bir soğutucunun bulunmadığı durumda gerçekleştirilen test sonucunda ölçülmüştür. Bu değer soğutucu kullanımına ve elemanların baskı devre üzerindeki yerleşimine göre değişiklik göstermektedir.

3. EPC2215 Anahtarının Isıl Modelinin Oluşturulması (Creating the Thermal Model of the EPC2215 Switch)

Güç elektroniğinde bir anahtarın ısıl modeli oluşturulurken sonlu elemanlar yöntemi tabanlı benzetim programlarından yararlanır. Sonlu elemanlar yöntemi tabanlı benzetim programları içinse öncelikle anahtarlama elemanlarının ve devredeki diğer bileşenleri katı modelinin oluşturulması gerekmektedir. Katı model oluşturulurken öncelikle farklı karaktere sahip bölgeler belirlenmelidir. EPC2215 anahtarı içinse bu bölgeler; aktif bölge, anahtarlama bölgesi, kılıf bölgesi, tümdevre bacak bölgesi olarak belirlenmiştir. Anahtarın oluşturulan katı modeli Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. EPC2215 3B katı modeli (EPC2215 3D solid model)

Gri ve mavi renkli parçalar tranzistörün savak ve kaynak terminalerini gösterirken mavi renkli parça ise kapı terminalini göstermektedir. Yeşil renkli parça anahtarlama bölgesi olarak gösterilirken kırmızı renkli parça ise kılıf bölgesini temsil etmektedir. Kılıf bölgesi ile terminalerin birleştiği yüzey aktif bölge olarak tanımlanır. Modeli oluşturan malzemelerin ısı iletkenlik değerleri Eşitlik (3) yardımı ile hesaplanmıştır hesaplanan ısı iletkenlik değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. EPC2215 GaN güç tranzistörü ısı iletkenlik değer tablosu
(EPC2215 GaN power transistor thermal conductivity chart)

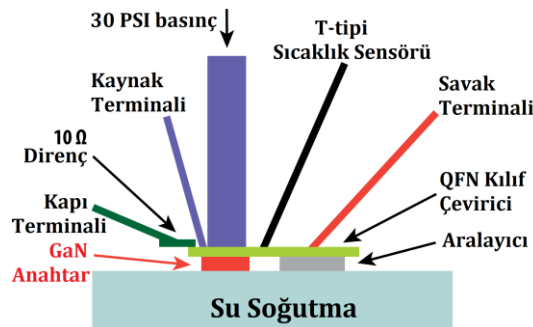
| Parametre | Malzeme Uzunluğu | Isıl Direnç | Isı İletim Alanı | Hesaplanan Isıl İletkenlik Değeri |
|-----------|------------------|-------------|----------------------|-----------------------------------|
| Kılıf | 0,5 mm | 0,5 °C/W | 7,36 mm ² | 136 W/m.°C |
| Terminal | 0,1 mm | 2,5 °C/W | 1,54 mm ² | 26 W/m.°C |

Aktif bölge ısı enerjisinin açığa çıktığı bölgedir ve ısı enerjisi bu kısımdan diğer bölgelere, bu bölgelerin temas ettiği diğer bölge ya da ortamlara yayılmaktadır. Anahtarlama bölgesi, tranzistörün kapı terminalinin bulunduğu bölgedir. Bu bölgede ısı üretimi bulunmamaktadır. Katı modelin oluşturulması sırasında aktif bölgeden ayrılması için modelden bağımsız olarak ayrı tasarlanmıştır. Kılıf bölgesi, aktif bölgenin üstünde bulunan ve tümdevrenin kalıp bileşenini (mold compound) temsil eder. Soğutucu kullanıldığında soğutucu bileşenler bu bölge ile temas etmektedir ve dış ortama ısı bu alan üzerinden yayılmaktadır.

Isıl karakteristiği belirlemek için kullanılan üç adet deney bulunmaktadır. Bunlardan ilki jonksiyon-kılıf deneyi, ikincisi jonksiyon-bacak deneyi ve üçüncüsü ise jonksiyon-ortam deneyidir. Bu deneylerin nasıl yapıldığı ve hangi parametrelerin belirlediği daha sonraki bölümlerde irdelenecektir. Bu deneyler ile tranzistörün ısı modeli belirlenmekte ve güç elektroniği devresinin tasarımı sırasında elde edilen model parametreleri kullanılarak devrenin çalışması sırasında ortaya çıkan ısının devreden uzaklaştırılması için çözümler üretilmektedir.

3.1. Jonksiyon-Kılıf ve Jonksiyon-Terminal Isıl Deneyleri (Junction-Case and Junction-Base Thermal Experiments)

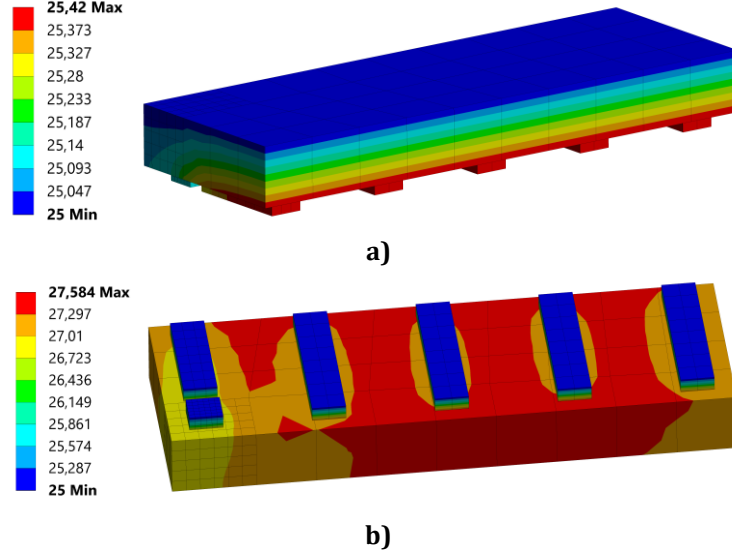
Jonksiyon-kılıf deneyi, aktif bölge ile tranzistör üst yüzeyi arasındaki ısı direnç değerini belirlemek için yapılırken jonksiyon-terminal deneyi ise aktif bölge ile tranzistör terminallerinin alt yüzeyi arasındaki ısı direnci belirlemek için kullanılır. Şekil 4, üretici tarafından gerçekleştirilen deney ortamını göstermektedir. Test sırasında tranzistörün kılıf üst yüzeyi ya da terminal alt yüzeyi sabit sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Isının sabit tutulması için genellikle sıvı soğutmalı bir soğutucu panel tercih edilir. Aktif bölgede 1 W ısı enerji harcanır ve aktif bölge ile karşılaştırılması yapılan diğer bölge arasındaki sıcaklık farkı sayesinde ısı direnç değeri belirlenmiş olur.



Şekil 4. Jonksiyon-Kılıf test platformu (Junction-Case test platform)

Bu çalışmada jonksiyon-kılıf ve jonksiyon terminal deneyleri standartlarca belirlenmiş olan deney adımları uyarınca sonlu elemanlar yöntemine dayalı ısıl benzetim programında yapılmıştır. Öncelikle katı model benzetim ortamına aktarılmış ve bölgeleri oluşturan tüm malzemeler ve bu malzemelerin ısıl iletkenlikleri benzetim programında tanımlanmıştır.

Sınır koşulları ve gerekli malzeme bilgisi tanımlandıktan sonra kılıf üst yüzeyi sabit sıcaklıkta (25 °C) tutularak benzetim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuç ile Jonksiyon-kılıf arasındaki ısıl direnç değeri belirlenmiş ve üretici tarafından veri föyünde paylaşılan değerle karşılaştırılmıştır. Benzetim sırasında GaN FET üzerinde ortaya çıkan ısıl dağılım Şekil 5'te izotropik olarak verilmiştir.



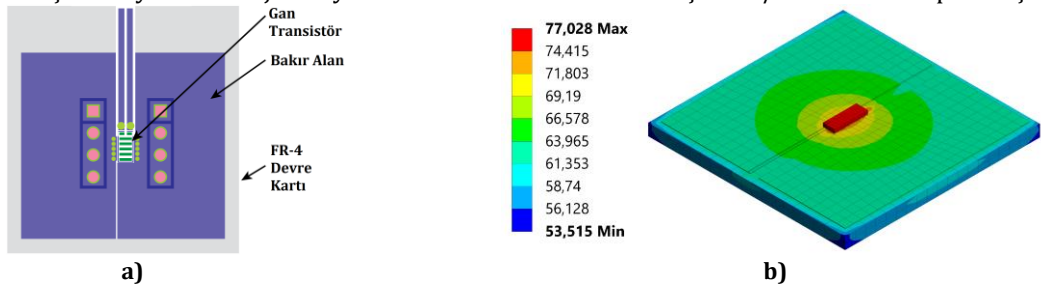
Şekil 5. a) Jonksiyon-Kılıf ve b) Jonksiyon-Terminal test benzetim sonuçları
(a) Junction-Case and b) Junction-Base test simulation results)

Deney adımları terminal alt yüzeyi için tekrarlanmış ve jonksiyon-terminal ısıl direnci de üretici firmanın paylaştığı değer ile karşılaştırılmıştır.

3.2. Jonksiyon-Ortam Isıl Testi (Junction-Ambient Thermal Experiment)

Jonksiyon-ortam testi sonucunda elde edilen ısıl direnç değeri, soğutucu kullanılmayan güç elektroniği devrelerinde sürekli-hal sıcaklık değerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Tranzistörün ısıl karakterinin benzetim ortamına tanıtılması için, ortaya çıkan kayıp gücün ortama iletiminin nasıl gerçekleşeceğini bilmesi gerekmektedir. Bu iletim tranzistör kılıf yüzeyi ile sağlanmaktadır. Benzetim üzerinde bunun sağlanması için yüzeye ait ısı taşınım katsayısı belirlenmelidir. Tranzistörün ortam ile olan ısı taşınım katsayısı hesaplanırken Eşitlik 5 kullanılmıştır ve 21 W/m² °C olarak hesaplanmıştır.

Bu değer benzetim üzerinde doğruluğunu test etmek için JEDEC standartlarına göre hazırlanmış test devresi sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Modellenen devre kartı Şekil 6'a da verilmiştir. Test edilecek tranzistör 645 mm² yüzey alanına sahip olup tek taraflı bakır yüzeyi olan FR4 devre kartı üzerine lehimlenmiştir. Tranzistör kartın ortasında konumlandırılmış, bakır alanın yarısı savak uçlarına, diğer yarısı da kaynak uçlarına bağlıdır. Ortam sıcaklığı (T_a) 25 °C'de sabit tutulmuş ve aktif bölgeye 1 W ısı enerjisi uygulanmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı ve sıcaklık değerleri Şekil 6b'de verilmiştir. Test sonunda elde edilen veriler kullanılarak Eşitlik 5 yardımı ile jonksiyon-ortam arasındaki ısıl direnç 52 °C/W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. R_{θja} direnç değerinin belirlenmesi a) Üretici tarafından belirlenen test devresi, b) Simülasyon sonucu
(Determination of R_{θja} resistance value a) Test circuit determined by the manufacturer, b) Simulation result)

Bu değer güç elektroniği devresi tasarımına göre değişiklik göstermektedir. Ortaya çıkan ısının devre kartına verimli bir şekilde aktarılması, soğutucu kullanılması gibi soğutmayı iyileştiren yöntemler jonksiyon-ortam direncinin ($R_{\theta ja}$) düşmesini sağlar.

3.3. Hesaplanan Termal Direnç Değerlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Calculated Thermal Resistance Values)

Üretici tarafından verilen ve benzetim yolu ile hesaplanan ısı direnç değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde, aradaki farkın en fazla %2 olduğu görülmektedir. Elde edilen verilen ışığında EPC2215 GaN FET’in yüksek başarılı bir modelinin elde edildiği aşikârdır.

Tablo 3. EPC2215 GaN FET’in deneysel ve modelleme ile elde edilen ısı dirençlerinin karşılaştırılması (Comparison of experimental thermal resistances and modeling thermal resistances of EPC2215 GaN FET)

| Parametre | Üretici bilgisi | Hesaplanan | Hata (%) |
|-----------------|-----------------|------------|----------|
| $R_{\theta jC}$ | 0,5 °C/W | 0,49 °C/W | 2 |
| $R_{\theta jB}$ | 2,5 °C/W | 2,48 °C/W | 0,8 |
| $R_{\theta jA}$ | 52 °C/W | 52 °C/W | 0 |

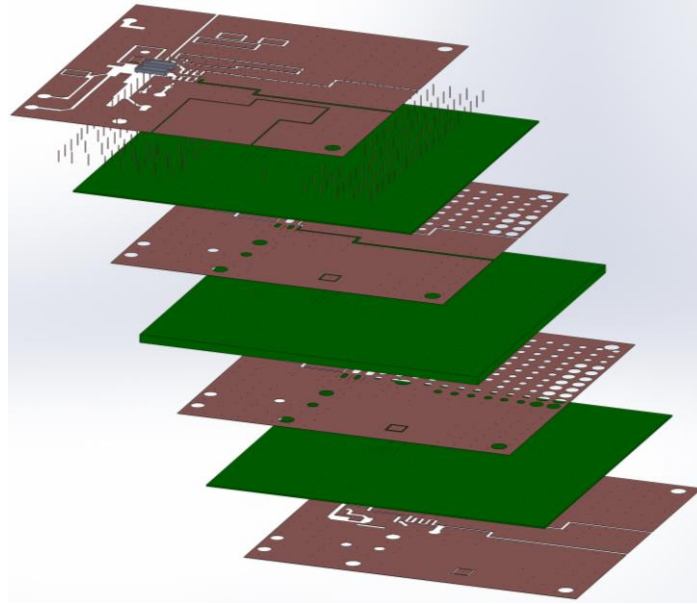
4. EPC9099 Geliştirme Kartının Isıl Modeli (Thermal Model of EPC9099 Development Board)

Bu bölümde 3. bölümde elde edilen ısı model yardımıyla EPC2215 GaN FET anahtarların bulunduğu gerçek bir güç dönüştürücü devresinin benzetimi yapılacaktır. Bunun için EPC firmasının üretmiş olduğu yarım köprü güç dönüştürücü geliştirme kartı olan EPC9099 seçilmiştir. EPC9099 geliştirme kartı 5 cm x 5 cm boyutlarında ve 4 katlı FR4 plakadan oluşmaktadır. Oda sıcaklığında ve fansız şekilde soğutulabilmesi için EPC firması tarafından özel olarak tasarlanmıştır. Soğutmanın etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için tüm katmanlarda 0.07 mm kalınlıkta bakır kullanılmıştır. Ayrıca tüm güç hatları kartın yüzey alanına yayılacak şekilde çizilmiş, yüzey alanları arttırılmıştır. Oluşan ısı etkin bir şekilde kartın bakır yüzeylerine aktarılmış ve geniş bakır yüzey alanları sayesinde anahtarlar için verimli bir soğutma sağlanmıştır. EPC firması tarafından yayınlanmış çizimler ve teknik özellikler kullanılarak katı model oluşturulmuştur. EPC9099 geliştirme kartının önden ve arkadan görünüşü Şekil 7’de gösterilmiştir.



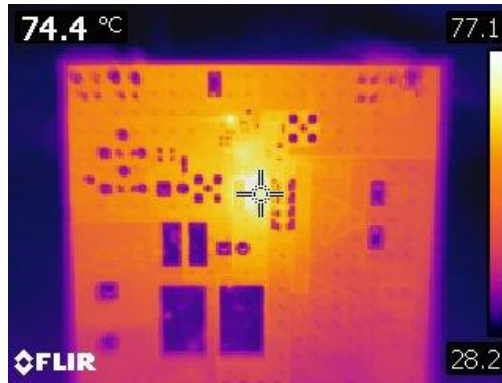
Şekil 7. EPC9099 Geliştirme kartı **a)** önden görünüş, **b)** Arkadan görünüş (EPC9099 Development board **a)** front view, **b)** rear view)

Geliştirme kartına ait katı modelin katman görüntüsü Şekil 9’da gösterilmiştir. Devre kartını oluşturan her katman ayrı bir model olarak oluşturulmuş ve sınır koşulları belirtilerek geliştirme kartı modeli ortaya çıkarılmıştır.



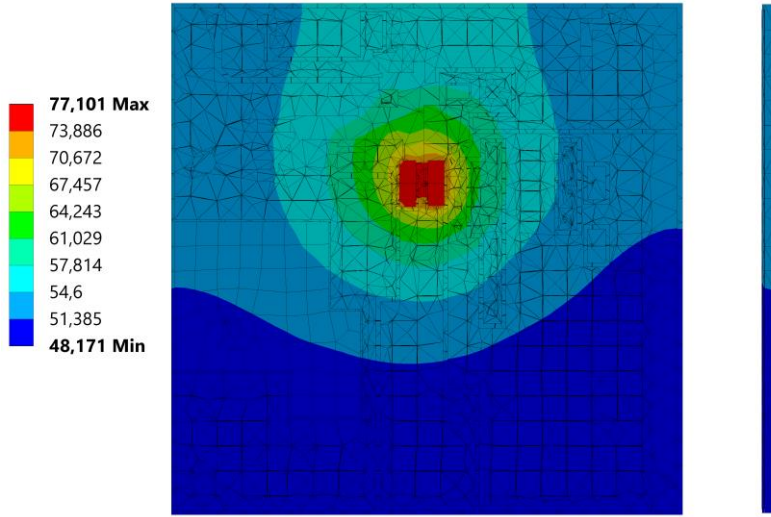
Şekil 9. EPC9099 geliştirme kartı katı modeli katman görüntüsü (EPC9099 development board solid model layers)

Geliştirme kartının gerçek sıcaklık testi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar sıcaklığı iklimlendirme cihazı ile 25 °C sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Geliştirme kartı, herhangi bir yüzeye temas etmeyecek ve alt - üst taraflarında hava akışını engellemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Geliştirme kartına laboratuvar tipi güç kaynağı ile güç sağlanmış, akım ve gerilim değerleri anahtarlar üzerinde istenen güç kaybı değeri elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. EPC9099 kartı üzerinde 2 adet GaN anahtar bulunmaktadır ve yarım köprü güç çevirici yapısı oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Anahtarlar üzerinde toplam 2,3 W güç kaybı oluşacak şekilde çalıştırılmıştır. Kart sıcaklığı test başlangıcından test bitimine kadar termal kamera ile izlenmiştir. Sıcaklık değerleri sürekli-hal durumuna geçene kadar test sürdürülmüştür. Elde edilen termal kamera görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. EPC9099 geliştirme kartının test ortamında termal kamera görüntüsü
(Thermal camera image in the test environment of the EPC9099 development board)

3. Bölümde elde edilen ısıl model yardımıyla geliştirme kartının benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucu ortaya çıkan ısıl dağılım Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. EPC9099 geliştirme kartının benzetimi sonucu ortaya çıkan ısı dağılımının üstten ve yandan görünümü (Top and side view of the heat dissipation simulation result of the EPC9099 development board)

Termal kamera görüntüsü incelendiğinde, kartın en sıcak noktasının $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, kart üzerinde bulunan iki transistörün orta alanına odaklanan noktada sıcaklığın $74,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Benzetim sonucunda ortaya çıkan ısı dağılımında en yüksek sıcaklığın $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir.

6. Sonuç (Conclusion)

Günümüzdeki güç elektroniğindeki kullanılan yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler istenen gerilim ve akım değerlerini sağlayacak anahtarlama elemanlarının boyutlarının küçülmesine ve bu anahtarların yonga-boyutlu paketler şeklinde üretilmesine olanak sağlamıştır. Şüphesiz ki bu gelişmelerin başında GaN FET anahtarların güç elektroniği çeviricilerinde kullanılabilecek çalışma sınırlarına erişmesi gelmektedir. Ufak paket boyutlarına sahip olması, yüksek çalışma gerilimini ve akımını yüksek anahtarlama frekanslarında sağlayabilmesinden dolayı güç elektroniği devrelerinde yeni ufuklar açmaktadır. Paket boyunun küçülmesi ve tasarlanan çeviricilerin güç yoğunluklarının artması ile ortaya çıkan ısının çevirici yapısından uzaklaştırılması zorlaşmıştır. Bu nedenle çeviricilerin tasarımında ısı yönetim büyük önem taşımakta ve ısı analizler yapılırken ısı geçişi çok boyutlu akış problemi olarak ele alınmalıdır.

Bu çalışmada, öncelikle EPC firması tarafından üretilmiş olan EPC 2215 ($V_{DS}=200\text{V}$, $I_D=32\text{A}$, $R_{DS(on)}=8\text{m}\Omega$) GaN FET anahtarlarının ısı modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Geleneksel bir boyutlu analiz yaklaşımının aksine, problem sonlu elemanlar yöntemi sayesinde çok boyutlu bir ısı geçişi problemi olarak ele alınmıştır. JEDEC standartlarıncı belirlenen deney ilkeleri kurulan benzetim modeline uygulanmıştır. Anahtarın jonksiyondan kılıfa, jonksiyondan dış ortama ve jonksiyondan devre kartına olan ısı dirençleri benzetim modeli sayesinde sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve firmanın veri föylerinde paylaştığı ısı direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında jonksiyondan kılıfa olan ısı direncin %2, jonksiyondan dış ortama %0 ve jonksiyondan devre kartına % 0.8'lik bir hata ile modellenebilmektedir.

Daha sonra yine aynı firmaya ait olan, EPC2215 anahtarları ile yapılan, EPC9099 yarım-köprü geliştirme kartının ısı modellemesi bir önceki adımda elde edilen EPC2215 anahtar modelleri ile yapılmıştır. Geliştirme kartının laboratuvar koşullarında ortam sıcaklığı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutularak anma koşullarında deneyleri yapılmış ve ortaya çıkan kayıp güç değerleri benzetim modeline uygulanmıştır. Benzetim sonucunda geliştirme kartının ısı haritası çıkarılmış ve ısı yönden zorlandığı bölgeler tespit edilmiştir. Daha sonra benzetim ile elde edilen ısı dağılım sonuçları ile deneysel termal kamera görüntüleri karşılaştırılmıştır. Termal kamera görüntüsünde geliştirme kartının en yüksek sıcaklığının $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu ve bu değer sonlu elemanlar modeline dayalı kurulan benzetim modeli ile elde edilen sonuçlarla birebir örtüştüğü ve çeviricinin ısı yönden yüksek başarılı bir şekilde modellenebildiği görülmüştür. Gelecek çalışmalarda ise bu çalışmadan yola çıkılarak elde edilen ısı model, EPC2215 anahtarlarla tasarlanan farklı çevirici topolojilerinin ısı analizleri için kullanılabilecek ve tasarlanan çeviriciler için en uygun soğutma yapısı belirlenebilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 2232 Uluslararası Burs Programının (Proje No: 118C374) katkılarıyla hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Blinov, A., Vinnikov, D., and Lehtla, T., 2011. Cooling Methods for High-Power Electronic Systems. *Scientific Journal of Riga Technical University*, 29, 79-86.
- Bulut, E.B., Gulbahce, M.O., Kocabas, D.A., and Dusmez, S., 2021. Simplified Method to Analyze Drive Strengths for GaN Power Devices. *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 1-8.
- Bulut, E.B., Gulbahce, M.O., Kocabas, D.A., 2021. Analysis of a GaN Based PWM AC-AC Converter with an Improved Switch Loss Model. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 131(8).
- Çiçek, B., Şahin, N., 2020. Sokak Aydınlatmalarında Kullanılacak Yüksek Güçlü Led'lerin Termal Performansının Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (1), 185-197.
- E. A. Jones and M. de Rooij, 2018. Thermal Characterization and Design for a High Density GaN-Based Power Stage. *IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, 295-302.
- Gao, C., Liu, H., Huang, J., and Diao, S., 2014. Steady-state thermal analysis and layout optimization of DC/DC converter. *Prognostics and System Health Management Conference*, 405-409.
- Gautam, D. S., Musavi, F., Wager, D. and Edington, M., (2013). A comparison of thermal vias patterns used for thermal management in power converter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2214-2218.
- Huai, W., Liserre, M., and Blaabjerg F., 2013. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7, 17-26.
- Ilhan, D. C., BAŞKAYA, Ş., 2020. Numerical investigation of thermal behaviour of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC, Si and Sapphire substrates. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 2125-2134.
- Jones, E. A., and Rooij, M., 2019. High-Power-Density GaN-Based Converters: Thermal Management Considerations. *IEEE Power Electronics Magazine*, 6(4), 22-29 .
- Ke, M., and Blaabjerg, F., 2014. Modulation Methods for Neutral-Point-Clamped Wind Power Converter Achieving Loss and Thermal Redistribution Under Low-Voltage Ride-Through. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 835-845.
- Laloya, E., Lucía, Ó., Sarnago, H. and Burdío, J. M., (2016). Heat Management in Power Converters: From State of the Art to Future Ultrahigh Efficiency Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(11), 7896-7908.
- Logan, D. L., 2011. *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.
- Muzychka, Y., Culham, J and Yovanovich, M.. 2003. Thermal Spreading Resistances in Rectangular Flux Channels: Part II - Edge Cooling. 10.2514/6.2003-4188.
- Razavi, S.M., 2016. *Advanced Thermal Analysis of Microelectronics Using Spreading Resistance Models*. Ph.D. Thesis. Memorial University of Newfoundland, Newfoundland.
- Zhou X., Wang T G., Lee F C. 1997. Optimizing design for low voltage DC-DC converters. *Proceedings of the Twelfth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 612-616.
- Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; Zhu, J. Z., 2013. *The finite element method: Its basis and fundamentals*. Butterworth - Heinemann.



C PROGRAMLAMA DİLİNDE KAYNAK KOD GÜVENLİĞİ: SECUREC

Meltem KURT PEHLİVANOĞLU^{1*}, Sinan ÇALIŞIR², Ceren GENÇ¹, Duygu Evrim ODABAŞ¹,
Berkehan ÖZTÜRK¹

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

² Revinat, Amsterdam, Hollanda

Anahtar Kelimeler

Yazılım Güvenliği,
Yazılım Güvenlik Açığı,
Doğal Dil İşleme,
Makine Öğrenmesi,
Yapay Zekâ.

Öz

Yazılım güvenliğinin temel amacı, yazılımı kötü niyetli siber saldırılara karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlamaktır. Yazılım güvenliği, yazılım yaşam döngüsünün her aşamasında ele alınmazsa, birçok işletme, kuruluş ve hatta hükümetler, yazılım sistemlerindeki güvenlik açıkları nedeniyle sömürülür. Güvenli yazılım sistemleri geliştirmede kaynak kodun analiz edilmesi önemli bir adımdır. Güvenli olmayan kaynak kodu bölümlerinin belirlenmesi, yazılımdaki güvenlik açıklarının azaltılmasına veya kaldırılmasına yardımcı olur. C programlama dili, en yaygın kullanılan programlama dillerinden biridir, ancak güvenli değildir ve kod yerleştirme saldırılarına karşı savunmasızdır. C programlama dilinin en yaygın güvenlik açıkları arabellek taşmaları, giriş doğrulamaları ve kaynak yönetimi hatalarıdır. Bu çalışmada, C programlama dilindeki güvensiz kaynak kodlarını tespit edebilen SecureC adlı bir yazılım aracı geliştirilmiştir. İlk olarak düzenli ifadeler kullanılarak yeni kod şablonları çıkarılmış, ardından bu yeni şablonlar kullanılarak veri setindeki kaynak kodlar işaretlenmiştir. Daha sonra yüzbinlerce satıra sahip kaynak koddan güvensiz kısımları tespit ederken işaretli veri kümesi ile işaretli veri kümesi arasında performans farkı olup olmadığına odaklanılmıştır. Sonuç olarak, işaretli bir veri kümesinin kullanılması hem ikili hem de çoklu sınıflandırmada performans artışı sağlamıştır.

SOURCE CODE SECURITY IN C PROGRAMMING LANGUAGE: SECUREC

Keywords

Software Security,
Software Vulnerability,
Natural Language
Processing,
Machine Learning,
Artificial Intelligence.

Abstract

The principal goal of software security is to design software to be resistant to malicious cyber-attacks. If software security is not handled at every stage of the life cycle of software, many businesses, organizations, and even governments are exploited due to security vulnerabilities in their software systems. Analyzing the source code in developing secure software systems is an important step. Identifying the insecure source code parts helps to reduce or remove vulnerabilities in software. The C programming language is one of the most-commonly used programming languages, but it is insecure and vulnerable to code injection attacks. C programming language's most common security vulnerabilities are buffer overflows, input validations, and resource management errors. In this paper, a software tool called SecureC has been developed, which can detect insecure source codes in the C programming language. Firstly, the new source code templates using the Regular expressions (Regex) were extracted, then the source codes in the dataset by using these new templates were marked. Then, it has been focused on finding whether there is any performance difference between the marked dataset and the unmarked dataset while detecting insecure parts from the source code that has hundreds of thousands of lines. As a result, the usage of a marked dataset ensured the performance improvement in both binary and multiple classification.

Alıntı / Cite

Kurt Pehlivanoglu, M., Çalışır, S., Genç, C., Odabaş, D.E., Öztürk, B. (2022). C Programlama Dilinde Kaynak Kod Güvenliği: SecureC, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 561-573.

* İlgili yazar / Corresponding author: meltem.kurt@kocaeli.edu.tr, +90-262-303-3571

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|---|---|------------|
| M. Kurt Pehlivanoglu, 0000-0002-7581-9390 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 02.12.2021 |
| S. Çalışır, 0000-0001-7600-3708 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 10.03.2022 |
| C. Genç, 0000-0003-4110-7018 | Kabul Tarihi / Accepted Date | 17.03.2022 |
| D. E. Odabaş, 0000-0002-4093-1366 | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |
| B. Öztürk, 0000-0001-6602-1347 | | |

1. Giriş (Introduction)

Yazılım yaşam döngüsünün temel aşamaları; planlama, analiz, tasarım, gerçekleştirim (kodlama ve test) ve bakımdır. Temelinde bu adımları içeren farklı yazılım yaşam döngüsü modelleri kullanılırken, yazılımın saldırılara karşı dirençli ve kusursuz tasarlanması beklenir. Yazılım güvenliğinin önemsenmediği durumlarda; kişiler, işletmeler ve hatta hükümetler güvenlik zafiyeti kaynaklı siber saldırılarla karşı karşıya kalmaktadır. Gerçekleşen birçok siber saldırının sebebi uygulama düzeyindeki güvenlik açıklarından kaynaklanmaktadır. Bu saldırıları engellemenin yöntemlerinden biri de özellikle kaynak kodlarındaki güvenlik zafiyetlerinin analiz edilmesi ve bu zafiyetlerin ortadan kaldırılmasıdır.

Yazılım zafiyetlerinin otomatik olarak tespit edilmesi, önemli bir araştırma problemidir. Ancak, bu sorunu çözmeye yönelik yazılım zafiyet tespit araçları kullanılmadığı durumlarda, kaynak kodunun güvenlik analizi insan gücüne bağlı kalmaktadır. Bu nedenle birçok güvenlik zafiyeti (özel uzmanlık alanı gerektirmesi, insan kaynaklı zafiyetlerin gözden kaçması vb. durumlar kaynaklı) tespit edilememektedir. En temel yazılım dillerinden biri olan C programlama dili, derlendiği zaman statik kod ortaya çıkardığı için güvenlik zafiyetlerine açıktır. Bu çalışma kapsamında, C programlama dili kaynak kodlarındaki güvenlik zafiyetlerinin tespiti amaçlı doğal dil işleme ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak, mevcut çözümlerdeki insana bağlılığı ortadan kaldırmak amaçlı SecureC adı verilen bir araç geliştirilmiştir.

Literatürde yer alan kaynak kod güvenlik zafiyetlerinin tespiti amaçlı yapılmış çalışmalar incelendiğinde, (Xu vd. 2018) modelin başarısını arttırmak amaçlı veri kümesinde yer alan kaynak kodların belirli şablonlara göre işaretlendiği görülmüştür. Bu kapsamda bu çalışmada, C programlama dili kaynak kodları için, detaylı işaretleme yapılabilmesi amaçlı düzenli ifadeler kullanılarak, kaynak kod üzerinde ortak şablonlar çıkarılmıştır. Veri kümesi olarak kullanılan C kaynak kodları, çıkarılan ortak şablonlara oturtularak, yapay zekâ modeline girdi olarak verilebilecek ortak bir yapı (form) elde edilmiştir. Veri kümesi üzerinde zararlı ve zararsız kaynak kodlarının tespiti amaçlı yapay bir Yinelemeli Sinir Ağı (Recurrent Neural Network-RNN) mimarisi olan Uzun Kısa Vadeli Hafıza Ağları (Long-Short Term Memory-LSTM) modeli kullanılmıştır. Çalışmada, işaretli veri kümesi ve işaretli veri kümesi üzerinde ikili (zararlı/zararsız) ve çoklu sınıflandırma (zararsız/zararlı (farklı zafiyet tiplerini içermektedir)) gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde Kim ve diğerlerinin (Kim vd. 2019) yaptıkları çalışmada veri kümesinin eksikliği sıkıntısından bahsedilmiştir. SecureC modelinde kullanılan veri kümesi daha başarılı sonuçlar elde etmek için genişletilmiştir.

1.1. Motivasyon ve Katkı (Motivation and Contribution)

C programlama dili güvenlik zafiyeti oluşturan ancak günümüzde birçok problemde kullanılan bir programlama dilidir. Bu kapsamda özellikle C programlama dili özelinde kaynak kod güvenliği kontrolünü yapabilecek yazılım araçlarının geliştirilmesi önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, LSTM modellerinden başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüş ve veri kümesinin yetersizliği açık bir problem olarak bırakılmıştır. Bu çalışmada, düzenli ifadeler kullanılarak kaynak kodlara ait ortak şablonlar çıkarıp, LSTM tabanlı zararlı ve zararsız kaynak kod analizi yapabilen SecureC olarak adlandırılan yeni bir yazılım aracı geliştirilmiştir.

SecureC modeli ile ikili sınıflandırma yapılırken farklı veri kümeleri birleştirilmiş ve daha başarılı sonuçlar alınması hedeflenmiştir. Kelime vektörlerinin oluşturulması aşamasında Github üzerinden açık kaynak kodlar alınarak hem veri kümesinin çeşitliliği artırılmış hem de sabit bir veri kümesine bağlı kalmadan Github üzerinde yer alan bu kodlardaki güvenlik açıkları tespit edilmiştir. Bu çalışmalar ile literatürde yer alan veri kümesinin yetersizliği sorununun giderilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma bu yönleriyle özgün olup, çalışmaya ait kaynak kodları erişime açık olarak paylaşıldığından diğer çalışmalar için yol gösterici, geliştirmeye açık bir model olacaktır.

1.1. Organizasyon (Organization)

Çalışmanın ikinci bölümünde, kaynak kod güvenlik zafiyetlerinin tespitinde literatürde yapılan çalışmalar verilerle açık problemler karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında önerilen

SecureC modeline ait kapsamlı bilgiler verilmiş olup, dördüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılarak ileriki çalışmalar verilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar (Related Works)

Literatürde yer alan kaynak kod güvenliği analizi ile ilgili çalışmalar araştırılarak, bu çalışmalara ait kapsamlı bilgiler aşağıda verilmiştir.

Kaur ve arkadaşları çalışmalarında (Kaur vd. 2020), kaynak kod güvenlik zafiyetlerinin tespitinde statik kod analizi için otomatik kod tarama araçlarının kullanımı üzerine çalışmışlardır. Çalışmada veri kümesi olarak, C ve C++ programlama dilleri için Juliet, Java programlama dili için ise APACHE Tomcat kullanılmıştır. Kaynak kod güvenlik zafiyetlerinin tespiti problemi ikili sınıflandırma problemine indirgenmiştir. Statik kod analizinde C ve C++ programlama dilleri için FLAWFINDER, RATS, CPPCHECK, Java programlama dili için ise SPOTBUGS, PMD araçları kullanılmıştır. Güvenlik zafiyetinin bulunmasında en yüksek performans Soyut Sözdizimi Ağacı (Abstract Syntax Tree) yöntemi ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda kullanılan araçların bazı güvenlik zafiyetlerini tespit edemediği görülmüştür.

Li ve arkadaşları çalışmalarında (Li vd. 2020), otomatikleştirilmiş akıllı güvenlik açığı tespit etmek için kaynak kod temelli minimum Ara Temsil (IR) öğrenim modeli geliştirmişlerdir. SARD ve NVD veri kümelerinden CWE-119 ve CWE-399 hatalarının örneklerini, savunmasız programlama örüntülerini bulmak için kullanmışlardır. Derin öğrenme yöntemleri için; Ardışık Evrimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network-CNN) %75.9, Ardışık LSTM %69.1, Çift Yönlü Uzun Kısa Vadeli Hafıza Ağları (Bi-LSTM) %75.7, CNN+Bi-LSTM %84.9, Birleştirilmiş CNN %89.5 F1 skorları elde edilmiştir. Sınıflandırma algoritmaları için; Lineer Regresyon % 90.5, Naive Bayes %72.8, SVM %92.6, Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) %89.5, Gradyan Artıran Karar Ağacı (GBDT) %92.2, Rastgele Orman %93.0 F1 skorlarını elde etmişlerdir.

Verma ve arkadaşları çalışmalarında (Verma vd. 2020), doğal dil işleme yöntemleri kullanılarak kimlik avı e-postaları sınıflandırmışlardır. Çalışmada, K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors-KNN), Rastgele Orman, Lojistik Regresyon, SGD, Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine-SVM) ve Doğrusal Sınıflandırma modelleri üzerinde sırasıyla 94.75, 97.55, 98.42, 98.56, 98.34, 98.70, 98.77 doğruluk oranları elde edilmiştir.

Suneja ve arkadaşları çalışmalarında (Suneja vd. 2019), C programlama dili kaynak kodları üzerinde güvenlik zafiyetlerinin tespiti amaçlı Graf Sinir Ağı (Graph Neural Network-GNN) uygulanabilirliğini araştırılmıştır. AI4VA olarak adlandırdıkları boru hattı üzerinden, GNN çıktısı alınıp, alınan çıktının anlamsal bilgisi korunarak vektörleştirilmiştir. AI4VA boru hattı yardımı ile C fonksiyonları zararlı ve zararsız olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada Juliet, Draper ve sbAbI veri kümeleri üzerinde Evrimsel Sinir Ağları (CNN) ve RNN derin öğrenme modelleri kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Draper veri kümesi üzerinde CNN modeli ile 0.53 F1 skoru elde etmişlerdir.

Kim ve arkadaşları çalışmalarında (Kim vd. 2019), kaynak kodunun modellenmesi için makine öğrenimi yaklaşımlarından faydalanmışlardır. Sözdizimi, semantik ve kaynak akışından yararlanarak büyük kod parçalarının üstesinden gelmek ve mevcut statik yazılım analiz araçlarının kaçıracağı olası güvenlik zafiyetlerinin tespit edilebilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada FFmpeg, LibPNG ve LibTiff veri kümeleri üzerinde Bi-LSTM modeli ve sınıflandırma yöntemi olarak '1-vs-Rest Layer' stratejisi ile çalışılmıştır. Çalışmanın kalitesinin ve performansının artırılabilmesi için daha fazla açık kaynak kodunun toplanması ve hiper parametrelerin çoğaltılması gerektiği vurgulanmıştır.

Li ve arkadaşları çalışmalarında (Li vd. 2019), kaynak kod güvenlik zafiyetlerinin tespitinde derin sinir ağı yöntemi kullanmışlardır. Büyük ölçekli açık kaynak kodlarındaki zayıf fonksiyonları ortaya çıkarmak için semantik özellikler olarak fonksiyon adlarını kullanmışlardır. Fonksiyon isimlerini çıkarıp, zararlı ve zararsız olarak gruplandırmışlardır. Fonksiyon adlarını birbirinden ayırmak için CWE güvenlik zafiyetlerine odaklanmışlardır. Kullandıkları derin sinir ağı tabanlı yöntemden elde edilen deneysel sonuçlara göre C/C++ ve Python programlama dillerinde sırasıyla 0.91 ve 0.915 F2 skoru elde etmişlerdir.

Larrucea ve arkadaşları çalışmalarında (Larrucea vd. 2019), OpenNCP platformunun güvenlik analizini sağlama ve platformun kaynak kodunda güvenli kalıpları belirleme üzerine çalışmışlardır. Analizin ana sonuçlarından biri, güvenlik ile ilgili OpenNCP modüllerinin en fazla güvenlik açığına sahip olanlar olmasıdır. Bu nedenle, bir üye devlet, ulusal sağlık sistemi hizmetlerini geri kalan sistemlerle birleştirmek için bu platformu kullanmayı hedefliyorsa, ek önlemler gerektiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca en yaygın iki zayıflığı sırasıyla CWE-493 ve CWE-798 olarak belirlemişlerdir.

Xu ve arkadaşları çalışmalarında (Xu vd. 2018), kaynak kod güvenlik zafiyetlerinin tespitinde Bağlamsal Uzun Kısa Süreli Bellek (CLSTM) modelinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmalarını, C ve C++ özelinde doğal dil işleme yöntemlerini kullanarak yapmışlardır. Kod içerisinde değişken isimleri var1, var2 vb., fonksiyon isimleri ise func1, func2 vb. şekilde standartlaştırılmıştır. Çalışmalar SARD veri kümesi ile sadece CWE-119 ve CWE-399 zafiyetleri üzerinde yapılmıştır. Farklı modellerle yapılan çalışmalar sonucunda CNN modeli için 0.95821, LSTM modeli için 0.95902, Bağlamsal Uzun Kısa Vadeli Hafıza Ağları (Contextual Long-Short Term Memory-CLSTM) modeli içinse 0.96711 doğruluk oranlarını elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ile CLSTM modelinin zafiyet tespiti için en iyi model olduğu sonucuna varılmıştır.

Xiaomeng ve arkadaşları çalışmalarında (Xiaomeng vd. 2018), zararlı kaynak kodu incelemeleri için derin öğrenme yöntemlerinin ve temel kod özelliği grafiğinin kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada, Kod Özellikli Graf (Code Property Graph-GPG), NLP ve derin öğrenme yöntemleri karışık olarak kullanılmıştır. SARD veri kümesi üzerinde yapılan çalışmalarda, CPGVA ile CNN, Zamansal Evrişimli Sınır Ağı (TCNN), LSTM ve LeNet modellerinin kullanılması ile sırasıyla: 91.1, 90.7, 90.7, 88.9 F1 skorları elde edilmiştir. Vudeepecker modeli ile ise 86.6 F1 skoru elde edilmiştir. Çalışma sonucunda CNN tabanlı yöntemlerin RNN tabanlı yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

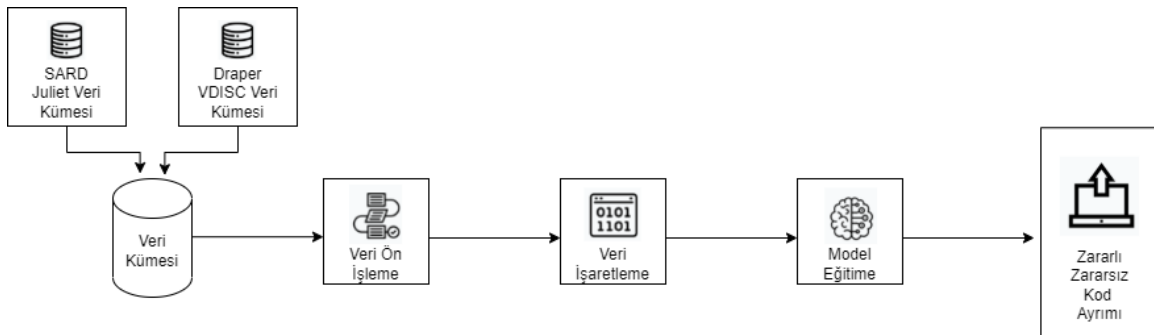
Tian ve arkadaşları çalışmalarında (Tian vd. 2020), C ve C++ dilleri için kütüphane ve API method çağırımlarının olduğu İkili Kapılı Tekrarlayan Birim (Binary Gated Recurrent Unit-BGRU) ağ modeli temelli BV-Detector adını verdikleri bir model geliştirmişlerdir. Oluşturdukları model ile ikili (binary) programlarda zafiyet tespiti yapmışlardır. Çalışmada Software Assurance Reference Dataset (SARD) (SARD, 2021) veri kümesi kullanılmıştır. Veriler 3 test kümesi olarak ele alınmıştır. Toplamda 17,466 güvenlik açığı olan, 66,093 güvenlik açığı olmayan veri üzerinde çalışmışlardır. Verilerin %80'ini eğitim, %20'sini ise test için kullanmışlardır. Kodlardan belirli parçaları çıkarabilmek için Angr isimli ikili analiz araçları kullanılmıştır. Kelime vektörlerinin oluşturulması için Word2Vec kullanarak toplamda 92,568 adet token elde edilmiştir. BGRU modelinde en iyi F1 skor değeri 89.9 iken, LSTM modelinde ise bu değer 85.9 F1 olarak elde edilmiştir.

Cao ve arkadaşları çalışmalarında (Cao vd. 2021), C ve C++ dillerinde zafiyet tespiti için BGNN4VD adını verdikleri bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde kodun semantik özellikleri ve sözdizimini anlayabilmek için Soyut Sözdizimi Ağacı, Kontrol Akış Grafiği ve Veri Akış Grafiği kullanılırken, kelime vektörlerinin temsili için Word2Vec kullanılmıştır. Toplamda 2,149 adet güvenlik açığı olan veriyi NVD (National Vulnerability Database) ve Github açık kaynak kodları kullanarak toplamışlardır. Graf yapısını bozabileceği için kod içerisindeki tüm açıklama satırları kaldırılarak, manuel etiketleme gerçekleştirmişlerdir. Etiketleme tutarlılığını karşılaştırmak için işaretlenen her %10 veride bir Cohen'in Kappa katsayısı kullanılmıştır. 3,867 method zafiyetli, 92,058 method güvenli olarak işaretlenmiştir. Veri kümelerini herkesin erişimine açık olarak github üzerinden paylaşmışlardır. Modelde %74.4 doğruluk, %76.3 duyarlılık, %77.3 kesinlik ve %76.8 F1 skor değerleri elde edilmiştir.

Yukarıda verilen, kaynak kod kaynaklı zafiyetlerin önlenmesi amaçlı literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde özellikle LSTM modellerinin başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Bu kapsamda bu çalışmada, zararlı ve zararsız kaynak kodların sınıflandırılması için derin öğrenme tabanlı LSTM modeli kullanılmıştır.

3. Önerilen Model: SecureC (Proposed Method: SecureC)

Çalışma kapsamında önerilen ve C programlama dili için zararlı kaynak kodların tespit edilmesini sağlayan SecureC yapay zekâ modeline ait sistem mimarisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Sistem mimarisi (System architecture)

Şekil 1'de verilen SecureC'ye ait sistem mimarisi incelendiğinde, zararlı ve zararsız kaynak kodlarının sınıflandırılacağı LSTM tabanlı model eğitilmeden önce ilk adım veri kümesinin oluşturulması adımdır. Çalışmada

SARD veri kümesi altında verilen test kümelerinden (SARD Test Suites) Juliet veri kümesi (Juliet Test Suite for C/C++, 2021) ile Draper VDISC (Draper VDISC Dataset, 2021) veri kümeleri birleştirilerek hibrit bir veri kümesi oluşturulmuştur. İkinci adımda ise, veri kümesinde yer alan C kaynak kodları veri ön işlemeden geçirilmiş, daha sonra bu kaynak kodları üzerinde ortak bir şablon oluşturulmak amaçlı düzenli ifadeler kullanılarak işaretlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin yanı sıra hem işaretli hem de işaretsiz kelime temsil modelleri oluşturulmuştur. İşaretsiz gözlemlere ait LSTM modelinin eğitimi için işaretsiz verilerden oluşturulan kelime temsil modeli kullanılırken, işaretli gözlemlerin ait modelin eğitimi için ise işaretlenmiş verilerden oluşan kelime temsil modeli kullanılmıştır. Daha sonra LSTM modeli eğitilerek, zararlı ve zararsız kaynak kodlarının tespiti gerçekleştirilmiştir.

3.1. Veri Kümesi (Dataset)

Çalışma kapsamında, SARD-Juliet veri kümesi, Draper VDISC veri kümesi ve Github repoları üzerinden toplanan C kaynak kodları birleştirilerek hibrit bir veri kümesi oluşturulmuştur.

3.1.1. SARD-Juliet Veri Kümesi (SARD-Juliet Dataset)

SARD veri kümesi, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology-NIST) tarafından oluşturulan, farklı programlama dillerinde yazılan kod parçacıkları üzerinde zafiyete sebep olacak kod parçalarının etiketli olarak verildiği veri kümesidir. Bu veri kümesi içinde C, C++, Java, PHP ve C# programlama dillerinde yazılmış sırasıyla 170,000'in üzerinde farklı kaynak kodu ve bu kodlar içerisinde yer alan 150'den fazla güvenlik zafiyeti sınıfları etiketlenmiştir. Veri kümesi içinde her bir zayıflık Ortak Zayıflık Numaralandırması (Common Weakness Enumeration-CWE) kullanılarak (CWE-ID) gösterimiyle temsil edilmiştir. Veri kümesi içerisinde her bir programlama dili için ayrı örneklemeler yer almaktadır. Bu çalışmada C programlama dili özelinde (Juliet Test Suite for C/C++) veri kümesi içinden sadece C programlama dili örneklemeleri indirilmiştir. Bu veri kümesi içinde 109 farklı CWE türü yer almaktadır.

3.1.2. Draper VDISC Veri Kümesi (Draper VDISC Dataset)

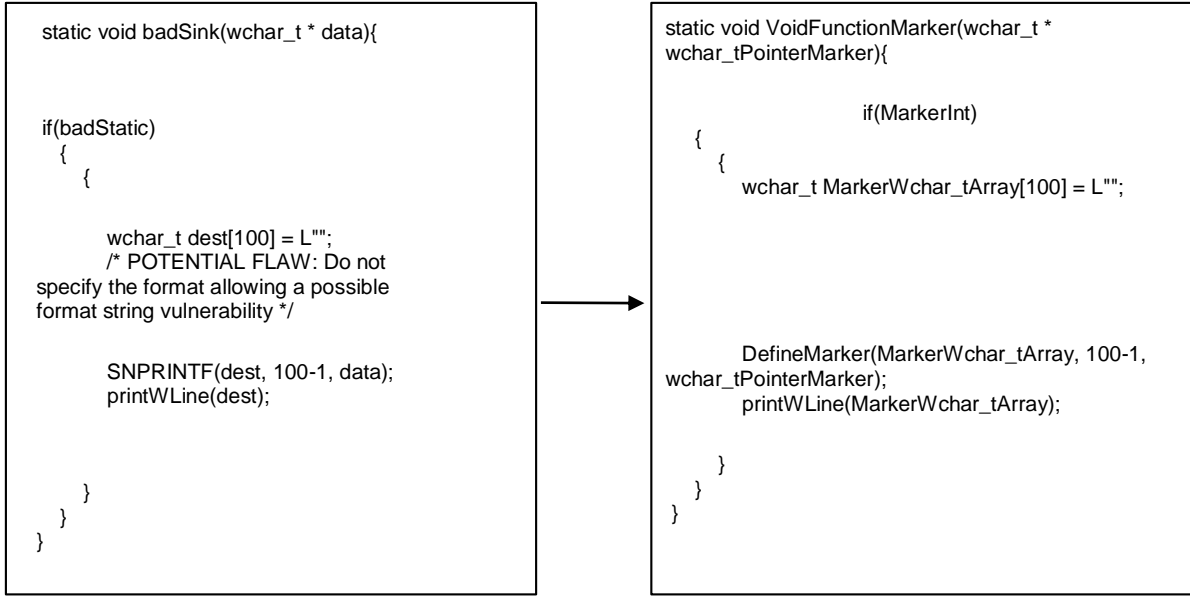
Draper VDISC veri kümesi açık kaynak projelerinden çekilmiş, statik analizlerde kullanılmak amaçlı C programlama dili için benzersiz 1,27 milyon veri içermektedir. Bu veriler, fonksiyon ismi de dahil olmak üzere fonksiyon alanını içermektedir. Veri kümesi içerisinde bulunan veriler, %80 eğitim, %80 validasyon ve %20 test olacak şekilde üç farklı HDF5 uzantılı dosyaya ayrılmıştır. Mevcut kaynak kodları, en yaygın 5 CWE türü (CWE-120 (fonksiyonların %3.7'si), CWE-119 (fonksiyonların %1.9'u), CWE-469 (fonksiyonların %0.95'i), CWE-476 (fonksiyonların %0.21'i)) ve diğerleri (CWE-other (fonksiyonların 2.7%'i)) olarak 5 sütun altında, zararlı olanlar 0 zararlı olmayanlar 1 olacak şekilde işaretlenmiştir.

3.2. Veri Ön İşleme (Data Preprocessing)

Bu çalışmada önerilen SecureC modeli için veri ön işleme adımları aşağıda kapsamlı olarak sunulmuştur. Bu adımlarda veri kümesi olarak kullanılan C programlama dili kaynak kodları doğal dil işleme yöntemleri kullanılarak ortak bir kod şablonuna oturtulmuş, böylece yapay zekâ modeline girdi olarak verilebilecek genel bir forma dönüştürülmüştür. Kod kalıplarının belirli kurallar çerçevesinde standartlaştırılması diğer bir ifadeyle genel kod şablonunun çıkarılması, kod semantiğinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.

C programlama dili kaynak kodlarının içeriğine ait genel bir kod şablonunun oluşturulabilmesi için düzenli ifadeler kullanılmıştır. Çalışmada, standartlaştırma sürecinde düzenli ifadelerin kullanımı ile genel şablonun oluşturulabilmesi için kullanılan ifadelerin daha esnek ve anlaşılabilir hale getirilebilmesi mümkün olmuştur.

Çalışmada, düzenli ifadeler kullanarak kod parçacıklarının ortak bir şablonda ifade edilmesi sağlanmıştır. Düzenli ifadelerin kullanımıyla elde edilen faydalar şu şekilde özetlenebilir; 1) toplu olarak değiştirilmek istenilen kod parçacıklarını kolay bir şekilde tespit edilmesi, 2) karmaşık ve yüksek boyutlu bir veri kümesindeki kod parçacığının daha hızlı tespit edilmesi, 3) tespit edilen kod parçacığının oluşturulan kod şablonuna uygun şekilde değiştirilebilmesi.



Şekil 2. Düzenli ifadelerle C kaynak kodlarının işaretlenmesi (Marking of C source codes with regex)

Şekil 2’de düzenli ifadeler kullanılarak işaretlenen bir kod parçası örneği verilmiştir. Şekil 2’deki örnekte; fonksiyon ismi fonksiyonun dönüş tipine göre, fonksiyonun aldığı parametreler ise parametrenin tipine göre işaretlenmiştir. Fonksiyonun kapsamı içinde bulunan “badStatic” değişkeni, fonksiyon kapsamı dışında tamsayı (integer) tipinde tanımlanmış bir değişkendir. Bu nedenle “MarkerInt” olarak işaretlenmiştir. Fonksiyon kapsamında bulunan “wchar_t” tipindeki “dest” isimli değişken, tipine uygun olarak “MarkerWchar_tArray” şeklinde işaretlenmiş ve fonksiyon kapsamı boyunca kullanıldığı yerlerde “MarkerWchar_tArray” olarak değiştirilmiştir. Yorum satırları modelin başarısını olumsuz etkileyeceği düşünülerek işaretli kod parçasından atılmıştır. “SNPRINTF”, define ön işlemci komutu ile dosyanın başında tanımlanmıştır. Define ön işlemci komutu ile tanımlanan tüm değerler “DefineMarker” olarak işaretlenmiştir.

İşaretleme sırasında karşılaşılan dört farklı probleme ait uygulanan çözüm yaklaşımları aşağıda verilmiştir.

- **Aynı isimli fakat farklı tipte değişkenlerin tespit edilmesi problemi:** Aynı isimli fakat farklı değişken tipine ait değişken isimlerinin ayrı tiplere göre işaretlenebilmesi için, karşılaşılan değişken isimlerinin ilgili dosya içerisindeki başlangıç indekslerinin tutulması gerekmektedir. Belirlenen işaret ile değişken isminin değiştirilmesi ile ilgili adımda, karşılaşılan ilk değişken isminin indeksinden başlanarak, aynı isimli değişkenin görüldüğü diğer en küçük indekse kadar olan kısımda sadece belirlenen işaret ile değişim gerçekleştirilmiştir.
- **İndex kayması problemi:** İlk adımda verilen problem çözümünden sonra değişken isimleri, farklı bir değişken ismiyle işaretlenerek değiştirildiği için iki tanımlama arasındaki karakter farkından dolayı index kayması problemi ortaya çıkmıştır. Özellikle çok fazla sayıda kaynak kod içeren büyük veri kümelerinde index kayması nedeniyle kod parçacıklarının içeriği bozulacaktır. Bu problemin önüne geçmek amacıyla, her değişken ismi işaretleme işleminde, değişimin yapılmaya başlandığı indeksten büyük indeks değerine sahip değişkenlerin başlangıçta tutulan indeksleri, değişim esnasında oluşan karakter sayısı farkı kadar arttırılmıştır. Bu sayede işaretlenecek değişkenin, işaretlenmeden önceki karakter sayısı ile işaretlendikten sonraki karakter sayısı arasındaki fark yüzünden oluşan indeks kayması ortadan kaldırılmıştır.
- **Fonksiyon alanının belirlenmesi problemi:** Bu problemde, C dilinde fonksiyon alanının başlangıcını temsil etmek için kullanılan “{” karakteri ile fonksiyon alanının bitişini temsil eden “}” karakterinin ayrı ayrı sayılması gerekmektedir. “{” karakterinden sonra “}” karakterinin gelişine kadar arada farklı amaçlar ile kullanılan “{” ve “}” karakterlerinin sayısı da sayma işlemine dahil edilmiştir. “{” karakterinin sayısı ile “}” karakterinin sayısının eşit olması durumunda bir fonksiyon alanının tamamlandığı anlaşılır ve fonksiyon aralığını temsil ettiği anlaşılabilir kod parçacığı ayrı olarak işaretlenmiştir. İlgili fonksiyon aralığı, kod satırlarındaki kaymayı engellemek amacıyla işaretleme işlemi yapılmadan önce, veri kümesinden çıkarılmıştır. Daha sonra işaretlenen fonksiyon aralığı veri kümesi içerisine işaretlenmiş haliyle tekrar eklenmiştir. Bu adımda uygulanan yöntem sonucunda, veri kümesindeki fonksiyon aralıkları çıkarılan kod şablona uygun hale gelmiştir.
- **Farklı struct tanımlama problemi:** C programlama dilinde “struct” veri yapısı farklı şekillerde tanımlanabilir. Bu nedenle çalışma kapsamında, “struct” tanımlamalarına ait ortak bir şablon

oluşturulması amaçlı, her kod parçacığının “struct” içerip içermediğini kontrol eden, eğer “struct” içeriyorsa uygun şekilde işaretleme yapan fonksiyon yazılmıştır. Her bir “struct” tanımlama yöntemi, ayrı ayrı değerlendirilerek tanımlama tiplerine uygun düzenli ifadeleri içeren işlemler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede “struct” tanımlamaları için yazılmış düzenli ifade komutları, veri kümesi içerisinde bulunan diğer kod parçacıklarını etkilememiştir.

Çalışma kapsamında, kaynak kodların düzenli ifadeler içeren ortak şablonlara oturtulması sırasında karşılaşılan dört farklı probleme ait yukarıda verilen çözümler uygulanarak C kaynak koduna ait genel bir kod şablonu oluşturulmuştur. Bu sayede veri kümesinde kullanılan tüm kaynak kodlar ortak ve genel bir kod şablonu ile temsil edilmiştir.

3.3. Kelime Temsillerinin Çıkarılması (Extracting Word Embeddings)

Çalışma kapsamında, veri kümesi içerisinde bulunan kaynak kod parçaları Byte Çifti Kodlaması (Byte pair encoding-BPE) ile simgelere (tokens) ayrılmıştır. Bu işlemten sonra kelime temsillerinin oluşturulması için CBOW ve Skip-gram temelli Word2Vec modeli oluşturulmuştur.

Word2Vec modeli girdi olarak her bir kaynak kod parçası için oluşturulan simgeleri liste olarak alır. Çalışma kapsamında kullanılan SARD-Juliet ve Draper VDISC veri kümelerindeki her bir kaynak kodun içerisindeki tokenlar (BPE’den gelen) Word2Vec modeliyle kelime vektörlerine dönüştürülmüştür. Daha fazla kelime temsillerinin oluşturulması amaçlı, SARD-Juliet ve Draper VDISC veri kümelerine ek olarak Github repoları üzerinden de C kaynak kodları bu adımda kullanılmıştır. Github repolarından toplamda 72,784 farklı C kaynak kodu toplanmıştır. Bu kaynak kodlarının 58,283 tanesi işaretlenerek işaretli veri kümesine ait kelime vektörlerini temsil etmesi amaçlı kullanılmıştır.

Word2Vec modeli oluşturma işlemi, hem işaretlenmiş (düzenli ifadeler kullanılarak), hem de işaretlenmemiş veri kümesi için ayrı ayrı yapılmıştır. LSTM modelinde verilerin eğitimi için hem işaretli hem de işaretli veriler kullanılarak iki farklı model oluşturulduğundan; işaretli verilerin eğitimi için işaretli gözlemlerden oluşturulan Word2Vec modeli, işaretli verilere ait modelin eğitimi için ise işaretlenmiş verilerden oluşan Word2Vec modeli kullanılmıştır. Kelime temsillerinin çıkarılması adımı kullanılarak kullanılan örnek sayıları Tablo 1’de verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi SARD-Juliet ve Draper VDISC veri kümelerinde yer alan tüm gözlemler kelime temsillerinin oluşturulması için Word2Vec modeline girdi verilmiştir. Bunun yanı sıra Github repolarından toplanan 72,784 farklı C kaynak koduna ait veri kümesinin içinden 58,283 tanesi başarılı olarak etiketlenip işaretli verilere ait modelin eğitimi için kullanılmıştır.

Tablo 1. Kelime temsillerinin çıkarılmasında kullanılan örnek sayıları
(Number of samples used in extracting word embeddings)

| Word2Vec VERİ KAYNAĞI | İŞARETSİZ VERİ ÖRNEK SAYISI | İŞARETLİ VERİ ÖRNEK SAYISI |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| SARD-Juliet Veri Kümesi | 46,827 | 46,827 |
| Draper VDISC Veri Kümesi | 1,015,681 | 1,015,681 |
| Github | 72,784 | 58,283 |
| Toplam | 1,135,292 | 1,120,791 |

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışma kapsamında veri kümesinin oluşturulması ve veri ön işleme adımlarından sonra önerilen yöntem ikili sınıflandırma ve çoklu sınıflandırma için ayrı olarak ele alınmıştır. İkili sınıflandırma için SARD-Juliet ve Draper VDISC veri kümeleri birleştirilmiştir. Draper VDISC üzerinde zararsız ve zararlı C kaynak kodları bulunmaktadır. SARD-Juliet üzerinde ise sadece zararlı C kaynak kodları bulunmaktadır. Bahsedilen iki veri kümesi birleştirilerek daha özgün bir veriyle çalışılması amaçlanmış ve ikili sınıflandırma yöntemlerine geçilmiştir. Çoklu sınıflandırma için sadece SARD-Juliet içerisinde bulunan kaynak kodlar kullanılmıştır. Sınıflandırma başarımlarının karşılaştırılması amaçlı F1-skor, F2-skor, kesinlik, duyarlılık, doğruluk değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır.

4.1. SARD-Juliet ve Draper VDISC Veri Kümeleri Üzerinde İkili Sınıflandırma (Binary Classification on SARD-Juliet Dataset and Draper VDISC Dataset)

Çalışma kapsamında zararlı/zararsız C kaynak kodu analizi için geliştirilen SecureC aracında, ikili sınıflandırma için LSTM modeli kullanılmıştır. SARD-Juliet veri kümesinde sadece zararlı kaynak kodlarına ait etiketlenmiş

veriler yer alırken, Draper VDISC veri kümesi üzerinde ise zararlı ve zararsız iki sınıf yer almaktadır. Bu nedenle ikili sınıflandırma için, bu iki veri kümesi birleştirilerek veri kümesinin boyutu arttırılmıştır. Bu iki veri kümesi birleştirildiğinde toplamda 1,231,256 farklı gözlem içerir. SecureC modelinde bu gözlemlerin yaklaşık %20'si (212,500 farklı gözlem eğitim veri kümesi için, 26,769 farklı gözlem validasyon veri kümesi için) modelin geliştirilmesi aşamasında kullanılmıştır.

Güvenlik zafiyeti bulunan zararlı kaynak kodları "1", güvenlik zafiyeti bulunmayan zararsız kaynak kodları ise "0" olarak etiketlenmiştir. Tablo 2'de ikili sınıflandırma için kullanılan eğitim ve validasyon kümesinde yer alan gözlem sayıları ayrıntılı olarak verilmiştir. İşaretli ve işaretsiz veri kümelerindeki gözlem sayıları aynı tutulmuştur.

Tablo 2. İkili sınıflandırma için eğitim ve validasyon kümesindeki gözlem sayıları
(Number of observations in the training set and validation set for binary classification)

| TÜR | | EĞİTİM VERİ KÜMESİ GÖZLEM SAYISI | VALİDASYON KÜMESİ GÖZLEM SAYISI |
|----------|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Zararlı | CWE-119 | 3,814 | 481 |
| | CWE-120 | 7,556 | 951 |
| | CWE-469 | 386 | 1,608 |
| | CWE-476 | 2,012 | 239 |
| | CWE-OTHERS | 14,815 | 2,055 |
| Zararsız | | 190,041 | 23,773 |
| Toplam | | 212,500 | 26,769 |

Kaynak kod parçasında bulunan güvenlik zafiyetlerinin ikili sınıflandırılabilmesi için işaretli ve işaretsiz veri kümesi ayrı ayrı denenmiştir. İşaretli veri kümesinde alınan sonuçlar ile, işaretsiz veri kümesinde alınan sonuçlar aşağıdaki alt başlıklarda karşılaştırılmıştır.

4.1.1. İşaretsiz Veri Kümesi ile İkili Sınıflandırma (Binary Classification with Unmarked Dataset)

İşaretsiz veri kümesi üzerinde ikili sınıflandırma amaçlı, SecureC'de kullanılan LSTM modelinde hiper parametreler "hidden_size = 32, 64, 128, 192, num_layers = 1, 2, 3, dropout_p = 0.3, 0.5, 0.8" olarak belirlenmiştir. Test edilen hiper parametreler içerisinde hidden_size için "128", num_layers için "2" ve drop_out için "0.3" değerleri 5 epoch için en iyi sonuçlar elde edildiği için seçilmiştir. Seçilen hiper parametrelere göre modelin başarımlar değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İşaretsiz veri kümesi ile ikili sınıflandırma sonuçları (Binary classification results with unmarked dataset)

| DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTÜ | SKOR BİLGİSİ |
|-------------------------|--------------|
| F1-skor | 0.8345 |
| F2-skor | 0.8169 |
| Kesinlik | 0.8761 |
| Duyarlılık | 0.8033 |
| Doğruluk | 0.9404 |

4.1.2. İşaretli Veri Kümesi ile İkili Sınıflandırma (Binary Classification with Marked Dataset)

İşaretli veri kümesi üzerinde ikili sınıflandırma amaçlı, SecureC'de kullanılan LSTM modelinde hiper parametreler "hidden_size = 32, 64, 128, 192, num_layers = 1, 2, 3, dropout_p = 0.3, 0.5, 0.8" olarak belirlenmiştir. Test edilen hiper parametreler içerisinde hidden_size için "64", num_layers için "1" ve drop_out için "0.3" değerleri 5 epoch için en iyi sonuçlar elde edildiği için seçilmiştir. Seçilen hiper parametrelere göre modelin başarımlar değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. İşaretli veri kümesi ile ikili sınıflandırma sonuçları (Binary classification results with marked dataset)

| DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTÜ | SKOR BİLGİSİ |
|----------------------|--------------|
| F1-skor | 0.8161 |
| F2-skor | 0.7894 |
| Kesinlik | 0.9057 |
| Duyarlılık | 0.7648 |
| Doğruluk | 0.9392 |

İşaretli ve işaretli veri kümeleri üzerinde yapılan ikili sınıflandırmalar ele alındığında, düzenli ifadeler ile işaretlenmiş işaretli veri kümesi üzerinde kesinlik değerinin 0.9057 olduğu görülürken, işaretli veri kümesi üzerinde elde edilen kesinlik değeri 0.8761'dir. Kesinlik değeri, modelin pozitif olarak tahmin ettiği değerlerin gerçekten kaç tanesinin pozitif olduğunu veren bir ölçüttür. Çalışma kapsamında pozitif olarak işaretlenen değerler zararlı kaynak kodlarını temsil etmektedir, bu noktada zararlı kaynak kodu olarak etiketlenen değerlerin gerçekte de zararlı olması bu problem için önemlidir. Bu da veri kümesinin işaretlenmesinin ikili sınıflandırmada önemli bir yarar sağladığını gösterir.

4.2. SARD-Juliet ve Draper VDISC Veri Kümeleri Üzerinde Çoklu Sınıflandırma (Multi Classification on SARD-Juliet Dataset and Draper VDISC Dataset)

Çalışma kapsamında zararlı/zararsız C kaynak kodu analizi için geliştirilen SecureC aracında, çoklu sınıflandırma için de LSTM modeli kullanılmıştır. Draper VDISC veri kümesi üzerinde bulunan kaynak kod parçaları sadece dört adet CWE türü içerdiği için çalışmaya katılmamıştır. Çoklu sınıflandırma için, SARD-Juliet veri kümesi içerisinde yer alan 40 CWE türü kullanılmıştır. Diğer CWE türlerine ait gözlem sayıları az olduğundan bu sınıflar dahil edilmemiştir. Kod parçasındaki güvenlik zafiyetlerinin çoklu sınıflandırılabilmesi için işaretli ve işaretli veri kümesi ayrı ayrı denlenmiştir. Tablo 5'te CWE türlerine göre eğitim ve validasyon kümelerinde yer alan gözlem sayıları verilmiştir.

Tablo 5. CWE türlerine göre eğitim ve validasyon kümesi gözlem sayıları (Number of observations in the training set and validation set for each CWE)

| CWE TÜRÜ | EĞİTİM KÜMESİ GÖZLEM SAYISI | VALIDASYON KÜMESİ GÖZLEM SAYISI |
|----------|-----------------------------|---------------------------------|
| CWE-114 | 522 | 126 |
| CWE-121 | 4,531 | 1,172 |
| CWE-122 | 2,816 | 715 |
| CWE-124 | 1,497 | 327 |
| CWE-126 | 1,066 | 266 |
| CWE-127 | 1,461 | 363 |
| CWE-134 | 2,599 | 641 |
| CWE-190 | 3,872 | 988 |
| CWE-191 | 2,995 | 731 |
| CWE-194 | 1,035 | 272 |
| CWE-195 | 1,034 | 274 |
| CWE-197 | 787 | 192 |
| CWE-252 | 494 | 136 |
| CWE-253 | 546 | 138 |
| CWE-272 | 200 | 52 |
| CWE-284 | 175 | 41 |
| CWE-319 | 166 | 50 |
| CWE-369 | 762 | 210 |
| CWE-398 | 151 | 30 |

Tablo 5. Devam (Continued)

| | | |
|---------------|---------------|--------------|
| CWE-400 | 661 | 149 |
| CWE-401 | 953 | 235 |
| CWE-404 | 352 | 84 |
| CWE-415 | 268 | 56 |
| CWE-426 | 181 | 35 |
| CWE-427 | 420 | 120 |
| CWE-457 | 514 | 102 |
| CWE-476 | 288 | 72 |
| CWE-563 | 297 | 96 |
| CWE-590 | 695 | 169 |
| CWE-606 | 438 | 102 |
| CWE-617 | 282 | 60 |
| CWE-665 | 171 | 49 |
| CWE-675 | 174 | 42 |
| CWE-680 | 267 | 60 |
| CWE-690 | 869 | 222 |
| CWE-758 | 296 | 69 |
| CWE-761 | 509 | 139 |
| CWE-78 | 4,285 | 1,115 |
| CWE-789 | 454 | 86 |
| CWE-90 | 422 | 118 |
| Toplam | 39,505 | 9,877 |

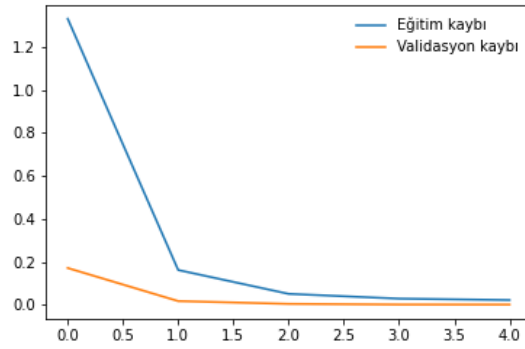
4.2.1. İşaretsiz Veri Kümesi ile Çoklu Sınıflandırma (Multi Classification with Unmarked Dataset)

İşaretsiz veri kümesi üzerinde çoklu sınıflandırma amaçlı, SecureC’de kullanılan LSTM modelinde hiper parametreler “hidden_size = 32, 64, 128, 192, num_layers = 1, 2, 3, dropout_p = 0.3, 0.5, 0.8” olarak belirlenmiştir. Test edilen hiper parametreler içerisinde hidden_size için “128”, num_layers için “1” ve drop_out için “0.3” değerleri 5 epoch için en iyi sonuçlar elde edildiği için seçilmiştir. Seçilen hiper parametrelere göre modelin başarımları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. İşaretsiz veri kümesi ile çoklu sınıflandırma sonuçları (Multi classification results with unmarked dataset)

| DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTÜ | SKOR BİLGİSİ |
|----------------------|--------------|
| F1-skor | 0.9983 |
| F2-skor | 0.9984 |
| Kesinlik | 0.9982 |
| Duyarlılık | 0.9985 |
| Doğruluk | 0.9994 |

İşaretsiz veri kümesinde çoklu sınıflandırmaya ait eğitim ve validasyon kaybına ait grafik Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. İşaretsiz veri kümesinde çoklu sınıflandırma için eğitim-validasyon kaybı grafiği
(Training loss and validation loss graph for multi classification with unmarked dataset)

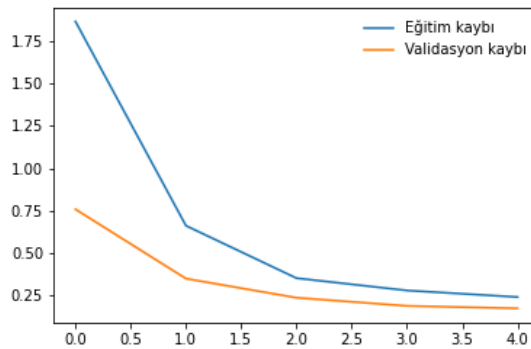
4.2.2. İşaretili Veri Kümesi ile Çoklu Sınıflandırma (Multi Classification with Marked Dataset)

İşaretili veri kümesi üzerinde çoklu sınıflandırma amaçlı, SecureC’de kullanılan LSTM modelinde hiper parametreler “hidden_size = 32, 64, 128, 192, num_layers = 1, 2, 3, dropout_p = 0.3, 0.5, 0.8” olarak belirlenmiştir. Test edilen hiper parametreler içerisinde hidden_size için “128”, num_layers için “3” ve drop_out için “0.3” değerleri 5 epoch için en iyi sonuçlar elde edildiği için seçilmiştir. Seçilen hiper parametrelere göre modelin başarımlar değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. İşaretili veri kümesi ile çoklu sınıflandırma sonuçları (Multi classification results with marked dataset)

| DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTÜ | SKOR BİLGİSİ |
|----------------------|--------------|
| F1-skor | 0.9610 |
| F2-skor | 0.9570 |
| Kesinlik | 0.9736 |
| Duyarlılık | 0.9529 |
| Doğruluk | 0.9437 |

İşaretili veri kümesinde çoklu sınıflandırmaya ait eğitim ve validasyon kaybı değerleri Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. İşaretili veri kümesinde çoklu sınıflandırma için eğitim-validasyon kaybı grafiği
(Training loss and validation loss graph for multi classification with marked dataset)

İşaretili ve işaretsiz veri kümeleri üzerinde yapılan çoklu sınıflandırmalar ele alındığında, işaretsiz veri kümesi üzerinde geliştirilen modelin tüm değerlendirme metrikleri için daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür.

SecureC ile işaretili ve işaretsiz veri kümeleri üzerinde ikili ve çoklu sınıflandırma için elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında SecureC modelinin başarısı açıktır. Tablo 8’de literatürde yer alan çalışmalar ile SecureC modeli F1 skor metriği açısından karşılaştırılmıştır. Tablodan da görüleceği gibi özellikle işaretsiz veriler üzerinde eğitilen SecureC modelinde (çoklu sınıflandırma) elde edilen 0.9983 F1 skor değeri literatürdeki en iyi sonuçtur.

Tablo 8. Deneysel sonuçların mevcut literatür ile karşılaştırılması
(Comparison of the experimental results with existing literature)

| ÇALIŞMA | YÖNTEM | F1 SKORU |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| (Li vd. 2020) | Rastgele Orman | 0.93 |
| (Suneja vd. 2019) | CNN | 0.53 |
| (Xu vd. 2018) | CLSTM | 0.96711 |
| Vudeepeer Modeli (Xiaomeng vd. 2018) | CNN | 0.91 |
| BV-Detector ((Tian vd. 2020) | BGRU (İkili-Sınıflandırma) | 0.899 |
| BGNN4VD (Cao vd. 2021) | BGNN (İkili-Sınıflandırma) | 0.768 |
| SecureC | LSTM (İşaretsiz-Çoklu Sınıflandırma) | 0.9983 |
| SecureC | LSTM (İşaretsiz-İkili Sınıflandırma) | 0.8345 |

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada C programlama dili özelinde güvensiz kaynak kodlarını tespit edebilen SecureC olarak adlandırılan bir yazılım aracı geliştirilmiştir. Çalışmada, düzenli ifadeler kullanılarak yeni kod şablonları çıkarılmış, ardından bu yeni şablonlar kullanılarak veri setindeki kaynak kodlar işaretlenmiştir. Bunun yanı sıra kelime temsillerinin çıkarılmasını sağlayan, işaretli ve işaretsiz veriler kullanılarak iki farklı Word2Vec modeli geliştirilmiştir. Daha sonra yüzbinlerce satıra sahip kaynak koddan güvensiz kısımları tespit ederken, önerilen modelin işaretli veri kümesi ile işaretsiz veri kümesi üzerindeki başarımları araştırılmıştır.

SecureC, LSTM modeli kullanılarak geliştirilmiştir, bu model C programlama dilindeki kaynak kodları içeren SARD-Juliet veri kümesi, Draper VDISC veri kümesi birleştirilerek oluşturulan veri kümesini girdi olarak alır. Veri kümesinde yer alan kod parçacıkları C programlama dilinin yapısı dikkate alınarak düzenli ifadelerle ortak şablonlara oturturulmuştur. Daha sonra kullanılan hibrit veri kümesi üzerindeki her bir kaynak kodu hem işaretli hem işaretsiz gözlemler için Word2Vec modeliyle kelime vektörlerine dönüştürülmüştür. Sonrasında bu vektörler model için özellikleri temsil eden girdiler olarak LSTM modeliyle işlenmiştir.

Çalışmada modelin hem işaretli hem de işaretsiz veri kümeleri üzerindeki başarımları değerlendirildiğinde, düzenli ifadeler ile işaretlenmiş veri kümesi üzerinde kesinlik değerinin 0.9057 olduğu görülürken, işaretsiz veri kümesi üzerinde elde edilen kesinlik değeri 0.8761 olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında pozitif olarak işaretlenen değerler zararlı kaynak kodlarını temsil eder, bu noktada zararlı kaynak kodu olarak etiketlenen değerlerin gerçekte de zararlı olması, diğer bir ifadeyle kesinlik değerinin yüksek olması bu çalışmadaki araştırma problemi için oldukça önemlidir. Bu da özellikle ikili sınıflandırma için işaretleme işleminin önemini vurgular.

İkili sınıflandırmalar için yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, BGNN4VD modeline göre LSTM tabanlı SecureC modelinin daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. BV-Detector modelinin geliştirmesi aşamasında denenen LSTM modeli ile elde edilen %85,9 F1 skor değeri geçilememiştir.

SecureC'de çoklu sınıflandırma ele alındığında, işaretsiz veri kümesi üzerinde modelin daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. SecureC ile işaretli ve işaretsiz veri kümeleri üzerinde ikili ve çoklu sınıflandırma için elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında SecureC'nin başarısı açıktır.

İleriki çalışmalarda, LSTM modelinin yanı sıra farklı derin öğrenme modelleri kullanılarak önerilen yöntemin başarısı artırılabilir. Bunun yanı sıra özellikle çoklu sınıflandırma için kullanılan veri kümesinde yer alan gözlem sayılarının ve sınıf sayısının artırılmasının modelin başarımında katkısı olacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 1919B012004582 Başvuru Numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Cao, S., Sun, X., Bo, L., Wei, Y., Li, B. 2021. BGNN4VD: Constructing Bidirectional Graph Neural-Network for Vulnerability Detection, *Information and Software Technology*, 136, Doi: 10.1016/j.infsof.2021.106576.
- Draper VDISC Dataset, <https://osf.io/d45bw/>, 2021.
- Edgescan, 2020. Vulnerability Statistics Report. [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4118561/BCC030%20Vulnerability%20Stats%20Report%20\(2020\)_WEB.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4118561/BCC030%20Vulnerability%20Stats%20Report%20(2020)_WEB.pdf) (Erişim tarihi: Kasım 2021).
- Juliet Test Suite for C/C++ , https://samate.nist.gov/SARD/around.php#juliet_documents, 2021.
- Kaur, A. Nayyar, R. 2020. A Comparative Study of Static Code Analysis tools for Vulnerability Detection in C/C++ and JAVA Source Code, *Procedia*, 171, 2023-2029.
- Kim, J. Hubczenko, D., Montague, P. 2019. Towards Attention Based Vulnerability Discovery Using Source Code Representation, *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2019: Text and Time Series*, 731-746.
- Larrucea, X., Santamaria, I., Colomo-Palacios, R. 2019. Assessing source code vulnerabilities in a cloud-based system for health systems: OpenNCP, *IET Journals*, 13, 195-202.
- Li, X., Wang, Lu., Xin, Y., Yang, Y., Chen, Y. 2020. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Minimum Intermediate Representation Learning, 10, Doi: 10.3390/app10051692.
- Li, R., Feng, C., Zhang, X., Tang, C. 2019. A Lightweight Assisted Vulnerability Discovery Method Using Deep Neural Networks, *IEEE*, 7, 80079 – 80092.
- Samate NIST, Juliet Documents NIST, 2006. Resources from the Software Assurance Reference Dataset, Kasım 2017-2021. https://samate.nist.gov/SRD/around.php#juliet_documents (erişim tarihi: Kasım 2021).
- SARD, <https://samate.nist.gov/SARD/>, 2021.
- Suneja, S., Zheng, Y., Zhuang, Y., Laredo, J., Morari A. 2019. Learning to map source code to software vulnerability using code-as-a-graph, *ArXiv abs/2006.08614*.
- Tian, J., Xing, W., Li, Z. 2020. BVDetector: A program slice-based binary code vulnerability intelligent detection system, *Information and Software Technology*, 123, Doi: 10.1016/j.infsof.2020.106289.
- Verma, P., Goyal, A., Gigras, Y. 2020. Email phishing: Text classification using natural language processing, *Computer Science and Information Technologies*, 1, 1-12.
- Xiaomeng, W., Tao, Z., Runpu, W., Wei, X., Changyu, H. 2018. 10th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), *IEEE*, Doi: 10.1109/ICAIT.2018.8686548.
- Xu, A., Dai, T., Chen, H., Ming, Z., Li, W. 2018. Vulnerability Detection for Source Code Using Contextual LSTM, *ICSAI*, Doi: 10.1109/ICSAI.2018.8599360.



HİBRİT GÜÇ SİSTEMİ İLE İKLİMLENDİRME YÜKLERİNİN OPTİMAL İŞLETİM MODELİ VE HASTANE İKLİMLENDİRME YÜKLERİ İÇİN TALEP CEVABI UYGULAMASI

Gürcan Şahin AKINCI¹, Yavuz EREN^{1*}

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

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|--|--|
| <i>Hibrit Güç Sistemi, Talep Cevabı, Optimizasyon, RT/GP, İklimlendirme Yükleri.</i> | Bu çalışmada, kamu kuruluşları, hastane, okul vb. gibi kurumların iklimlendirme cihazlarının yük talebinin karşılanmasında alternatif enerji kaynaklarından optimal olarak yararlanma stratejisi ele alınmıştır. İklimlendirme yüklerinin karşılanmasında rüzgar türbini (RT), güneş pili (GP) ve batarya (Bat) ile teşkil edilen hibrit güç sistemi önerilmiştir. Hibrit güç sistemi optimal talep cevabı uygulamasında kullanılmasına imkan verecek şekilde modellenmiştir. Ayrıca, hibrit kaynakların kesintili üretim karakteristikleri gereği hibrit güç sistemine şebeke gücü de ilave edilmiştir. Optimizasyon probleminde alternatif enerji kaynaklarının maksimum kapasitede kullanımı ve ilgili kaynakların öncelikli olarak iklimlendirme yüklerinin talebine cevap verecek şekilde kullanımı amaç olarak belirlenmiştir. Elde edilen karışık tamsayı lineer programlama modeli GAMS v.24.1.3 ortamında CPLEX v.12 çözücüsü ile test edilmiştir. Kış ve yaz koşulları dikkate alınarak optimal işletim modelinin benzetim çalışmaları yapılmıştır ve ilgili sonuçlar sunulmuştur. |

OPTIMAL OPERATION MODEL OF HYBRID POWER SYSTEMS FOR HVAC LOADS AND DEMAND RESPONSE APPLICATIONS FOR HVAC LOADS OF AN HOSPITAL

| Keywords | Abstract |
|---|--|
| <i>Hybrid Power System, Demand Response, Optimization, WT/PV, HVAC Loads.</i> | In this study, optimal power management strategy to make optimal operation of the alternative sources has been considered to meet the load demand of heating, ventilations and air conditioning (HVAC) units for public institutions, hospitals, schools, etc. A hybrid power system consisting of wind turbine (WT), photovoltaics (PV) and battery has been proposed. The system is modelled to be used in an optimal demand response application. Moreover, the grid has been added to the hybrid power system due to the intermittent generation characteristics of alternative power sources. The objectives defined by the optimization problem are the operation of the alternative power sources at maximum rate and primarily meeting the HVAC load demand by the relevant sources. The resulting mixed-integer linear programming model is tested in GAMS v.24.1.3 platform using the solver CPLEX v.12. |

Alıntı / Cite

Akinci, G.Ş., Eren, Y., (2022). Hibrit Güç Sistemi ile İklimlendirme Yüklerinin Optimal İşletim Modeli ve Hastane İklimlendirme Yükleri için Talep Cevabı Uygulaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 574-586.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Ş. Akinci, 0000-0002-9505-2190
Y. Eren, 0000-0001-9128-2856

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 19.01.2022 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 25.02.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 06.03.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Akıllı şebeke kavramı enerji güç sistemlerinin modellenmesi ve işletilmesi sürecinde köklü değişimlere sebep olmuştur. Bu değişim sürecinde alternatif enerji kaynaklarının da enerji arzında paylarının giderek artması bu

* İlgili yazar / Corresponding author: yeren@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5969

değişimi ivmelendirmiştir. Çevre dostu ve verimli enerji kaynaklarının temini ve işleme alınması yanında enerji kullanımı da bir o kadar önemli bir hal almıştır. Genel olarak enerji tüketimini azaltıcı yönde geliştirilen yöntemler talep cevabı uygulamaları olarak bilinmektedir. Bu tip uygulamalar, alternatif enerji kaynaklarının optimal işletilmesi ile daha verimli sonuçlar üretebilmektedir. Talep cevabı uygulamalarının hem kullanıcı tipleri hem de elektriksel yük değerleri bakımından sınıflandırılabilen cihazlar için geliştirilmiş türleri bulunmaktadır. Bu bakımdan bakıldığında, iklimlendirme yüklerinin karşılanması da bir talep cevabı tipidir. İklimlendirme (Heating, ventilation and air conditioning-HVAC) yükleri ısıtma, soğutma ve havalandırma ekipmanlarının tamamının ihtiyaç duyduğu güç talebini temsil etmektedir. İklimlendirme yüklerinin, özellikle kamu kuruluşları veya sosyal amaçlı olarak çok sayıda insana hizmet sağlayan hastane gibi birimlerde önemli değerlere ulaştığı bilinmektedir. Bu bakımdan, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEPY) çalışmasında ortaya çıkan sonuçlara göre sağlık kuruluşları 600 kWh/m² enerji ile 750 kWh/m² enerji tüketim değerine sahip alışveriş merkezlerinden sonra en çok enerji tüketen bina tipidir (BEPY, 2008). Sağlık tesislerinin enerji tüketim değerinin dağılımı hakkında ise Shen vd. (2019) tarafından hastanelerin güç tüketim verileri ve de tüketim verilerinin sınıflandırılması konusunda detaylı bir çalışma sunulmuştur. İlgili çalışmada, sağlık kuruluşlarında iklimlendirme yüklerinin genel yük dağılımının %31'ine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, iklimlendirme yükleri için geliştirilecek optimal talep cevabı uygulamaları araştırmacılar için önemli bir motivasyon kaynağıdır.

Bu çalışmada, kamu, hastane, okul vb. kurumların iklimlendirme yüklerinin karşılanmasında talep cevabı uygulaması ele alınmıştır. İlgili kurumların iklimlendirme yükleri yüksek güç talep ettiklerinden alternatif güç sistemlerinin kullanımı ile şebeke üzerindeki güç talebi artışının azaltılması amaçlanmıştır. Bu tür alternatif güç sistemlerinin yaygınlaşması bölgesel güç talebinin dengelenmesi ve yeni yatırım maliyetlerinin azaltılmasına doğrudan katkı sağlayacaktır. Bu amaç doğrultusunda rüzgar türbini (RT)/ güneş pili (photovoltaic) (GP) / batarya (Bat) ile teşkil edilen hibrit güç sistemi, iklimlendirme yüklerinin beslenmesi için önerilmiştir. Ayrıca, alternatif enerji kaynaklarının kesintili karakteristiklerini de dikkate alarak talep cevabının tam olarak karşılanması için elektrik şebekesi de güç sistemine dahil edilmiştir. Alternatif enerji kaynaklarının tam kapasite kullanımı ve iklimlendirme yüklerinin öncelikle alternatif enerji kaynaklarından sağlanmasını amaçlayan optimizasyon modeli sunulmuştur. Modelin testi için, hastane iklimlendirme yükleri ve yine hastaneler için önerilen alternatif enerji kaynak tipleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmada sunulan optimizasyon eğilimli hibrit güç sistemi modeli, benzer yükleri kapsayan kurumlar için kolayca uyarlanabilir şekilde verilmiştir. Ayrıca, başka alternatif güç sistemleri de genel modele kolayca eklenebilir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde, binalardaki genel ve iklimlendirme cihazları gibi sınıflandırılmış enerji tüketimlerini optimal seviyede tutmayı amaçlayan bir çok çalışma bulunmaktadır. Sun vd. (2013) tarafından yapılmış olan çalışmada, dünyadaki enerji tüketiminin yüzde kırkına binaların sebep olduğu vurgulanarak, binaların günlük harcadığı enerji bedelini en aza indirmek için ihtiyaçlara göre değişim gösteren bir programlama tekniği önerilmiştir. Evsel enerji taleplerinin akıllı evler ile denetlenip şebeke bağlantısında uzak durumlar için bulanık mantık temelli karar verme süreci geliştirilmiştir (Arabul vd., 2017). Xu vd. (2015)'nin sunduğu çalışmada, talep edilen enerji miktarı ve üretilen enerji miktarı binada yaşayan insanların konfor seviyeleri dengede tutularak, enerji tüketimini azaltmak hedeflenmiştir. İklimlendirme yüklerinin doğrudan talep cevabı uygulamaları incelendiğinde, Erdinc vd. (2017) tarafından, kullanıcı konforunu en az etkileyerek, iklimlendirme yüklerinin talep cevabının zaman içerisinde dinamik olarak kaydırılmasını dikkate alan bir strateji sunulmuştur. Bina otomasyonu kapsamında talep cevabı uygulaması geliştirilmesi fikrini öne çıkaran bir başka çalışmada, farklı noktadaki iklimlendirme yüklerinin basit iletişim hatları ile talep cevabı uygulaması içerisinde etkin şekilde çalıştırılabileceği vurgulanmıştır (Goddard vd., 2014). Yine benzer amaç doğrultusunda, iklimlendirme sistemlerinin gerçek zamanlı çalışma koşullarında en uygun çalışma seviyelerini belirleyip iklimlendirme cihazlarının yük durumuna göre dengeli çalıştırılması konusunda strateji geliştirilmiştir (Hao vd., 2014). İklimlendirme cihazlarının talep cevabı uygulamalarında bir başka yaklaşım da yük atımı ile enerji talebini dengelemektir. Bu bağlamda, sıcaklık ve nem değerleri üzerindeki ayarlamalar ile enerji tasarrufu sağlayan bir stratejinin işe yaradığı, sistem üzerinde gerçekleşen yük atım performansı ile gösterilmiştir (Yuan vd., 2021). İklimlendirme yükleri için talep cevabı stratejilerinin geliştirilmesinde fiyatlandırma etkisi de dikkate alınmaktadır. Fiyatlandırma etkisinin göz önüne alındığı bir çalışmada, sabit fiyat, zamana göre fiyatlandırma, gerçek zamanlı fiyatlandırma durumlarına göre bulanık mantık kontrolcü ile iklimlendirme cihazlarının talep cevabı uygulaması içinde kullanımı ele alınmıştır (Talebi vd., 2020). Alternatif enerji kaynaklarının iklimlendirme yükleri talep cevabı uygulamalarında kullanımı üzerine de birçok çalışma literatürde mevcuttur. GP kullanımı ile hastane enerji talebine cevap vermeyi amaçlayan bir çalışma Mizuno vd. (2018) tarafından literatüre sunulmuştur. Doğal afetlere karşı, adalarda bulunan hastanelerin enerji devamlılığı için örnek bir strateji sunulmuştur. Bunun yanında, RT kurulumu ile bir hastanenin güç talebi üzerinde nasıl iyileştirmeler yapılabileceğini ortaya koyan bir başka çalışmada çeşitli RT tipleri üzerinden analizler yapılmıştır (Tahboub vd., 2011). Hastanede kullanılan iklimlendirme cihazlarının yük verilerine ait detaylı

analizlere literatürde sık rastlanmayan çalışmalardır. Bu bakımdan, Prudenzi ve arkadaşları tarafından hastaneye ait elektriksel yük verilerini kaydedilip analizin yapıldığı çalışmalar önemlidir (Prudenzi vd., 2008; Prudenzi vd., 2009). Bu çalışmalarda, İtalya'nın Roma şehrindeki S. Giovanni Hastanesini uygulamalı olarak gözlem altına alınmış, hastane toplam enerji tüketimi ve iklimlendirme cihazları enerji talepleri paylaşılmıştır.

3. Sistem Tanımı ve Yöntem (System Description and Methodology)

İklimlendirme cihazlarının yük talebini karşılamak için RT/GP/Bat hibrit güç sistemi önerilmiştir. Hibrit güç sistemine ait her bir birim için optimizasyon eğilimli modeller detaylı şekilde açıklanmıştır. Modellerde her bir alt sisteme ait dönüşüm denklemleri, kapasite kısıtları, performans kısıtları vb. yapısal durum ve çalışma şartları tanımlanmıştır. Güç sistemi içine şebekeden çekilen güç de ilave edilmiştir. Böylece, alternatif enerji kaynaklarının hava şartlarına bağlı yapıları nedeniyle kesintili çalışmaları durumunda güç taleplerinin karşılanması garanti edilmiştir. Bunun yanında batarya kullanımı ile alternatif enerji kaynaklarının göreceli olarak yüksek güç üretmeleri halinde enerjilerinin kesintiye uğradıkları zamanda kullanımına da imkan sağlanmıştır. Tüm model önerilen optimal çalışma stratejisi ile bütünlük olarak iklimlendirme yükleri talep cevabı uygulaması olarak sunulmuştur.

3.1. Hibrit Güç Sisteminin Optimizasyon Eğilimli Modellenmesi (Modelling of Hybrid Power System for Optimization Purpose)

Bu çalışmada, iklimlendirme cihazlarının güç taleplerinin karşılanmasında rüzgar ve güneş enerjisinin en yüksek seviyede kullanımı hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, RT ve GP birimlerinin optimizasyon eğilimli modelleri sunulmuştur. Ayrıca, alternatif enerji fazlalığı olması durumunda enerjinin depolanması ve de enerji yetersizliği olması durumunda enerji sağlayıcı olarak kullanmak üzere Bat birimi hibrit güç sistemine dahil edilmiş ve optimizasyon eğilimli Bat modeli de verilmiştir. Bunun yanında, bu çalışmada, özel olarak iklimlendirme cihazlarının hastane, okul gibi kamu kuruluşlarında kullanılması uygulama olarak sunulmuştur. Bu durumda iklimlendirme cihazları oldukça yüksek güç taleplerine neden olmaktadır. Dolayısıyla güç talebinin kesintiye uğramadan karşılanması ve daha güvenilir bir güç sistemi tesisi için şebeke gücü de model içine dahil edilmiştir. Ancak, şebeke gücünün sadece yetersiz alternatif enerji arzı olduğu durumda kullanılması optimizasyon problemine amaç olarak eklenmiştir. Ayrıca, iklimlendirme cihazlarının talep cevapları için daha düşük güç talep profiline sahip son kullanıcı gibi uygulamaları göz önüne alındığında, sunulan model, hibrit güç sistemi bileşenlerinin anma değerlerinin uygun seçimi ile kullanılabilir.

Rüzgar Türbini Modeli: Rüzgar hızı ile RT'nin elektrik üretimi (1) denklemi ile ifade edilmektedir (Ioan vd., 2015). Burada, $P_R(t)$ anlık RT güç üretimini, R_{tr} rotor yarıçapını, $H_r(t)$ anlık rüzgar hızını, ρ hava yoğunluğunu ve τ_R türbinin verimini temsil etmektedir. Ayrıca, ölçüm yapılan yükseklik ile rüzgar türbininin çalışma yüksekliği arasında fark var ise, (2) denklemi ile ilgili çalışma yüksekliğindeki rüzgar hızı tahmin edilebilmektedir (Tizgui vd., 2017). (2) denkleminde, Y_1 ölçüm yapılan yüksekliği, $H_{r,1}$ ise ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızını temsil etmektedir. Buna karşın, Y_2 , RT çalışma yüksekliğini $H_{r,2}$ ise bu yükseklikteki tahmini rüzgar hızını göstermektedir. α ise güç üssü denilen değişkeni tanımlamaktadır. α , türbinin bulunduğu arazi şartları ve atmosferik istikrarı değerleyen bir değişken olup (3) ile hesaplanmaktadır (Tizgui vd., 2017).

RT'nin optimizasyon problemi çerçevesinde kullanımı bazı ek kısıtların tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu kısıtları (4-5) ile verilmiştir. (4) ile $P_R(t)$ 'nin üretilen RT gücü ($P_{R,Ur}(t)$) ve nominal RT gücünden (R_{nom}) daha küçük veya eşit olması gerektiği belirtilmiştir. $P_{R,Ur}(t)$ değeri anlık güç değerinden büyük veya eşit olabilir. Bu durum RT yararlanım durumunu ortaya koymaktadır. Böylelikle, üretilen güç miktarı optimizasyon problemine amaç olarak belirtilebilir. $P_R(t)$ anlık üretilen gücü temsil etse de, gerçekte üretilen güç hesabı (5) ile verilmektedir. (5) denkleminde, $P_{R,Gr}(t)$ gerçek RT elektriksel gücünü ve $\tau_{R,Kon}$ enerji dönüşümlerinin gerçekleştiği konverter birimlerinin ortalama verimini temsil etmektedir.

$$P_R(t) = \frac{\pi}{2} * R_{tr}^2 * H_r^3(t) * \rho * \tau_R \quad (1)$$

$$\frac{H_{r,2}}{H_{r,1}} = \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)^\alpha \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.0881 \ln(H_{r,1})}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{Y_1}{10}\right)} \quad (3)$$

$$P_R(t) \leq P_{R,Ur}(t) \leq R_{nom}, \forall t \geq 0 \quad (4)$$

$$P_{R,Gr}(t) \leq P_R(t) * \tau_{R,Kon}, \forall t \geq 0 \quad (5)$$

GP modeli: Işınım verisinden fotovoltaik paneller vasıtasıyla elektriksel güç elde edilmesi (6) denklemi aracılığı ile açıklanmaktadır (Tanwar vd., 2018; PVC, 2021). (6) denkleminde $P_{GP}(t)$ GP panel elektriksel gücünü, GP_A GP panel toplam alanını, $G_I(t)$ anlık ışınım değerini, V_{GP} ise GP panel verimini temsil etmektedir. GP biriminin optimizasyon probleminde kullanımı, (7) ile ifade edilen, GP panelinde üretilen gücün nominal GP gücünden (GP_{nom}) küçük veya eşit olması kısıtının eklenmesini gerektirmektedir. Ayrıca, bu kısıtta, güneş enerjisinden faydalanma durumunu belirtmek için, üretilen güç ($P_{GP,Ur}(t)$) nominal güç ve anlık güç arasında verilmiştir. Bunun yanında, GP güç ünitesinin bağlı olduğu güç dönüştürücü biriminin verimini de dikkate alırsak gerçek GP gücünü ($P_{GP,Gr}(t)$) (8) ile hesaplayabiliriz.

$$P_{GP}(t) = GP_A * G_I(t) * V_{GP} \quad (6)$$

$$P_{GP}(t) \leq P_{GP,Ur}(t) \leq GP_{nom}, \forall t \geq 0 \quad (7)$$

$$P_{GP,Gr}(t) \leq P_{GP}(t) * \tau_{GP,Kon}, \forall t \geq 0 \quad (8)$$

Batarya Modeli: Batarya, hibrit enerji sistemi içerisinde, iklimlendirme yüklerinin karşılanmasında kullanılan bir diğer unsurdur. Batarya elektriksel enerjiyi depolayıp, gerekli görüldüğü durumlarda sistem yüklerinin karşılanması için enerji sistemine katkı sağlamaktadır. Bu bakımdan dinamik olarak şarj ve deşarj süreçlerinin gerçekleştiği birimdir. Çalışma sürecinde hem enerji durumu eşitliği hem de şarj ve deşarj koşullarının belirlenmesi önemlidir. Bataryanın enerji durumunu modellemek için (9-12) ifadeleri tanımlanmıştır (Erdinc, 2014). Batarya birimi tarafından depolanan enerjinin anlık durumu (BED) $Bat_{BED}(t)$ ile temsil edilmektedir. Her bir zaman aralığında $E_{BED}(t)$ değerinin hesabı yinelemeli olarak (9) eşitliği ile yapılmaktadır. (9) eşitliğinde $E_{BED}(t-1)$ bir önceki zaman aralığındaki batarya enerji durumunu, $P_{Bat,S}(t)$ anlık batarya şarj gücünü, $P_{Bat,D}(t)$ anlık batarya deşarj gücünü temsil etmektedir. $V_{rS,Bat}$ ve $V_{rD,Bat}$ parametreleri sırasıyla batarya şarj ve deşarj verimleridir. Δ parametresi elektriksel güç ve elektriksel enerji arasındaki dönüşümü sağlamakta olup, ölçüm yapılan zaman aralığının bir saat ölçüsüne göre tekrar etme değerine eşittir. $E_{BED}(t)$ kullanıldığı sistemin tasarım amaçlarına göre tanımlanacak bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlar (10-12) eşitlik veya eşitsizlikleri ile tanımlanmıştır. (10) eşitliği bataryanın başlangıç durumundaki enerjisini, (11-12) ifadeleri ise sırasıyla batarya enerjisinin en küçük ve en büyük değerlerini belirlemektedir. Burada, $E_{BED,b}$, başlangıç anı batarya enerji durumunu, $E_{BED,mak}$ ve $E_{BED,min}$ ise sırasıyla bataryanın en yüksek ve en düşük enerji değerini temsil etmektedir. Dolayısıyla, (9) ile hesaplanan batarya enerji durumu hesabı (10-12) kısıtları dikkate alınarak yapılmaktadır.

$$E_{BED}(t) = E_{BED}(t-1) + \frac{P_{Bat,S}(t) * V_{rS,Bat}}{\Delta} - \frac{P_{Bat,D}(t) * V_{rD,Bat}}{\Delta} \quad (9)$$

$$E_{BED}(t) = E_{BED,b} \quad (10)$$

$$E_{BED}(t) \leq E_{BED,mak} \quad (11)$$

$$E_{BED}(t) \geq E_{BED,min} \quad (12)$$

$Bat_{BED}(t)$ hesabı, (9) denkleminde görüldüğü üzere $P_{Bat,S}(t)$ ve $P_{Bat,D}(t)$ ile dinamik olarak değişmektedir. $P_{Bat,S}(t)$ ve $P_{Bat,D}(t)$ değişimi üzerinde de kısıtlar tanımlanmalıdır. Bu kısıtlar (13-14) ile verilmiştir. Bu kısıtlar sırasıyla batarya şarj ve deşarj güçlerini, $K_{S,Bat}$ ve $K_{D,Bat}$ parametreleri ile sınırlamaktadır. $K_{S,Bat}$ ve $K_{D,Bat}$ parametreleri sistem gereksinimlerine bağlı olarak kullanılan batarya kapasitelerine göre belirlenmektedir. $P_{Bat,nom}$ ise seçilen bataryanın anma güç değeridir. (15-16) ile sırasıyla, deşarj ve şarj güçlerinin batarya anma değerinden küçük veya eşit olması sağlanmıştır.

$$P_{Bat,S}(t) \leq K_{S,Bat} * P_{Bat,nom} \quad (13)$$

$$P_{Bat,D}(t) \leq K_{D,Bat} * P_{Bat,nom} \quad (14)$$

$$P_{Bat,D}(t) \leq P_{Bat,nom} \quad (15)$$

$$P_{Bat,S}(t) \leq P_{Bat,nom} \quad (16)$$

Son olarak, batarya çalışma koşulları içinde şarj ve deşarj durumlarının zamansal olarak çakışmalarını sağlanmalıdır. Bir diğer deyişle, bataryanın aynı anda şarj ve deşarj olması önlenmelidir. Bu problemin çözümü için (17-18) kısıtları sunulmuştur. Burada, K çok büyük bir tam sayıyı, b_{Bat} ise ikili değişken tipini temsil etmektedir. b_{Bat} değişkeni 0 veya 1 değeri alabileceğinden her bir çalışma anında (17) veya (18) denklemlerinden sadece biri eşitlik veya eşitsizliğin sağ tarafında sıfırdan farklı bir değere sahip olacaktır. Böylece, şarj veya deşarj güçlerinden en az biri her zaman sıfır olacaktır.

$$P_{Bat,S}(t) \leq K * b_{Bat} \quad (17)$$

$$P_{Bat,D}(t) \leq K * (1 - b_{Bat}) \quad (18)$$

3.2 Güç Sistemi Yük Paylaşımları (Load Sharing of the Power System)

Önceki bölümde, iklimlendirme cihazlarının güç talebini karşılamada kullanılacak alternatif enerji kaynaklarının optimizasyon eğilimli modelleri verilmiştir. Bu bölümde ise bu kaynakların güç paylaşımında nasıl kullanılacağı ve optimizasyon probleminin eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarının hepsini hangi maliyete karşın çözümde kullanılacağı açıklanacaktır. Ele alınan problemin çözümünde RT gücünün tamamıyla iklimlendirme yüklerini karşılaması amaçlanmaktadır. Bunun yanında, eğer RT gücü iklimlendirme cihazlarının talep ettiği miktardan fazla ise diğer yükleri beslemek için kullanılması öngörülmektedir. Dolayısıyla RT gücü iki değişken ile, (19)'da verildiği şekilde optimizasyon probleminde dahil edilmiştir. Burada $P_{R,IY}(t)$, anlık iklimlendirme yüklerinin RT tarafından karşılanan kısmını, $P_{R,DY}(t)$ ise RT gücünün artan kısmını göstermektedir. Dolayısıyla, $P_{R,DY}(t)$ iklimlendirme dışındaki yükleri beslemede kullanılan RT gücünü temsil etmektedir.

$$P_{R,Gr}(t) = P_{R,IY}(t) + P_{R,DY}(t) \quad (19)$$

Çalışmada ana amaç iklimlendirme cihazlarının güç talebine cevap vermek olduğundan, kullanılan kaynakların güç üretim kapasiteleri de dikkate alınarak bazı ek kısıtlamalar da optimizasyon probleminde eklenmelidir. (20-22) bu kısıtları açıklamaktadır. (20) ile RT gücünün iklimlendirme yüklerini karşılayan kısmının toplam iklimlendirme talep gücünden ($P_{IY}(t)$) küçük veya eşit olması sağlanmaktadır. Böylece RT artan gücü diğer yükleri beslemede kullanılabilir. (21) ile anlık batarya deşarj gücü ($P_{Bat,D}(t)$) $P_{IY}(t)$ 'den küçük veya eşit olması kısıtı eklenmiştir. Bu kısıt ile batarya gücünün sadece iklimlendirme cihazlarının güç beslemesine destek olması, diğer güçlerin beslenmesi için kullanılmaması sağlanmıştır. Bunun yanında, batarya şarj gücünün ($P_{Bat,S}(t)$), sadece alternatif enerji kaynaklarından sağlanması da optimizasyon probleminde eklenebilir. Bu kısıt, hibrit güç sistemindeki en büyük anma değerine sahip kaynak ile karşılanabilir. (22) ile $P_{Bat,S}(t)$ gücünün $P_{RT,DY}(t)$ gücü ile kısıtlanması sağlanmıştır. Böylece, batarya şarj gücünün RT gücü ile karşılanabilmesi temin edilmiştir.

$$P_{R,IY}(t) \leq P_{IY}(t) \quad (20)$$

$$P_{Bat,D}(t) \leq P_{IY}(t) \quad (21)$$

$$P_{Bat,S}(t) \leq P_{R,DY}(t) \quad (22)$$

Bu aşamada optimizasyon problemini çözümümün her adımında eşit olması gereken, yük paylaşım denklemini tanımlayabiliriz. İklimlendirme cihazlarının ihtiyaç duyduğu güç talebine nasıl cevap verilebileceği (24) ile belirtilmektedir. (23) yük paylaşımı denkleminde görüleceği üzere, iklimlendirme güç talebi RT, GP, şebeke ve bataryadan karşılanmaktadır. Burada, $P_h(t)$, şebekeden çekilen gücü temsil etmekte olup, alternatif enerji kaynaklarının yetersiz kaldığı durumlarda (23) eşitliğini sağlamak için devreye girmesi istenmektedir.

$$P_{IY}(t) = P_{R,IY}(t) + P_{GP,Gr}(t) + P_h(t) + P_{Bat,D}(t) \quad (23)$$

3.3 Optimizasyon Probleminin Tanımlanması (Definition of the Optimization Problem)

Buraya kadar optimizasyon probleminiz için gerek güç sağlayıcı sistemlerin çalışmasını düzenleyen kısıtlar, gerekse problem amacına yönelik kısıtlar tanımlanmıştır. Son olarak, optimizasyon probleminin amacını tanımlamamıza yarayacak toplam maliyet (TM) fonksiyonu (24) ile verilmiştir. TM fonksiyonu birden fazla fayda unsurunu bir arada bulundurmaktadır. İlk iki toplam ifadesi ile, sırasıyla üretilen RT gücünün potansiyel güce en yakın olması ve iklimlendirme yüklerinin ana kaynak olan rüzgar gücünden karşılanması hedeflenmektedir. $P_{R,DY}(t)$ gücünün sıfırdan büyük olması durumunda da bu gücün batarya şarjına kullanılması amaçlanmıştır. (23) eşitliğinin sağlanması zorunluluğunu karşılamak için şebeke gücünün kullanılabilmesi de eşitliğe eklenmiştir. Burada K katsayısı çok büyük bir tamsayıyı temsil etmektedir. Dolayısıyla şebekenin kullanılması sınırlandırılmıştır.

Optimizasyon amacımızı TM fonksiyonunu minimize etmek olarak belirlersek, (24) ile verilen tüm alt toplamaların minimize edilmesi amacımızla aynı doğrultuda sonuç verecektir. Bu bakımdan $P_{IY}(t)$ yüklerinin, ana kaynağımız olan başta rüzgar enerjisi ile sağlanması gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca, TM fonksiyonunun değerini arttırmamak için şebeke gücü yerine $P_{GP,Gr}(t)$ 'yi kullanarak (23) eşitliğinin sağlanması da K katsayısı ile yerine getirilebilecektir.

$$TM = \sum_{t=1}^N (P_{R,Ur}(t) - P_{RT}(t)) - \sum_{t=1}^N (P_{IY}(t) - P_{R,IY}(t)) - \sum_{t=1}^N (P_{R,DY}(t) - P_{Bat,S}(t)) - K * \sum_{t=1}^N (P_h(t)) \quad (24)$$

İklimlendirme cihazlarının güç talebinin karşılanmasında, alternatif enerji kaynaklarının maksimum kullanımını sağlayacak optimizasyon problemi gerekli tüm model bileşenleri ile verilmiştir. Bu bağlamda, hibrit güç sistemi bileşenlerine ait her bir kaynağın, çalışma koşullarını belirleyen, fiziksel dönüşüm denklemleri ve kısıtları verilmiştir. Dolayısıyla, rüzgar hızı ve ışınım verisinin elimizde olduğu durumda, (24) ile verilen TM fonksiyonun minimizasyonunu (1-23) kısıtları altında sağlayacak bütünsel model, iklimlendirme cihazlarının güç talep cevabının karşılanmasında alternatif enerji kaynaklarının kullanımını önceleyen çözümü verecektir. Bir sonraki bölümde elde edilen optimizasyon modelinin test sonuçları sunulacaktır.

4. Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar (Simulation Studies and Results)

Önceki bölümde verilen optimizasyon modeli hem tamsayı hem de ikili (binary) değer alan değişkenler içermektedir. Bu bakımdan problem çözümü karışık tamsayı optimizasyon (Mixed integer linear programming) çözümü sunan bir platformda yapılmalıdır. Dolayısıyla karışık tamsayı model, GAMS v.24.1.3. (GAMS, 2021) platformunda CPLEX v.12 (CPLEX v.12, 2021) çözücüsü ile test edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar grafiksel olarak sunulup yorumlanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametre değerleri Tablo 1’ de verilmiştir.

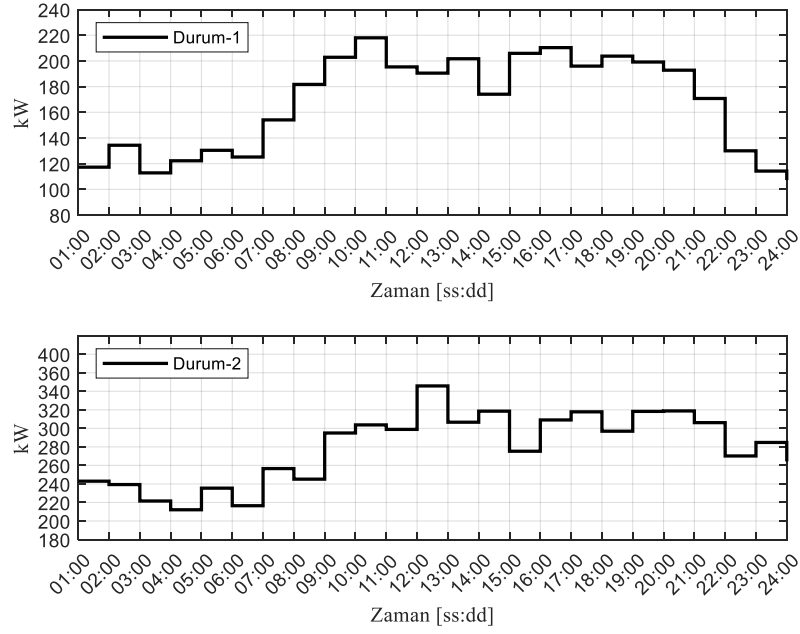
Tablo 1. Benzetim parametreleri (Simulation parameters)

| SİMGE | DEĞER | SİMGE | DEĞER |
|---------------|-----------------------------|-----------------|-------|
| $E_{BED,b}$ | Durum-1: 20 Durum-2: 180 | R_{nom} | 330k |
| $E_{BED,mak}$ | 200 | Rt_r | 16.7 |
| $E_{BED,min}$ | 20 | V_{GP} | 0.15 |
| GP_A | 200 | $V_{rD,Bat}$ | 1 |
| GP_{nom} | 20k | $V_{rS,Bat}$ | 1 |
| K | 10000 | ρ | 1.2 |
| $K_{D,Bat}$ | 0.2 | $\tau_{GP,Kon}$ | 0.95 |
| $K_{S,Bat}$ | 0.4 | τ_R | 0.46 |
| $P_{Bat,nom}$ | 200 | $\tau_{R,Kon}$ | 0.95 |

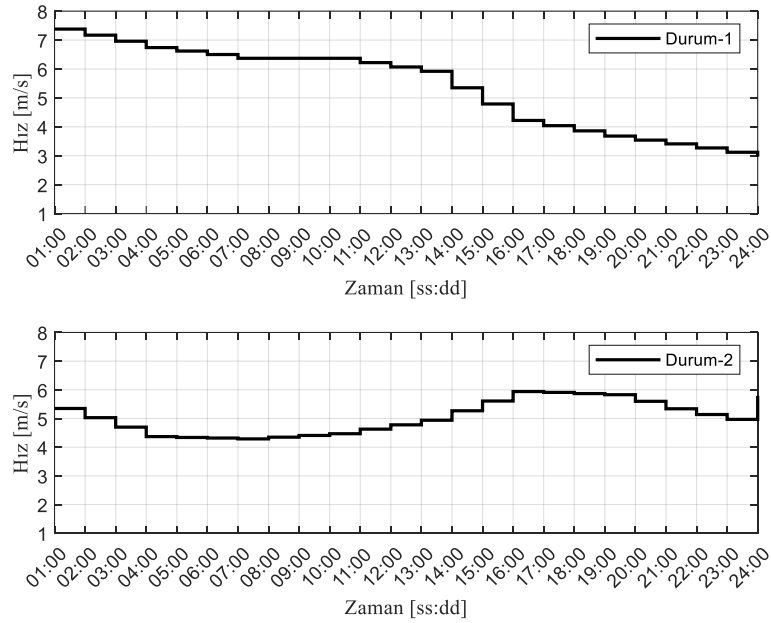
Benzetim çalışmalarında, literatürde bulunan, İtalya'nın Roma şehrinde bulunan S. Giovanni hastanesine ait iklimlendirme yük verileri kullanılmıştır (Prudenzi vd., 2008; Prudenzi vd., 2009). İlgili çalışmalarda iklimlendirme yükleri 2007-2008 yılları için kaydedilmiştir. Bu çalışmada ise kış ve yaz dönemlerini temsilen sırasıyla Durum-1 ve Durum-2 adıyla iki benzetim çalışması yapılmıştır. Her iki durum yapılandırması Tablo 2’ de özetlenmiştir. Durum-1 kapsamında kış dönemi iklimlendirme yük ve alternatif enerji kaynakları üretim verileri dikkate alınmıştır. Benzer şekilde, Durum-2 kapsamında yaz dönemi verileri kullanılmıştır. İklimlendirme yükleri için, yaz veya kış ortalama yükleri alınarak ilgili dönemi en iyi temsil etmesi amaçlanmıştır. Bunun yanında, üretim verileri üzerindeki belirsizlikler fazla olduğundan ilgili mevsimin ortasından bir gün seçilerek mevsim karakteristiklerinin benzetim ortamına yansıtılması amaçlanmıştır. Şekil 1’de her iki durum için iklimlendirme yükleri verilmiştir. Işınım ve rüzgar hızı verileri için Avrupa Birliği Komisyonu Ortak Araştırma Merkezinin sunduğu platformdan yararlanılmıştır (PVGIS, 2021). Şekil 2’de, Durum-1 için kış dönemini temsilen 24/12/2007 ve Durum-2 için yaz dönemini temsilen 24/07/2008 tarihlerine ait rüzgar hızı verileri görülmektedir. Işınım verileri de rüzgar hızı verileri ile aynı tarihli olarak, Şekil 3’te verilmiştir. RT seçimi için yine hastaneler de kullanım için önerilmiş türbin modellerine yer verilen bir çalışmadan yararlanılmıştır (Tahboub vd., 2011). İlgili çalışmada 330kW ve 900kW anma değerli iki türbin modeli önerilmiştir. Çalışmada kullandığımız iklimlendirme yük profilleri dikkate alındığında, 330kW’lık türbin uygun model olarak alınmıştır. Türbin uzunluğu 49 metre olup Şekil 3’te verilen rüzgar hızı verileri 10 metre yükseklik için ölçülmüştür. Bu durumda (1-3) denklemlerini kullanarak elde edilen rüzgar elektriksel gücü Şekil 4-(a)’da görülmektedir. GP seçimi olarak 200 m² alana sahip verim değeri %15 olan panel kullanılmış olup (6) denklemi yardımıyla üretilen güç değeri Şekil 4-(b)’de verilmiştir.

Tablo 2. Durum-1&2 yapılandırması (Case 1&2 configurations)

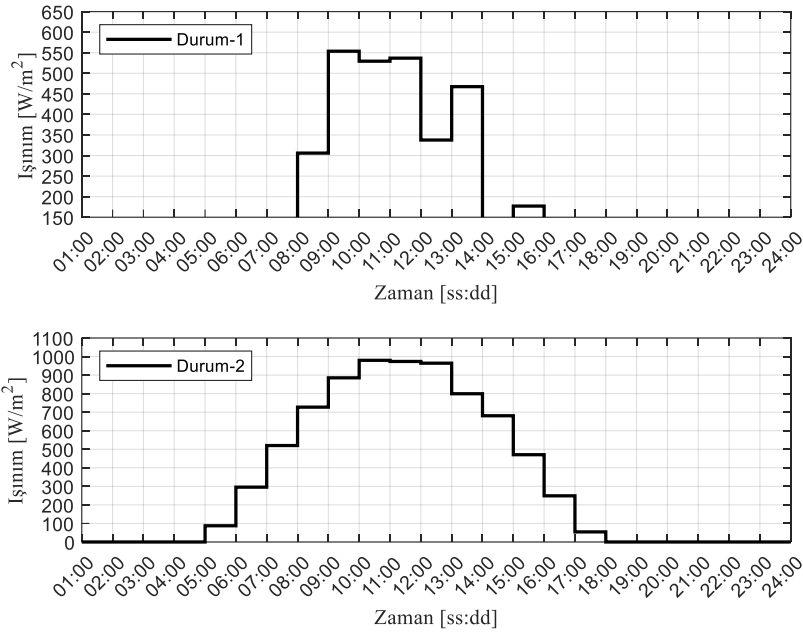
| | Işınım Verisi/Rüzgar Hızı (PVGIS, 2021) | İklimlendirme Yükleri (Prudenzi vd., 2008; Prudenzi vd., 2009) |
|----------------------|--|---|
| Durum-1 (Kış) | 24/12/2007 | Kış Dönemi ortalaması |
| Durum-2 (Yaz) | 24/07/2008 | Yaz Dönemi ortalaması |



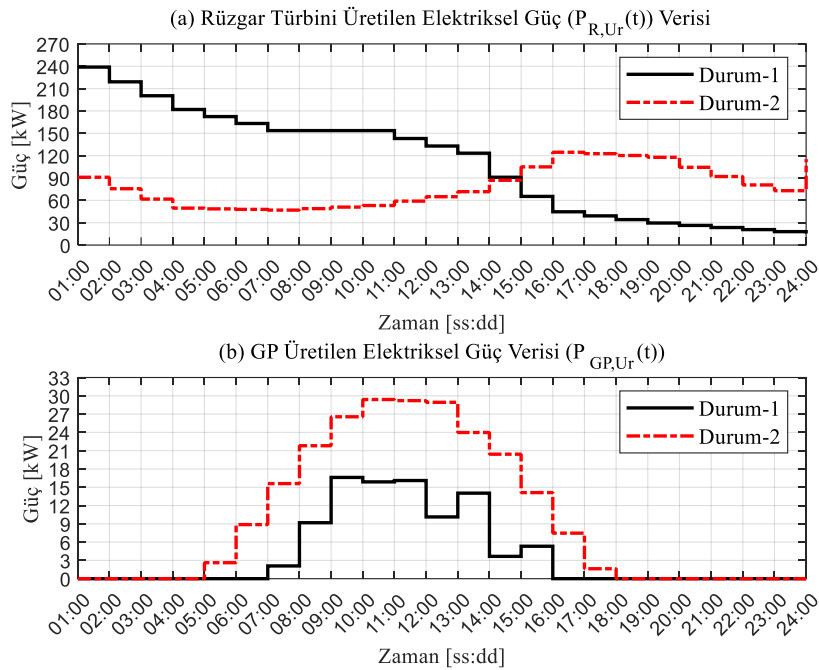
Şekil 1: Roma S. Giovanni hastanesi Durum-1&2 için iklimlendirme cihazları ortalama güç talepleri (HVAC average power demand of Rome S. Giovanni Hospital for the Case-1&2) (Prudenzi vd., 2008; Prudenzi vd., 2009)



Şekil 2: Roma S. Giovanni hastanesi bölgesinde Durum-1&2 için için rüzgar hızı verileri (Wind speed data for the Case-1&2 in the zone of Rome S. Giovanni Hospital) (PVGIS, 2021)



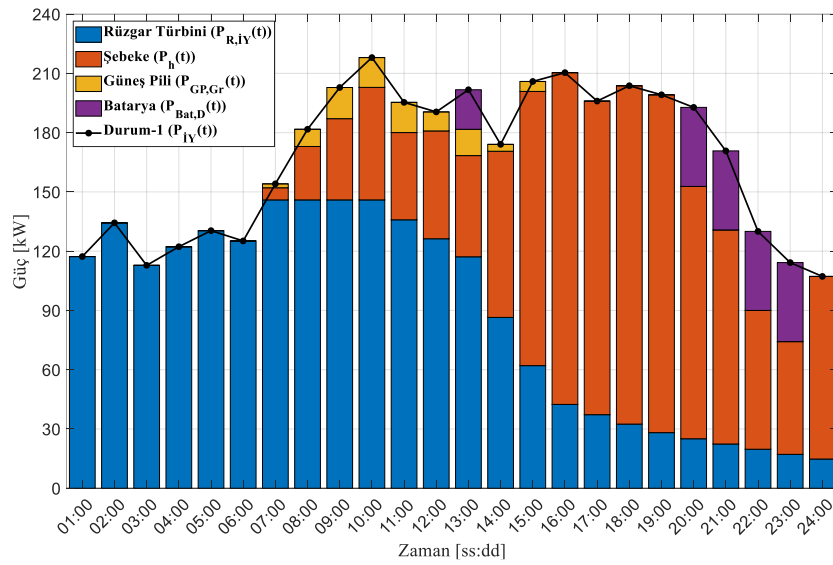
Şekil 3: Roma S. Giovanni hastanesi bölgesinde Durum-1&2 için iç iç ışınım verileri (Irradiation data for the Case-1&2 in the zone of Rome S. Giovanni Hospital) (PVGIS, 2021)



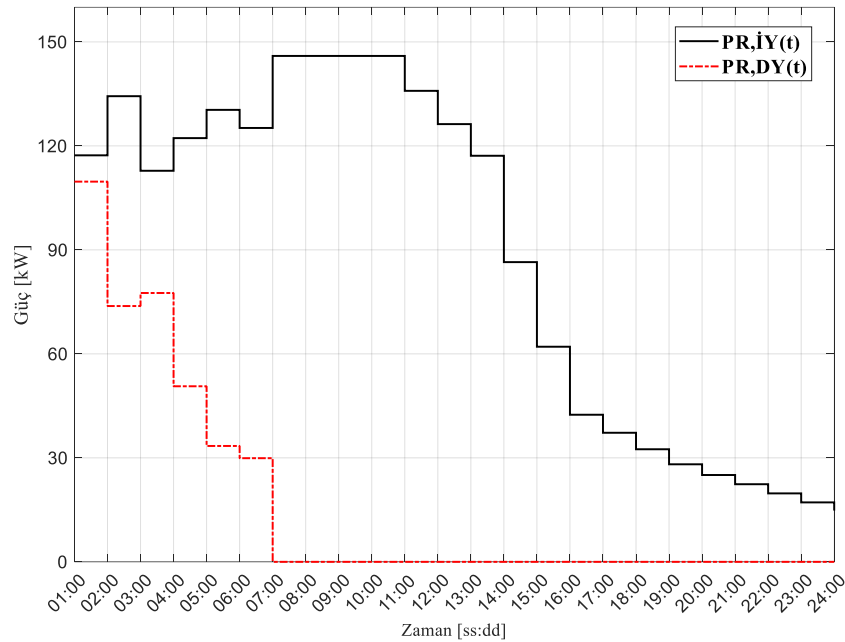
Şekil 4: Seçilen RT ve GP paneline göre Durum-1&2 için elde edilen güç değerleri (Power outputs of the WT and PV panel for the Case-1&2 according to the selected types)

Durum-1 ve Durum-2 benzetimleri için kullanılacak iklimlendirme güç talepleri ve güç sağlayıcı birimlerin üretim kapasiteleri Şekil 1-4' te verilmiştir. Durum-1 için yapılan benzetim çalışması ile iklimlendirme cihazları talep cevabının öncelikli olarak rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarından karşılanmasına ilişkin bu çalışmada sunulan optimal işletim modeli test edilmiştir. Şekil 5' te Durum-1 için iklimlendirme yüklerinin güç talep cevabının hangi kaynaklar ile karşılandığı sunulmuştur. Öncelikle optimal işletim modelinde kısıt olarak verildiği gibi tüm yük talebinin karşılandığı görülmektedir. Yük talebinin karşılanmasında ağırlıklı olarak RT kullanılmıştır. Bunun yanında kapasitesi nispetinin nerdeyse tümüyle GP ve bataryadan yararlanılmıştır. Yük talebinin karşılanması sürecinde ortaya çıkan eksik kısım ise şebeke tarafından sağlanmıştır. RT gücü modelde (19) sayılı eşitlikte belirtildiği gibi $P_{R,LY}(t)$ ve $P_{R,DY}(t)$ olarak iki parça halinde tanımlanmıştır. RT güç dağılım durumu Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi RT gücü iklimlendirme yüklerine öncelikli olarak aktırılmıştır. Artan güç ise, batarya şarjı öncelikli olarak, diğer yükleri beslemeye ayrılmıştır. Durum-1 benzetim analizinde dikkate

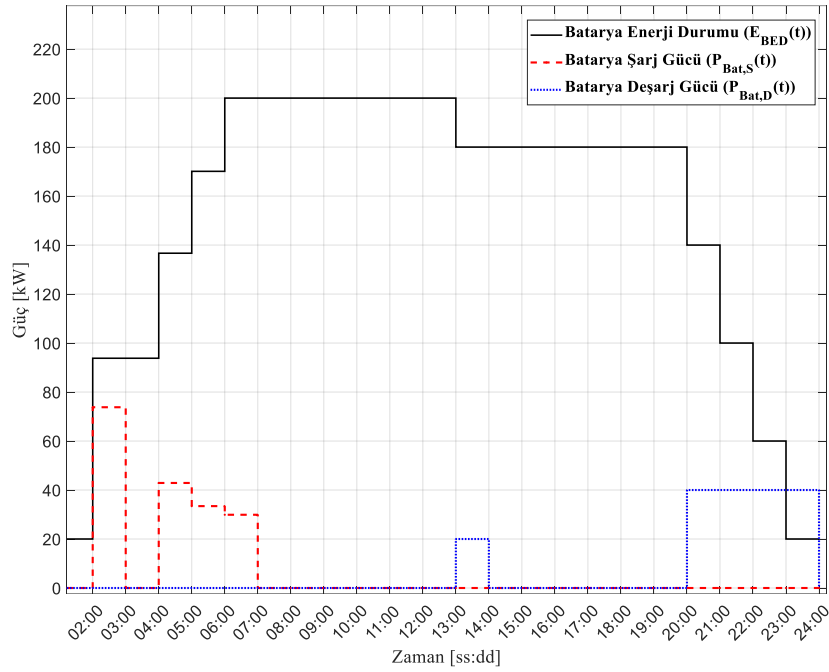
alacağımız son dinamik değişim, Şekil 7'de verilen batarya enerji durumu ve batarya şarj-deşarj gücüdür. Durum-1 parametrik değerleri dikkate alındığında, ilk andaki 20 [kW]'lik enerji seviyesi RT gücü ile artıp maksimum enerji durumu olan 200 [kW]'e çıkmıştır. Daha sonra şebeke gücünü daha az kullanma adına,deşarj kapasitesi ölçüsünde iklimlendirme yüklerinin güç talebine cevap vermede katkı sağlamıştır. Benzetim çalışması sonunda, batarya enerjisi izin verilen minimum seviyeye ulaşarak talep cevabı uygulamasına maksimum katkıyı sağlamıştır.



Şekil 5: Durum-1 için iklimlendirme yüklerinin güç talep cevabının karşılanması (Responding the HVAC loads demand power for Case-1)

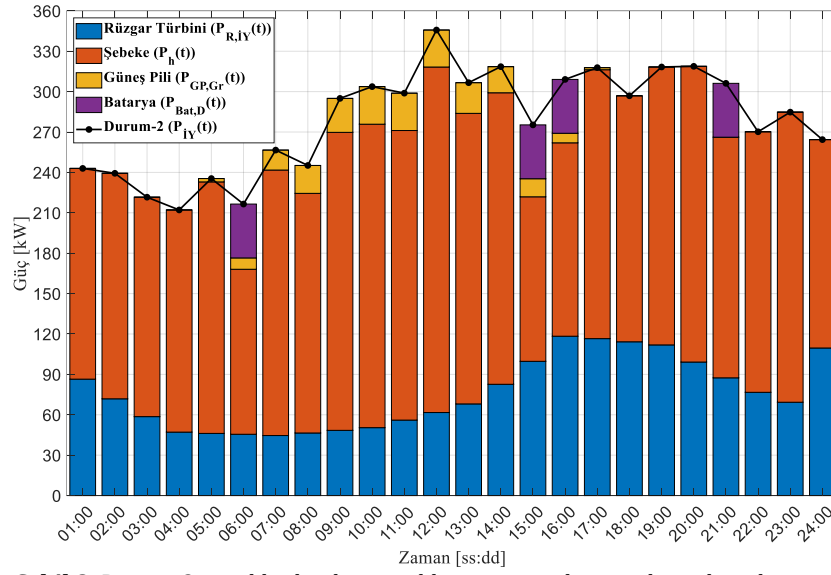


Şekil 6: Durum-1 için RT gücünün iklimlendirme ve diğer yükler tarafından paylaşımı (WT power sharing by HVAC loads and other loads for Case-1)

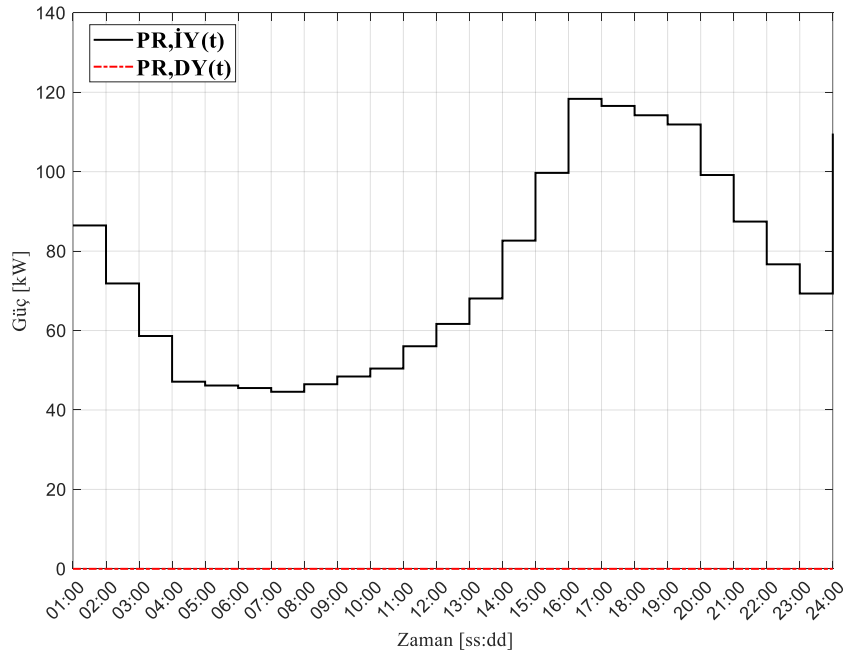


Şekil 7: Durum-1 için batarya enerji durumu ve batarya şarj-deşarj güçleri (Battery State of Energy and Charge-Discharge Powers for Case-1)

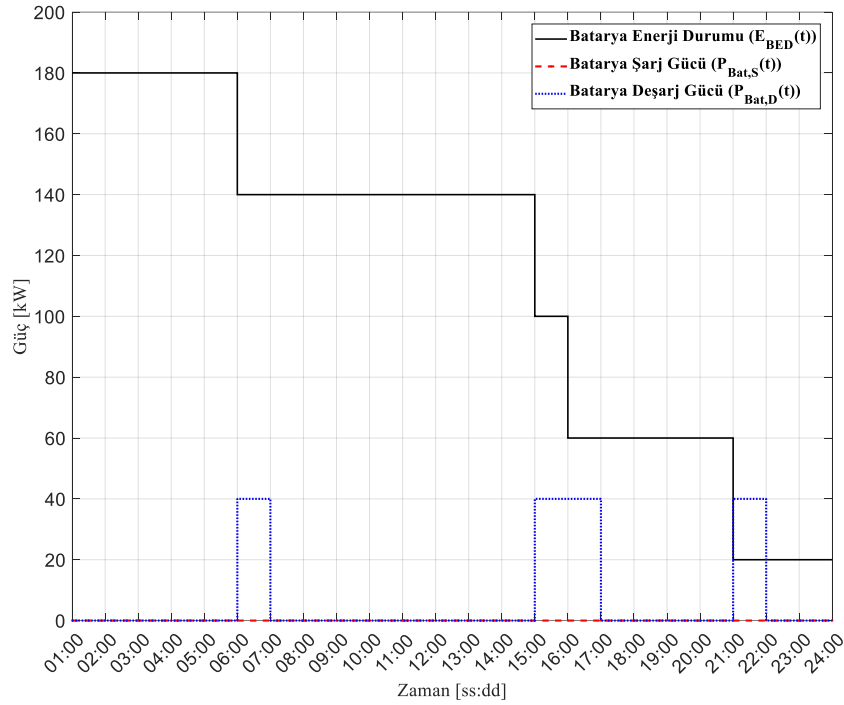
Durum-2 için yapılan optimal işletim modeli benzetim çalışması ile de benzer analizler yapılabilir. Ancak, Durum-2'de yaz mevsimi verileri göz önüne alındığından önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Analiz sonuçlarının farklılık göstermesinin bazı temel sebepleri vardır. Bunlar, iklimlendirme yüklerinin artışı ve ana kaynak olan RT güç üretiminin azalması gösterilebilir. Buna karşılık GP güç üretimi de artmaktadır, ancak göreceli olarak iklimlendirme yüklerinin güç taleplerine göre çok düşük güç üretmekte olduğundan talep açığını telafi edememektedir. Bunun yanında, optimal işletim modeli gereği tüm alternatif enerji kaynakları öncelikli olarak iklimlendirme cihazlarına aktarılmakta, dolayısıyla bu kaynaklardan maksimum ölçüde yararlanılmaktadır. Optimizasyon test sonuçları Şekil 8-10 ile sunulmuştur. Şekil 8 ile Durum-2 için iklimlendirme yüklerinin güç talep cevabının hangi kaynaklar ile karşılandığı sunulmuştur. Önceki durumda olduğu gibi, tüm yük talebinin karşılandığı görülmektedir. Yine optimizasyon amacımız gereği, yük talebinin karşılanmasında ağırlıklı olarak RT, daha sonra gücü nispetinde GP ve batarya kullanılmıştır. Önceki duruma göre kıyaslandığında GP kullanımı yaz dönemi olduğundan artış göstermiştir. Yük talebinin karşılanması sürecinde ortaya çıkan eksik kısım ise şebeke tarafından sağlanmıştır. Durum-2'de şebeke gücü kullanımı, RT güç üretiminin düşmesinden dolayı oldukça yükselmiştir. Şekil 9'da RT gücünün paylaşım durumu verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere RT gücünün tamamını iklimlendirme yükleri güç talebine aktarmıştır. Dolayısıyla, batarya şarj yükü veya diğer yük taleplerine hiç katkı sağlamamıştır. Son olarak, Şekil 10'da batarya enerji ve şarj-deşarj güç verileri resmedilmiştir. Durum-2 için batarya birimi, rüzgar hızının göreceli olarak düşük olması sebebiyle, daha önemli hale gelmiştir. Bu sebeple, Durum-2 için batarya başlangıç enerjisi seviyesi, kapasitesine yakın bir değer olan 180 [kWs]'e çıkarılmıştır. Şekil 10'da görüleceği üzere batarya enerjisi minimum izin verilen seviye olan 20 [kWs]'e kadar düşmüştür. Dolayısıyla iklimlendirme güç talebi uygulamasına maksimum katkı sağlamıştır. Bunun yanında batarya şarj gücü, rüzgar gücünün iklimlendirme yüklerini karşılamada yeterli olmaması nedeniyle, tüm benzetim sürecinde sıfırda kalmıştır.



Şekil 8: Durum-2 için iklimlendirme yüklerinin güç talep cevabının karşılanması (Responding the HVAC loads demand power for Case-2)



Şekil 9: Durum-2 için RT gücünün iklimlendirme ve diğer yükler tarafından paylaşımı (WT power sharing by HVAC loads and other loads for Case-2)



Şekil 10: Durum-2 için batarya enerji durumu ve batarya şarj-deşarj güçleri (Battery State of Energy and Charge-Discharge Powers for Case-2)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, kamu kuruluşları veya sosyal fayda kapsamında çok sayıda kişinin çalıştığı ve çok sayıda kişiye hizmet veren kuruluşlarda kullanılan iklimlendirme cihazlarının yükleri için optimal talep cevabı uygulaması sunulmuştur. Talep cevabı uygulamasında alternatif enerji kaynaklarından olan rüzgar ve güneş enerjisi ile çalışan güç birimleri ve de hem elektriksel enerjiyi depolayıp hem de sisteme elektriksel enerji sunabilen batarya birimi kullanılmıştır. Bunun yanında, alternatif enerji sistemlerinin doğası gereği ortaya çıkan güç üretim değişimlerinden sistemin etkilenmemesi için şebeke gücü de optimizasyon modeline dahil edilmiştir. Optimal işletim modeli her bir alt sistem için eşitlik ve eşitsizlik kısıtları ile inşa edilmiş ve de optimizasyon amacı iklimlendirme yüklerinin alternatif enerji kaynakları ile öncelikli olarak karşılanması şeklinde ifade edilmiştir. Model, hastane iklimlendirme yükleri ile hem kış şartlarını hem de yaz şartlarını dikkate alarak sırasıyla Durum-1 ve Durum-2 olarak test edilmiştir. Test sonuçlarına bakıldığında iklimlendirme yüklerinin öncelikle alternatif enerji kaynaklarından sağlandığı, ilgili kaynakların yetersiz kaldığı durumda kısmi şebeke gücü kullanımı ile talep cevabının sağlandığı görülmüştür. Bu durum alternatif enerji kaynaklarının kullanımı ile sürdürülebilir bir enerji yönetimi geliştirme adına önem arz etmektedir. Yüksek güçlü cihazların enerji taleplerini karşılamada çoklu güç birimlerinin bulunması sistemin enerji talebinin karşılanmasında ekonomik olarak karar verme mekanizmalarını da çeşitlenmesini sağlamaktadır. Böylelikle enerji yönetim stratejilerinin zenginleşmesi ile hem üretici hem de tüketici tarafında enerji fiyatlarının uygun seviyelerde dengelenmesi sağlanabilir. Alternatif enerji kaynaklarının göreceli olarak büyük yükler özelinde kullanımı hat kapasiteleri üzerindeki baskıyı azaltması ve de kayıpların azaltılması adına da enerji sisteminin sağlığını arttırıcı yönde etki etmektedir. Gelecek çalışması olarak, iklimlendirme yüklerinin karşılanmasında diğer alternatif enerji kaynaklarının kullanımı veya hastanelere ait tüm yüklerinin dikkate alındığı çalışmalar ele alınabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Arabul, F.K., Arabul, A.Y., Kumru, C.F. ve Boynuegri, A.R. Providing energy management of a fuel cell–battery–wind turbine–solar panel hybrid off grid smart home system. *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017): 26906-26913.
- Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 2008 Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Resmi Gazete, Sayı: 27075.
- Cplex 12 Solver Description. İnternet Erişim Adresi: <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/cplex.pdf>. (Ziyaret Tarihi: 10.07.2021)

- Erdinc, O. Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households. *Applied Energy* 126 (2014): 142-150.
- Erdinc, O., Taşçıkaraoğlu, A., Paterakis, N.G., Eren Y. ve Catalao, J.P.S., 2017. End-User Comfort Oriented Day-Ahead Planning for Responsive Residential HVAC Demand Aggregation Considering Weather Forecasts, *IEEE Transaction on Smart Grid*, 8:362-372.
- General Algebraic Modeling System. GAMS İnternet Erişim Adresi: <http://www.gams.com>. (Ziyaret Tarihi:10.07.2021)
- Goddard, G., Klose J. ve Backhaus, S., 2014. Model Development and Identification for Fast Demand Response in Commercial HVAC Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 2084-2092.
- Hao, H., Lin,Y., Kowli, A.S., Barooah, P. ve Meyn S., 2014. Ancillary Service to the Grid through Control of Fans in Commercial Building HVAC Systems. *IEEE Transactions on smart grid*, 5(4), 2066-2074.
- Ioan, B., Horia, B. ve Susana, O.P.T., 2015. Determination of the power generated by a wind turbine in constant wind and variable wind. 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), doi: 10.1109/ATEE.2015.7133919.
- Mizuno, Y., Baba, T., Tanaka, Y., Kurokawa, F., Tanaka, M., Colak, İ., Matsui, N., 2018. A New Load Prediction Method and Management of Distributed Power System in Island Mode of a Large Hospital," 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA).
- Photovoltaic Calculator. PVC İnternet Erişim Adresi: <https://photovoltaic-software.com/principle-ressources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems>. (Ziyaret Tarihi:01.06.2021)
- Photovoltaic Geographical Information System European Union Science Hub. PVGIS İnternet Erişim Adresi: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. (Ziyaret Tarihi:01.06.2021)
- Prudenzi A., Caracciolo V. ve Silvestri A., 2008. Identification of electrical load typical patterns in hospital for supporting energy management strategies, IFHE.
- Prudenzi A., Caracciolo V. ve Silvestri A., 2009. Electrical load analysis in a hospital complex. *IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, doi: 10.1109/PTC.2009.5281797.
- Shen, C., Zhao, K., Ge, J., ve Zhou, Q., 2019. Analysis of Building Energy Consumption in a Hospital in the Hot Summer and Cold Winter Area. *Energy Procedia*, 158, 3735-3740.
- Sun, B., Luh, P. B., Jia, Q., Jiang, Z., Wang F., ve Song, C. 2013. Building Energy Management: Integrated Control of Active and Passive Heating, Cooling, Lighting, Shading, and Ventilation Systems, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(3), 588-602.
- Tahboub, R., Ibrik, I., Tamimi, M., 2011. The Potential and Feasibility of Solar and Wind Energy Applications in Al-Ahli Hospital, International Energy Conference in Palestine.
- Talebi, A., Hatami, A., 2020. Online fuzzy control of HVAC systems considering demand response and users' comfort. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 15(7), 403-422.
- Tanwar, M.P., Agarwal, A. ve Mishra, A., 2018. Power Output Enhancement of Solar Panels by Field Area Optimization, International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), doi: 10.1109/GUCON.2018.8674954.
- Tizgui, I., Bouzahir, H., Guezar F.E., ve Benaid, B., 2017. Wind Speed Extrapolation and Wind Power Assessment at Different Heights, International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), doi: 10.1109/EITech.2017.8255215.
- Xu, Z., Jia, Q. ve Guan, X., 2015. Supply Demand Coordination for Building Energy Saving: Explore the Soft Comfort, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(2), 656-665.
- Yuan, J., Xiao, Z., Chen, X., Lu, Z. ve Gang, W., 2021. A Temperature & Humidity Setback Demand Response Strategy for HVAC Systems. *Sustainable Cities and Society*, 75 (2021): 103393.



MİKROENKAPSÜLE EDİLMİŞ PROPOLİS EKSTRAKTININ MUZ AROMALI PUDİNG ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Aygül AKTAŞ¹, Evren GÖLGE^{2*}

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Propolis,
Mikroenkapsülasyon,
Puding,
Fenolik Madde,
Antioksidan Aktivite.*

Öz

Bu çalışmada püskürtmeli kurutucuda mikroenkapsüle edilmiş propolis ekstraktı (MPE) %0.05, %0.1 ve %0.2 oranlarında hazır muz aromalı puding formülasyonlarına katılmıştır. Bulgulara göre MPE düzeyinin artışına bağlı olarak depolama süresince puding örneklerinde nem içeriğinde azalma görülmüştür ($p<0.05$). En yüksek serum ayrılması depolamanın 10. gününde kontrol örneğinde (3.99 mL/100 g) gözlenmiştir. Viskozite ile depolama süresi arasında ters orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. L^* değeri ve b^* değeri üzerinde depolama süresi etkili olurken a^* değeri üzerinde ilave edilen MPE düzeyinin etkili olduğu görülmüştür. Antioksidan aktivite ile toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde arasında istatistiksel olarak önemli düzeyde ($p<0.05$) bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek toplam fenolik madde içeriği 0.günde %0.2 MPE içeren örnekte (66.50 mg gallik asit /100 g KM), en yüksek toplam flavonoid içeriği 0. günde %0.2 MPE içeren örnekte (59.94 mg /100 g KM), en yüksek antioksidan aktivite 0.günde %0.2 MPE içeren örnekte (%69.67 inhibisyon) tespit edilmiştir. Depolama süresi boyunca hiçbir örnekte toplam aerobik mezofilik bakteri gelişimi saptanmamıştır. Sonuç olarak mikroenkapsüle propolis ekstraktının puding formülasyonuna dahil edilerek tüketilebilir, fonksiyonel bir ürün elde edilmiştir.

USE OF ENCAPSULATED PROPOLIS EXTRACT IN THE PRODUCTION OF BANANA FLAVORED PUDDING

Keywords

*Propolis,
Microencapsulation,
Pudding,
Phenolic Content,
Antioxidant Activity.*

Abstract

In this study propolis extract microencapsulated in spray dryer (MPE) was added to ready-to-eat banana flavored pudding formulations in 0.05%, 0.1% and 0.2%. According to the findings, the moisture content decreased during storage as MPE level increased ($p < 0.05$). The highest serum separation was observed in the control sample (3.99 mL/100 g) on the 10th day. An inverse relationship existed between viscosity and storage time ($p < 0.05$). Storage period was effective on L^* and b^* values, whereas MPE level was effective on a^* value. A statistically significant ($p < 0.05$) relationship between antioxidant activity, total phenolic and flavonoid content was observed. The highest total phenolic content in 0.2% MPE containing sample (66.50 mg gallic acid/100 g DM) on day 0, the highest total flavonoid content in the sample containing 0.2% MPE (59.94 mg / 100 g DM) on day 0, the highest antioxidant activity in the sample containing 0.2% MPE on day 0 (69.67% inhibition) was detected. Total aerobic mesophilic bacteria growth was not observed in any sample during storage. As a result, a consumable functional product was obtained by incorporating microencapsulated propolis extract into the pudding formulation.

Alıntı / Cite

Aktaş, A., Gölge, E., (2022). Mikroenkapsüle Edilmiş Propolis Ekstraktının Muz Aromalı Puding Üretiminde Kullanımı, Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi, 10(2), 587-604.

* İlgili yazar / Corresponding author: evren.golge@cumhuriyet.edu.tr, +90-346-219-1143

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|----------------------------------|------------|
| A. Aktaş, 0000-0002-1768-8169 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 03.02.2022 |
| E. Gölge, 0000-0002-0195-0070 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 11.03.2022 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 12.03.2022 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda tüketici taleplerinin besleyici, sağlıklı ve doğal bileşenlere sahip gıdalar yönünde arttığı gözlemlenmektedir. Bu talepler doğrultusunda gıda üreticileri yeni bir ürün üretme veya var olan ürünü geliştirme çabası içerisindeyler. Bu doğal ürünler arasında en yaygın olarak kullanılanlardan birisi de arılardan elde edilen ürünlerdir. Arı ürünlerinin tümü birçok hastalıkta, hastalığın ilerlemesinin önüne geçmek ve tedavi etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Toz puding, yenilebilir nişasta, lezzet ve çeşni verici maddeler ile Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliğinde (Anon., 1990) kabul edilen katkı maddelerinin, isteğe göre beyaz şeker katılarak veya katılmayarak tüm bu malzemelerin karıştırılması ile üretilen bir ürün olarak tanımlanmaktadır. Genellikle süt ile hazırlanan hafif bir tatlıdır. Piyasada tüketime hazır halde veya toz karışım şeklinde kakaolu, muzlu, çilekli ve vanilya aromalı pudingler bulunmaktadır. Üretilen pudinglerin duysal ve yapısal özelliklerini geliştirme yönünde yapılan çalışmalara ek olarak son yıllarda fonksiyonel gıdaların önemi hakkında bilinçlenen tüketicilerin talepleri doğrultusunda pudinglere fonksiyonel özellik kazandırma yönünde üreticilerin çalışmalarında da artış gözlemlenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Propolis, bal arıları (*Apis mellifera L.*) tarafından ağaçların kozalak, yaprak, genç sürgün ve kabuklarından, bitki tomurcuklarından topladıkları çeşitli yağları, polenleri, özel reçine ve mumsu maddeleri kendi metabolik salgılarıyla harmanlayarak oluşturdukları çok kuvvetli antiviral, antibakteriyel, antifungal, antioksidan, antikanser, antienflamatuar, etkiye sahip reçinemsi bir maddedir (Moreno vd., 1999; Koo vd., 2000; Sforcin vd., 2000; Nagaoka vd., 2003; Popova vd., 2005; Ahn vd., 2007; Laskar vd., 2010). Propolis içeriğinin genel olarak vaks, reçine, su, inorganik maddeler, fenolikler ve esansiyel yağlardan oluştuğu bilinmekte beraber bu içeriğin oranları propolisin elde edildiği bitki kaynağına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Markham vd., 1996; Burdock, 1998; Yangı, 2012). Propolis rengi kaynak olarak kullanılan bitki ve depolama süresine bağlı olarak sarı-yeşilden koyu kahverengiye kadar değişebilmektedir. Propolis bileşiminde bulunan başlıca mineraller; kalsiyum, magnezyum, iyot, çinko, potasyum, mangan, kobalt, bakır, demir ve sodyumdur. Vitaminler ise; A, B1, B2, B3, B6, C ve E vitaminleridir (Yangı, 2012; Çifci, 2015).

Son yıllarda gıda alanında giderek yaygınlaşan aktif gıda bileşenlerine yönelik çalışmalar ve bu bileşenleri ürünlere entegre etme ve koruma için yeni yöntem arayışı, mevcut yöntemleri geliştirme çalışmaları ve yöntemlerin kombinasyonları üzerine olan çalışmalar giderek artmaktadır. Bu anlamda enkapsülasyon teknolojisi de gıdalarda raf ömrünün uzatma, kontrollü salınım ve özellikle fonksiyonel gıdalarda kullanılan aktif lipofilik bileşenlerin korunmasında kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Ivanova vd., 2005; Karaoğlan, 2011). Enkapsülasyon teknolojisinde ise kapsülleme ajanı çeşitliliği, ekipmanların istenilen özelliklere ayarlanabilmesi, sürekliliğinin olması, üretilen mikroenkapsüllerin maliyetinin diğer yöntemlere kıyasla daha düşük olması, endüstriyel olarak uygulanabilirliği gibi pek çok sebepten dolayı püskürtmeli kurutma yöntemi en yaygın ve en tercih edilen yöntem olarak kullanılmaktadır (Koç vd., 2010; Bostancı, 2017).

Püskürtmeli kurutma yönteminin kullanılması ile ürünlerde su miktarı ve su aktivitesinin azalmasının yanı sıra ürünlerin mikrobiyolojik stabilitesini sağlama ve bununla birlikte mikrobiyolojik bozulmaları önleme ve ürünlerin spesifik özelliklerini muhafaza etmek amaçlanmıştır. Bu yöntemin en büyük avantajı kolay ekipman temini ve üretim maliyetinin düşük olmasıdır. Aynı zamanda iyi kalitede partikül elde edilmesidir. Yapılan çalışmalarda ısı, ışık, oksijen gibi çevresel koşullara karşı duyarlı olan antosiyaninlerin enkapsülasyonunda en çok tercih edilen yöntemdir. (Gökmen vd., 2012; Mol, 2016).

Bu çalışmada enkapsülasyon işlemi yapılmış toz formdaki mikroenkapsüle propolis ekstraktının ilave edildiği muz aromalı pudingte serbest radikal yakalama yeteneği, toplam fenolik ve flavonoid içeriğinin belirlenmesi ve muz aromalı pudingin kalite karakterindeki değişimlerle ilgili fiziksel ve kimyasal analizlerin yanı sıra mikroenkapsüle edilmiş propolis ekstraktı ilave edilmiş puding formülasyonundaki antimikrobiyal etkisinin belirlenerek mikroenkapsüle propolis fonksiyonel bir ürün olarak kullanılma olasılığının araştırılması amaçlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

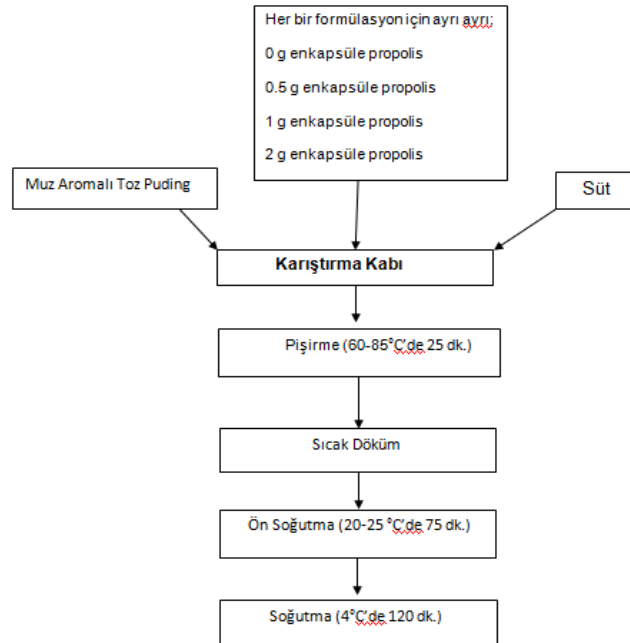
3.1. Materyal (Material)

Bu araştırma kapsamında başka bir çalışmada elde edilmiş mikroenkapsüle propolis ekstraktının muz aromalı puding üretiminde kullanılması Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Puding üretiminde kullanılan süt (Dimes, Türkiye) ve muz aromalı toz puding (Dr.Oetker, Türkiye) yerel bir marketten temin edilmiştir. Çalışmada, başka bir yüksek lisans tez çalışmasında elde edilen uygun saklama koşullarına muhafaza edilmiş toz formdaki mikroenkapsüle propolis ekstraktı (MPE) kullanılmıştır. MPE üretiminde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Pilot Tesisinde bulunan laboratuvar ölçekli Buchi B-290 (Flawil, İsviçre) mini püskürtmeli kurutucu kullanılmıştır. Emülsiyon oluşturmak amacıyla 100 mL distile suya 25°C'de 30 g maltodekstrin (Alfasol, Türkiye) (dekstroz eşdeğeri 14-17) ilave edilmiştir ve tamamen çözünene kadar manyetik karıştırıcı (Wisestir, MSH 20-A, Kore) ile karıştırılmıştır. Ardından karışım Ultra-Turrax homojenizatör (Yellow Line IKA, DI 25 basic, Almanya) ile 12000 devir/dakika'da karıştırılırken 10 mL propolis ekstraktı 10 dakika boyunca damla damla ilave edilerek emülsiyon oluşturulmuştur. Püskürtmeli kurutucunun besleme debisi 4 mL/dakika, hava giriş sıcaklığı 120°C'ye ayarlanmıştır. Aspiratör ayarı %85, pompa ayarı %13, basınçlı hava ayarı 0.30 bar olarak ayarlanmıştır. Çıkış sıcaklığı 70-65°C arasında değişmiştir. Püskürtmeli kurutucuda 8 saat süre ile enkapsülasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen toz formdaki mikroenkapsüle ürünler paketler içerisinde buzdolabında +4°C'de depolanmıştır (Bostancı, 2017).

3.2. Yöntem (Method)

3.2.1. Muz Aromalı Puding Üretimi (Production Of Banana Flavored Pudding)

Muz aromalı puding reçetesine uygun olarak 175 g muz aromalı toz puding karışımına 750 mL süt ilave edilerek kıvam alana kadar pişirilmeye devam edilmiştir. Hazırlanan puding örnekleri uygun analiz kaplarına boşaltılarak 75 dakika oda şartlarında bekletildikten sonra 2 saat buzdolabında (+4°C) soğumaya bırakılmıştır. Üretien örnekler tüm analizlerin gerçekleştirilmesi için ağzı kapalı polietilen kaplarda +4°C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir. (Şekil 1).



Şekil 1. Farklı miktarlarda mikroenkapsüle propolis ekstraktı eklenerek üretilen muz aromalı puding üretim akım şeması (Production flow chart of banana flavored pudding produced by adding different amounts of microencapsulated propolis extract)

3.2.2. Mikroenkapsüle Propolis Ekstraktının Analiz İçin Hazırlanması (Preparation Of Microencapsulated Propolis Extract For Analysis)

Uygulanacak analizlerden önce, 1 g MPE üzerine 50 ml %99.5'lik etanol (Sigma-Aldrich, Almanya) eklendikten sonra karışım tüp karıştırıcıda karıştırılmış ve 4000 x g'de 2 dakika Santrifüj (Sigma, 2-16PK, Almanya) edilmiştir (Nori vd., 2011).

3.2.3. Toplam Fenolik Bileşik Miktarının Hesaplanması (Calculation Of The Total Amount Of Phenolic Compounds)

Toplam fenolik bileşik miktarı gallik asitin (Sigma-Aldrich, Çin) standart olarak kullanıldığı Folin-Ciocalteu metodu ile hesaplanmıştır. Yöntem için 0.5 mL örnekten alınarak üzerine 2.5 mL Folin-Ciocalteu (1:10) ayracı (Merck, Almanya) ve 2 mL %4'lük sodyum karbonat (Sigma-Aldrich, Almanya) ilave edilmiştir. Tüpler vorteks ile karıştırıldıktan sonra 30 dk. oda sıcaklığında ve karanlıkta bekletilerek spektrofotometrede (Optima, SP-3000 Plus, Japonya) 750 nm'de absorbans değerleri okunmuştur. Sonuçlar elde edilen standart grafiği yardımıyla mg gallik asit eşdeğeri cinsinden hesaplanmıştır. Örneklerin toplam fenolik madde miktarları, gallik asit (1, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200 ve 250 ppm) çözeltisi kullanılarak elde edilen kalibrasyon grafiğinin doğru denklemi kullanılarak mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/kg KM olarak ifade edilmiştir.

3.2.4. Antioksidan Aktivite Tayini (Determination Antioxidant Activity)

Analiz edilecek numuneden tüplere 0.1, 0.2, 0.3, ve 0.5 mL alınarak ve üzerlerine 4.0 mL olacak şekilde etanol (Sigma-Aldrich, Almanya) eklenmiş ve 1.0 mL DPPH (Sigma-Aldrich, Almanya) (0.5 mM) ilave edilerek reaksiyon karışımı oluşturularak ve mikroenkapsüllerin açılması sağlandıktan sonra oda sıcaklığında ve karanlıkta 30 dakika bekletilerek ve 517 nm'de absorbans spektrofotometrede (Optima, SP-3000 Plus, Japonya) ölçülmüştür (Chen vd., 2003). Hesaplama aşağıda belirtilen denkleme göre yapılmıştır (1).

$$\%DPPH \text{ radikali inhibisyonu} = \frac{AC(0) - AA(t)}{AC(0)} \times 100 \quad (1)$$

AC(0) : 0. dakikadaki kontrolün absorbansı

AA(t) : 30. dakikadaki antioksidan maddenin absorbansı

3.2.5. Nem Tayini (Determination Of Water Content)

Önceden sabit tartıma getirilmiş olan nem kaplarına 0.1 mg hassasiyetle 1-3 g numune tartılarak kabın yüzeyine yayılarak 70±2°C'de 4 saat süreyle vakumlu etüvde kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Sabit tartım elde edilene kadar işleme devam edilmiştir (Cemeroğlu, 2013). Yüzde nem hesaplaması aşağıda belirtilen denkleme göre yapılmıştır (2).

$$\%KM = \frac{M_1 - M}{M_2 - M} \times 100 \quad (2)$$

M= Kabın darası

M₁= İşlem sonrası kabın darası + numune

M₂=İşlem sonrası kabın darası + numune

%Nem= 100 - %KM

3.2.6. Su Aktivitesi (Water Activity)

Puding örneklerinin su aktivite değerleri yaklaşık 1 g örnek kullanılarak Labswift su aktivitesi cihazında (Novasina AG, İsviçre) ölçülmüştür.

3.2.7. Serum Ayrılması (Syneresis)

Puding örneklerinin serum ayrılması (sineresis) miktarlarının belirlenmesi için 5 g tartılan MPE eklenmiş muz aromalı puding örnekleri santrifüj tüplerine alınarak, 5000 rpm dönüş hızında 4°C'de 15 dakika santrifüj (Sigma, 2-16PK, Almanya) edilmiştir. İşlem sonrası katı kısımdan ayrılan serum miktarı mL/100 g olarak belirtilmiştir (Çifci, 2015).

3.2.8. Renk Analizi (Color Analysis)

MPE eklenmiş muz aromalı puding örneklerinin renk değerleri, renk ölçüm cihazı (CR-400 Konica, Minolta, Japonya) kullanarak ölçülmüştür. Hunter L*, a* ve b* değerleri kaydedilmiştir. Her bir örneğin ölçümü 3 farklı noktadan yapılmıştır. L* değeri (0-100) siyah ve beyaz arasındaki renkleri, a* değeri (+: kırmızı, -: yeşil) yeşil ve kırmızı arasındaki ve b* değeri (+: sarı, -: mavi) sarı ile mavi arasındaki renkleri tanımlamak için kullanılmaktadır.

3.2.9. Viskozite Analizi (Viscosity Analysis)

Pişirilerek buzdolabında bekletilen MPE eklenmiş muz aromalı pudinglerin viskoziteleri 22±2°C'de, V-75 numaralı başlık kullanılarak 100 rpm hızında bir dakika beklenerek değerler sabitlendiğinde, Brookfield DV-II model

viskozimetre (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Middleboro, MA) kullanılarak ölçülmüştür (Messery vd., 2019).

3.2.10. Duyusal Analiz (Sensory Analysis)

Hazırlanan puding numuneleri şeffaf plastik sunum kapları içerisinde farklı şekillerde kodlanarak Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği çalışanları ve öğrencilerinden oluşan 8 kişilik eğitimsiz panelist grup tarafından değerlendirmeleri hedonik skala kullanılarak sağlanmıştır. Hedonik skalada "1" puan en az beğendim "10" puan en çok beğendim yargılarını ifade etmektedir. Panelistler tarafından değerlendirilen kalite unsurları; kıvam (kaşık ile örneği karıştırmak suretiyle), koku (örneklerin burun yoluyla direkt koklanması suretiyle), lezzet (örneklerin ağız yoluyla tadılması suretiyle), renk (örnekler gün ışığında direkt bakmak suretiyle) ve genel beğenidir. Örnekler 0., 5. ve 10. günlerde duyusal analiz tek paralel olarak uygulanmıştır. Panelistlere örneklerle birlikte ağızlarını nötrlemeleri amacıyla su verilmiştir.

3.2.11. Mikrobiyolojik Analiz (Microbiological Analysis)

Mikrobiyolojik olarak analizi yapılacak her bir örnek steril Stomacher torbalara 10 g tartılarak üzerlerine 90 mL steril peptonlu fizyolojik tuzlu su ilave edilip stomacherde homojenize edilmiştir. Homojenize hale getirilmiş örnekler steril peptonlu fizyolojik tuzlu su ile 1:10 oranında seyreltilmiş ve seri dilüsyonlar (10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} katlık) hazırlanmıştır. Toplam aerobik mezofilik bakteri sayımının gerçekleştirilmesinde hazırlanan dilüsyonlardan 1 ml alınarak dökme plak yöntemi ile Plate Count Agar'a ekim yapılmıştır. Kendiliğinden katılaşması beklenen petriyer 30°C'de 72 saat inkübasyona bırakılmıştır. Plate Count Agar'da üreyen bütün koloniler toplam aerob mezofilik bakteri olarak değerlendirilmiştir (Anon, 2014).

3.2.12. İstatistiksel Analizler (Statistical Analysis)

Mikroenkapsüle propolis ekstraktı eklenmiş muz aromalı puding örneklerinde, MPE düzeyi ve depolama süresinin bağımlı değişkenler üzerine olan etkisi, SPSS Statistic for Windows (versiyon 16.0, Armonk, NY: IBM Corp.) programı kullanılarak varyans analizi ile incelenmiştir. Varyans analizi sonucu bağımlı değişkenler üzerine etkisi önemli bulunan faktörler veya faktör etkileşiminin hangi gruplardan kaynaklandığını belirlemek için çoklu karşılaştırma testlerinden Tukey testi uygulanmıştır. Bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için, Statistica 12 paket programında (1995, StatSoft, Tulsa, OK, USA) Pearson korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir ve grafikleri çizilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

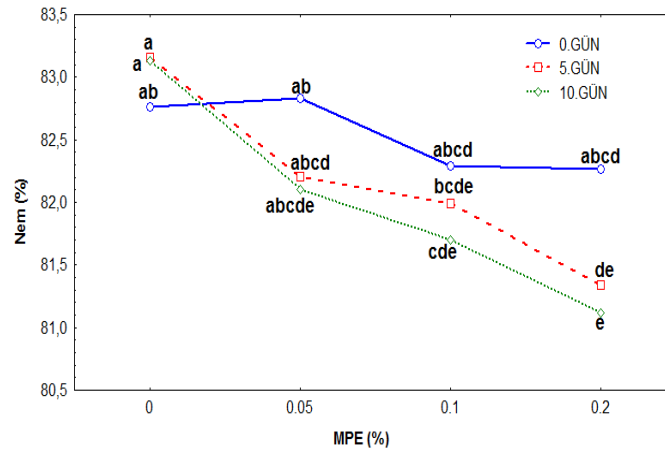
4.1. Mikroenkapsüle Propolis Ekstraktının Toplam Fenolik Madde, Toplam Flavonoid Madde ve Antioksidan Kapasitesi (Total Phenolic Substance, Total Flavonoid Substance and Antioxidant Capacity of Microencapsulated Propolis Extract)

Çalışmada kullanılan Folin-Ciocalteu reaktifi fenolik asitler, flavanoller, flavonoidler, antosiyaninler gibi fenolik yapıya sahip bileşikler ile renkli bir yapı oluşturduğundan dolayı polifenolik ve fenolik tüm bileşenlerin toplam miktarı belirlenmiştir. Yapılan analiz sonucu muz aromalı pudinge katılmadan önce MPE'nin toplam fenolik madde içeriği 76.17 ± 0.56 mg/-kg ve toplam flavonoid madde miktarı 22.01 ± 1.28 mg/kg ve olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde MPE örneğinin antioksidan özelliğini belirlemede DPPH radikali üzerinden hesaplama yapılmıştır. Serbest radikali giderme aktivitesinin belirlemek için 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm ve 500 ppm konsantrasyonlarında %inhibisyon sırası ile 10.7 ± 0.98 , 23.3 ± 0.84 , 34.8 ± 1.12 , 38.0 ± 1.18 ve 41.6 ± 0.94 olarak hesaplanmıştır.

Bostancı (2017) püskürtmeli kurutucuda enkapsülasyon işlemi uyguladığı propolis ile yaptığı çalışmada mikroenkapsüle propolise ait toplam fenolik madde miktarının 89.17 ± 0.96 mg/kg olduğunu ve ayrıca farklı konsantrasyonlarda mikroenkapsüle propolisin antioksidan aktivitesinin (% DPPH) %14.30 ile %59.52 arasında değiştiğini bildirmiştir. Yavuz (2011) Türkiye'nin farklı illerinden (Van, Erzurum, Gümüşhane, Ordu, Rize ve Muğla) topladığı etanolle ekstrakte edilen propolislerde FRAP (Fe^{+3} indirgeme) metodu ile örneklerin toplam flavonoid madde miktarını tespit etmiştir ve toplam flavonoid madde miktarının 78-168 mg/kg arasında değiştiğini saptamıştır. Başka bir çalışmada ise püskürtmeli kurutucuda enkapsülasyon işlemi uygulanan propolise ait toplam flavonoid içeriğinin 10.58-14.03 mg/kg arasında bulunduğu ifade etmiştir (Marqueell vd., 2006). Chen vd. (2003) Tayvan propolisinde yaptıkları çalışmada farklı konsantrasyonlarda alınan propolis ekstraktlarında % DPPH aktivitesinin %18.3 ile %99.8 arasında değiştiği rapor etmişlerdir.

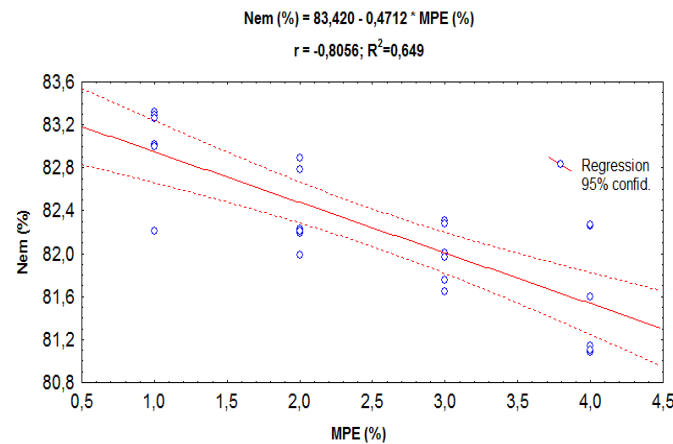
4.2. Mikroenkapsüle Propolis Ekstraktı (MPE) İlave Edilerek Üretilmiş Muz Aromalı Pudinglerin Nem İçeriği, a_w , Serum Ayrılması ve Viskozite (Moisture Content, a_w , Serum Separation and Viscosity of Microencapsulated Propolis Extract (MPE) Containing Banana Flavored Puddings)

En düşük nem içeriği 10. günde %0.2 MPE içeren örnekte 81.14 ± 0.05 ve en yüksek kontrol örneğinde 0. günde 83.32 ± 0.29 olarak tespit edilmiştir (Şekil 2). Kontrol örneğinin nem içeriğinde depolama süresi boyunca çok bir farklılık görülmemiştir. Ergül ve Karakaya (2013) %15 maviyemiş (yaban mersini) içeren puding örneklerine ait nem içeriğinin 77.42 ± 0.15 olduğunu bildirmişlerdir. Nem miktarı ürünün topaklanmasını ve su aktivitesini etkilemektedir. Genel anlamda ürünlerin nem oranının çok yüksek olması istenmez çünkü nem oranı doğrudan ürünün raf ömrünü ve dayanıklılığını etkilemektedir. Puding örneklerindeki nem içeriğindeki farklılığa hangi MPE düzeyi ve hangi depolama süresinin neden olduğunu belirlemek için yapılan Tukey testi sonuçlarını gösteren Şekil 2 incelendiğinde, örneklere ilave edilen %MPE miktarındaki artışa bağlı olarak nem içeriğinde de bir azalış gözlemlenmiştir ($p < 0.05$).



Şekil 2. Nem içeriği üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler $p < 0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on moisture content (Values indicated with different letters are different from each other at $p < 0.05$))

Nem içeriği ile ilave edilen MPE düzeyi arasındaki korelasyon incelendiğinde, ilave edilen MPE düzeyi ile nem içeriği arasında ters orantılı kuvvetli bir ilişki ($r = -0.806$) olduğu görülmektedir ($p < 0.05$). İlave edilen düzeye bağlı olarak nem içeriğinde azalışın meydana geldiği görülmüştür (Şekil 3).

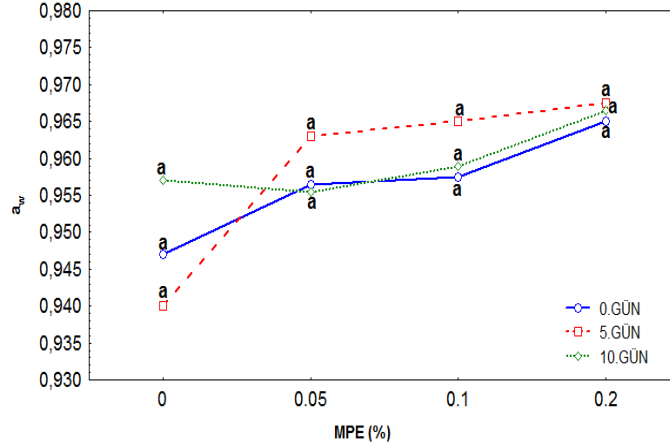


Şekil 3. Nem içeriği ile %MPE düzeyi arasındaki ilişki (Relationship between moisture content and %MPE level)

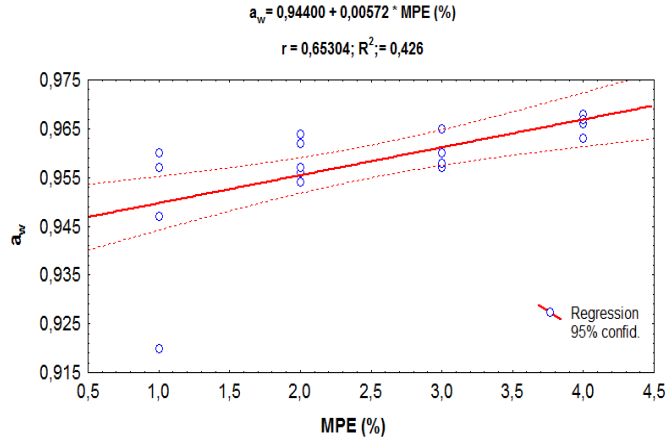
Gıdalarda su aktivitesi gıda teknolojisinde oldukça önemlidir. Su aktivitesi gıdalarda fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kararlılığı etkilediğinden doğrudan gıda kalitesini de etkilemektedir. Yapılan literatür araştırmasında süt içeren tatlılar grubundan kabul edilen pudingin su aktivitesinin (a_w) mikroorganizma gelişimi için uygun olduğu bilgisine rastlanılmakla beraber su aktivitesi üzerine bir çalışmaya rastlanılmamıştır (Alışarlı vd., 2002). Süt bazlı bazı gıda ürünlerinin su aktivitesi değerlerinin incelendiği çalışmalarda; Tokatlı (2011) koyun ve keçi sütü kullanarak ürettiği 4 farklı (koyun sütü, %60 koyun sütü+%40 keçi sütü, %90 koyun sütü+%10 keçi sütü, sadece koyun (sütü-yanık)) yoğurt örneklerinin su aktivitesi değerlerinin 0.93 ile 0.98 arasında değiştiğini

belirtmiştir. Başka bir çalışmada ise, Çubukçı (2016) Erzurum yöresinde tüketime sunulan vanilyalı, kakaolu ve vişneli dondurmaların su aktivitesi değerlerinin ile 0.95 olduğunu bildirmiştir.

Puding örneklerindeki su aktivitesindeki farklılığa hangi MPE düzeyi ve hangi depolama süresinin neden olduğunu belirlemek için yapılan Tukey testi sonuçları incelendiğinde (Şekil 4), örneklere ilave edilen %MPE miktarındaki artışa bağlı olarak su aktivitesinde bir artış gözlemlenmiştir ($p<0.05$). Su aktivitesi (a_w) ile ilave edilen MPE düzeyi arasındaki korelasyon incelendiğinde ise, MPE düzeyi ile su aktivitesi (a_w) arasında doğru orantılı bir ilişki ($r=0.653$) olduğu görülmektedir (Şekil 5).

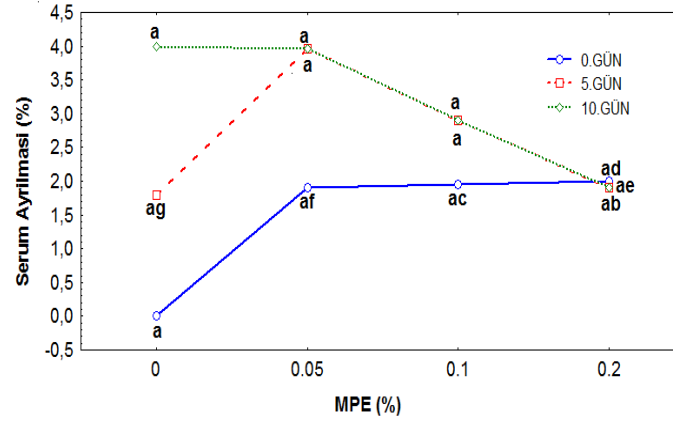


Şekil 4. Su aktivitesi (a_w) üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler $p<0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on water activity (a_w) (Values shown with different letters differ from each other at $p<0.05$))



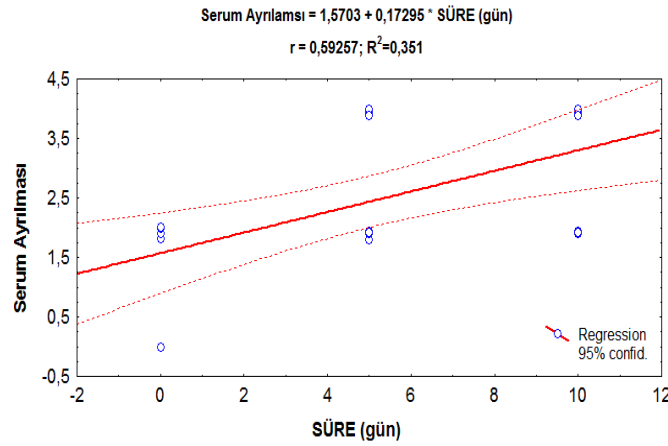
Şekil 5. Su aktivitesi (a_w) ile (%) MPE miktarının ilişkisi (Relationship between water activity (a_w) and amount of MPE (%))

Puding örneklerinde serum ayrılması değerleri incelendiğinde, 0. günde kontrol örneğinde serum ayrılması gözlemlenmezken, depolama süresinde ki artış ile serum ayrılmasında da artış gözlemlenmiştir. Örneklerde en yüksek serum ayrılması depolama süresinin 10. gününde kontrol örneğinde 3.99 ± 0.01 mL/100 g olarak tespit edilmiştir (Şekil 6). Bu durumun MPE de kullanılan kaplayıcı madde olan maltodekstrinin su ile bağ kurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan varyans analizi sonucunda ilave edilen MPE düzeyinin, depolama süresinin ve MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin serum ayrılması üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir ($p<0.05$). Tukey testi sonuçlarını gösteren Şekil 6 incelendiğinde kontrol puding örneğinde serum ayrılması depolama süresinde meydana gelen artış ile beraber arttığı görülmüştür. %0.05 ve %0.1 düzeyinde propolis içeren örneklerin serum ayrılması düzeyi depolamanın 5. ve 10. gününde benzerlik göstermiştir.



Şekil 6. Serum ayrılması (%) üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler $p<0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on syneresis (%)) (Values indicated with different letters differ from each other at $p<0.05$)

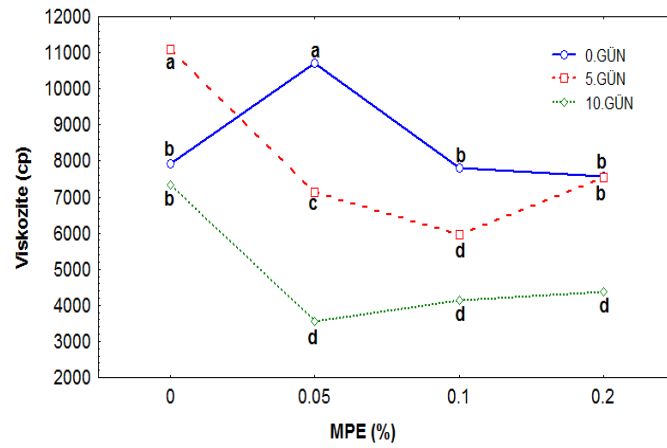
Serum ayrılması ile depolama süresi arasındaki korelasyon incelendiğinde, süre ile serum ayrılması arasında doğru orantılı bir ilişki ($r=0.592$) olduğu görülmektedir ($p<0.05$). Depolama süresinde meydana gelen bir birimlik artış serum ayrılmasında 0.173 birimlik artışa neden olmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Serum ayrılması (%) ile depolama süresi arasındaki ilişkisi (Relationship between syneresis (%) and storage time)

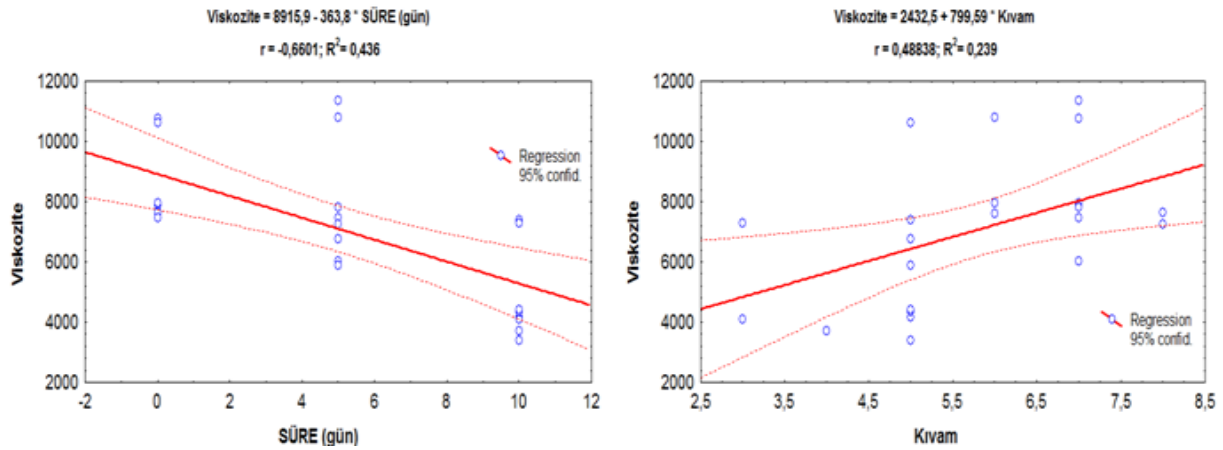
Karakuş (2013) farklı oranlarda stevia (%2.5, %2, %1.5), şeker (%10) ve stevia - şeker olmak üzere 8 adet yoğurt üretimi gerçekleştirdiği çalışmada 21 günlük depolama süresi boyunca yoğurt örneklerinin serum ayrılması değerlerine baktığında depolama sürecinin 1.gününde en yüksek değer 24.81 mL/25 g ve en düşük serum ayrılması değerini depolamanın 21. gününde %2 stevia ilave edilmiş set tip yoğurtta 18.16 mL/25 g olarak belirtmiştir. Derzashamshir (2017) süt ile üretilen pudingi kontrol örnek olarak süt yerine kazinomakropeptid içeren puding formülasyonları geliştirmiştir. Çalışmasında farklı oranlarda keçiyoynuzu gamı (%0.5, %0.7) ve K-karragenan (%0.02, %0.2) kullanmıştır. En iyi sonucu %10 kazeinomakropeptid, %0.7 keçiyoynuzu gamı, %5 nişasta ve %10 şeker kullanılarak üretilen puding formülasyonundan elde etmiştir. Bu formülasyon ile elde edilen pudingin yapısının süttozu ile üretilene pudinge en yakın olduğunu belirtmiştir. Üretilen pudinglerin su ayrılmasına bakıldığında süttozu ve kazinomakropeptid içeren pudinglerin süt tozu ile üretilende ve %0.7 keçiyoynuzu ilave edilen pudinglerde %0 olarak belirlemiştir.

Yapılan Varyans analizi sonucunda ilave edilen MPE düzeyinin, depolama süresinin ve MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin viskozite üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Depolamanın 10. gününde ilave edilen %0.05, %0.1 ve %0.2 MPE düzeyinin viskozite üzerinde anlamlı bir farklılığa neden olmadığı görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Viskozite üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin etkisi (farklı harflerle gösterilen değerler $p<0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on viscosity (values indicated with different letters differ from each other at $p<0.05$))

Viskozite ile depolama süresi ve kıvam arasındaki ilişki Pearson korelasyon ile incelendiğinde, viskozite ile depolama süresi arasında ters orantılı bir ilişki ($r=-0.661$), kıvam ile doğru orantılı zayıf bir ilişki ($r=0.488$) olduğu görülmüştür (Şekil 9).

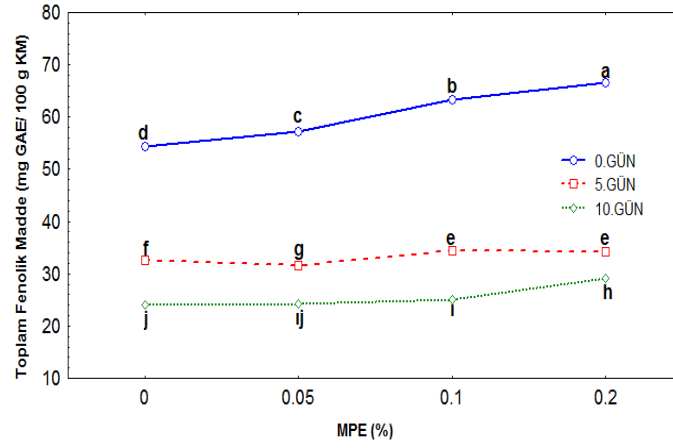


Şekil 9. Viskozite ile depolama süresi ve duyu kıvam arasındaki ilişkisi (Relationship between viscosity and storage time and sensory consistency)

Karakuş (2013) farklı oranlarda stevia (%2.5, %2 ve %1.5), şeker (%10) ve stevia-şeker olmak üzere 8 adet yoğurt üretimi gerçekleştirdiği çalışmada 21 günlük depolama süresi boyunca yoğurt örneklerinin viskozite değerlerine baktığında depolama sürecinin en düşük viskozite değeri depolama sürecinin 1. gününde sade yoğurttaki 39560 ± 1440 cP ve en yüksek değer depolamanın 21. gününde %10 şeker ilaveli yoğurttaki 53208 ± 690 cP olarak belirtmiştir. Çalışmada dikkat çeken bir diğer sonuç ise yoğurtlara ilave edilen stevia (%2.5, %2 ve %1.5) özü miktarı arttıkça viskozite değerinde de (42734 ± 1002 , 42645 ± 1435 ve 40689 ± 1551 cP) artış olduğunu bildirmiştir.

4.3. Mikroenkapsüle Propolis Ekstraktı (MPE) İlave Edilerek Üretilmiş Muz Aromalı Pudinglerin Toplam Fenolik Madde, Toplam Flavonoid Madde Düzeyleri ve Antioksidan Aktivitesi (Total Phenolic Substance, Total Flavonoid Substance Levels and Antioxidant Activity of Microencapsulated Propolis Extract (MPE) Containing Banana Flavored Puddings)

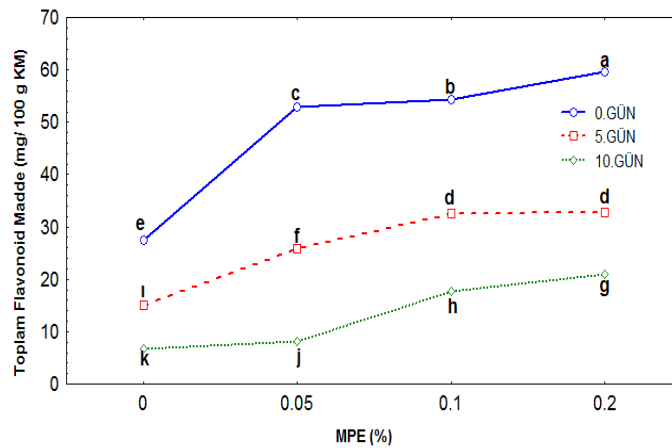
Depolama süresi ve MPE düzeyinin puding örneklerinin fenolik madde düzeyi üzerine etkisi varyans analizi ile incelendiğinde, her iki faktörün tek tek etkileri ve depolama süresi x MPE düzeyi etkileşiminin etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu gözlenmiştir ($p<0.05$). Puding örneklerinin toplam fenolik madde miktarındaki farklılığa hangi MPE düzeyi ve hangi depolama süresinin neden olduğunu belirlemek için yapılan Tukey testi sonuçlarını gösteren Şekil 10 incelendiğinde, örneklere ilave edilen %MPE miktarındaki artışa bağlı olarak toplam fenolik madde miktarında önemli bir artış ($p<0.05$), depolama süresinin artışına bağlı olarak ise önemli bir azalma olduğu gözlenmiştir.



Şekil 10. Toplam fenolik madde üzerine MPE düzeyi x depolama süre etkileşiminin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler p<0.05 düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of MPE level x storage time interaction on total phenolic substance (Values shown with different letters differ from each other at p<0.05))

Depolama süresinin ürün özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, farklı oranlarda (%0, %0.25, %0.50, %0.75) propolis ilave edilmiş ve 30 günlük depolama süresi boyunca toplam fenolik madde miktarları tespit edilmiş yoğurt örneklerinde, %0 propolis içeren örnekte depolamanın 1.gününde 0.09±0.03 mg GAE/g fenolik madde tespit edilirken depolamanın 30.gününde fenolik madde tespit edilmemiştir. %0.75 propolis ilave edilen yoğurt örneğinde ise fenolik madde miktarı depolamanın 1.günde 1.19±0.04 mg GAE/g ve 30.gününde 0.65±0.04 mg GAE/g olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmada yapmış olduğumuz çalışma sonuçlarına benzer şekilde, ilave edilen propolis miktarındaki artışa bağlı olarak toplam fenolik madde miktarının arttığı ve depolama süresi arttığında ise fenolik madde miktarının azaldığı ve bu azalış ve artışların istatistiksel olarak önemli olduğu (p<0.05) bildirilmiştir (Çelik, 2016).

Propolisin toplam fenolik madde içeriği bileşiminde bulunan flavonoidler, terpenler, kumarinler, fenolik asitler ve esterlerinden kaynaklanır (Karakaş, 2012). Literatürde propolisin kullanıldığı yoğurt (Çifci, 2015) ve sakız (Bostancı, 2017) çalışmalarında da benzer şekilde, propolis düzeyi arttıkça ürünlerdeki toplam fenolik madde düzeyinin arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca fenolik madde açısından zengin kurutulmuş yaban mersinin %0, %8, %16 ve %24 oranlarında muffin kekine katılması ile yapılan çalışmada, ilave edilen yaban mersini miktarı arttıkça toplam fenolik madde miktarının kontrol kek örneğinin sırasıyla 1.23, 1.40 ve 2.38 katı olduğu ve bu artışın istatistiksel olarak önemli olduğu bildirilmiştir (p<0.05). Bu artışın yaban mersini bileşiminde bulunan antosiyaninler, flavonoller, klorojenik asit ve prosiyanidinler ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir (Işık vd., 2017).

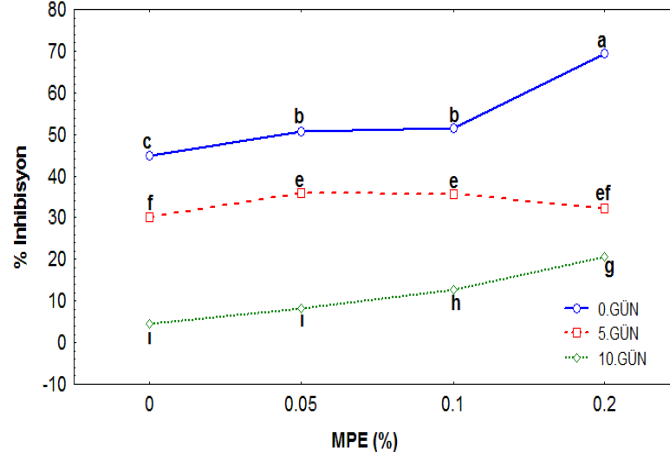


Şekil 11. Toplam flavonoid madde üzerine MPE düzeyi x depolama süre etkileşiminin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler p<0.05 düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of MPE level x storage time interaction on total flavonoid substance (Values shown with different letters differ from each other at p<0.05))

Yapılan varyans analizi sonucunda ilave edilen MPE düzeyinin, depolama süresinin ve MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin toplam flavonoid madde miktarları üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir (p<0.05). Tukey testi sonuçlarını (Şekil 11) incelendiğinde puding örneklerinin toplam flavonoid madde düzeyi depolama süresi uzadığında azalmasına karşın %0.1 ve %0.2 düzeyinde propolis içeren örneklerin

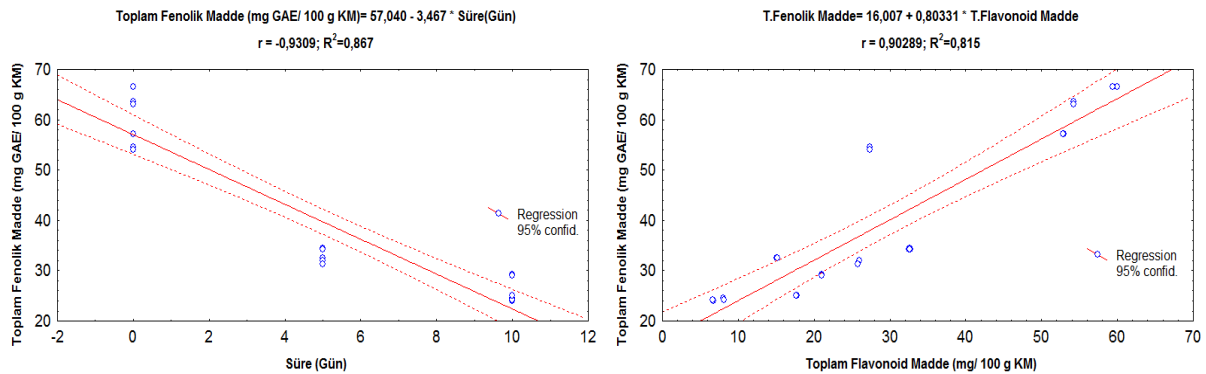
toplam flavonoid madde içeriğinin 5.günde bile kontrol örneğinin 0.gününden önemli düzeyde daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Yapılan varyans analizi sonucunda ilave edilen MPE düzeyinin, depolama süresinin ve MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin toplam fenolik ve flavonoid madde miktarlarında da olduğu gibi antioksidan aktivite üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir ($p<0.05$). Antioksidan aktivitedeki farklılığın hangi uygulamadan kaynaklandığını belirlemek için Tukey Testi yapılmıştır. Şekil 12'de görüldüğü üzere %0.2 MPE içeren 0. gün puding örneklerinin diğer örneklerden önemli düzeyde daha yüksek antioksidan aktivite gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca pudinglere eklenen propolis düzeyi azaldığında test edilen tüm depolama sürelerinde antioksidan aktivitenin her bir düzeyde önemli derecede azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 12. Antioksidan aktivite üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler $p<0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on antioxidant activity (Values shown with different letters are different from each other at $p<0.05$))

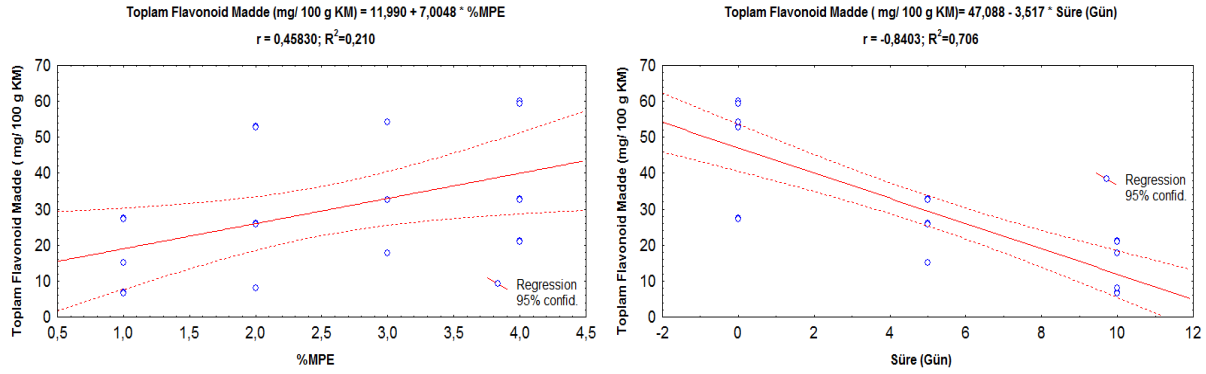
Literatürdeki bir çalışmada karamuk (*Berberis cratagina*) bitkisinden elde edilen mikroenkapsüle antosiyaninler dondurma üretiminde kullanılmış ve farklı sıcaklık (-18°C , 4°C , 25°C) ve farklı depolama süresi (1. 30. 60. ve 90. gün) sonunda analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda depolama süresindeki değişimin fenolik madde ve toplam antioksidan değerler üzerine etkisinin önemli olduğu ifade edilmiştir (Okurkan, 2018). Yapılan diğer çalışmalarda ürünlerdeki toplam fenolik ve flavonoid miktarındaki artışın antioksidan aktiviteyi arttırdığı ifade edilmiştir (Karakaş, 2012; Işık vd., 2017; Apaydın, 2015). Bu nedenle yapmış olduğumuz çalışmada örneklerdeki toplam fenolik, toplam flavonoid madde ve antioksidan aktivite arasındaki ilişki Pearson korelasyon ile incelenmiştir. Ayrıca bu değişkenlerle ilave edilen propolis düzeyi ve depolama süresi arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Toplam fenolik madde ile depolama süresi arasındaki ilişki incelendiğinde, depolama süre ile toplam fenolik madde arasında ters orantılı kuvvetli bir ilişki ($r = -0.931$) olduğu görülmüştür. Depolama süresinde bir birim artışın örneklerde bulunan fenolik madde miktarında 3.467 birimlik bir azalmaya neden olmuştur (Şekil 13). Puding örneklerinde toplam fenolik madde miktarı ile flavonoid madde miktarı arasında ise doğru orantılı kuvvetli bir ilişki ($r = 0.903$) olduğu görülmüştür (Şekil 13).



Şekil 13. Toplam fenolik madde ile depolama süresi ve flavonoid madde miktarı arasındaki ilişki (The relationship between total phenolic substance, storage time and amount of flavonoid substance)

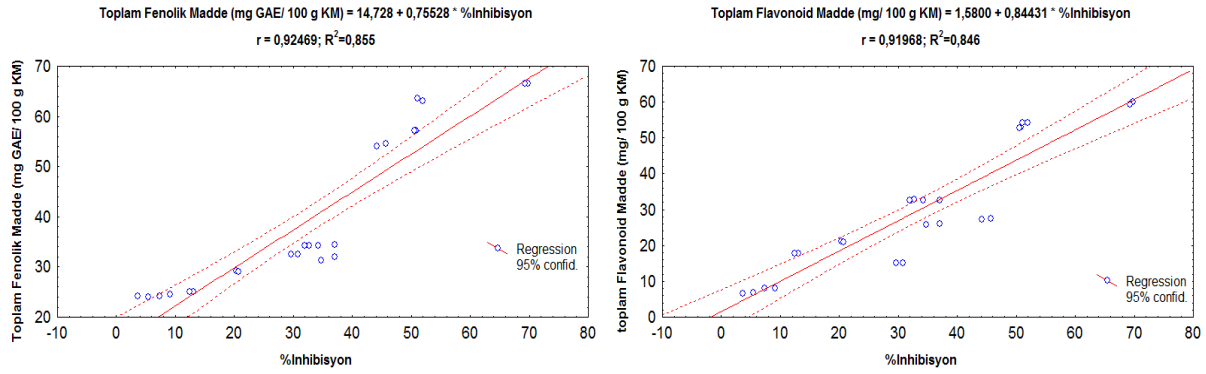
Propolis içeriğinde bulunan polifenolik maddelerin büyük bir kısmının flavonoid yapıda olduğundan ilave edilen propolis düzeyine bağlı olarak örneklerdeki flavonoid içeriği arttığında toplam fenolik madde içeriği de artmıştır. Toplam flavonoid madde ile süre ve MPE düzeyi arasındaki ilişki incelendiğinde, toplam flavonoid maddenin süre

ile ilişkisi kuvvetli ve ters iken, MPE düzeyi ile zayıf ve pozitif bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Puding örneklerinin toplam flavonoid madde miktarlarındaki değişimin %21'inin MPE düzeyi, %71'inin ise depolama süresi ile açıklanabildiği görülmüştür (Şekil 14).



Şekil 14. Toplam flavonoid madde ile MPE (%) düzeyinin ve sürenin ilişkisi (The relationship between total flavonoid substance and MPE (%) level and duration)

Antioksidan aktivite (%inhibisyon) ile toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde arasında istatistiksel olarak önemli düzeyde ($p<0.05$) bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Antioksidan aktivite ile toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde miktarları arasında doğru orantılı kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür (Şekil 15).

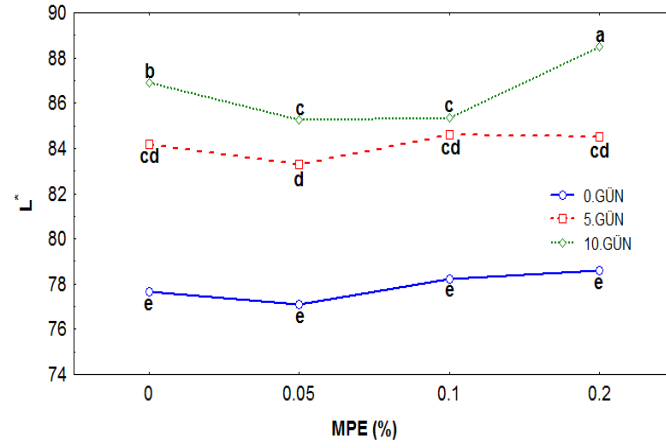


Şekil 15. Antioksidan aktivite ile toplam fenolik ve toplam flavonoid miktarının ilişkisi (Relationship between antioxidant activity and total phenolic and total flavonoid content)

Farklı oranlarda kurutulmuş yaban mersini ilaveli muffin tipi kek örneklerindeki toplam fenolik madde içeriği arttıkça antioksidan aktiviteninde arttığı tespit edilmiştir (Işık vd., 2017). Hacıbektaşoğlu (2019) farklı oranlarda şeker ve fenolik madde içeren kırmızı pancar ilave ederek ürettiği dondurma örneklerinde antioksidan aktivite değerinin (%inhibisyon) 13.66 ± 0.05 ile 27.98 ± 0.15 aralığında değiştiğini tespit etmiştir. Fenolik madde ile antioksidan kapasite arasındaki ilişkinin önemli olduğunu ifade etmiştir ($p<0.05$). Puding örneklerinde ilave edilen propolis düzeyine bağlı olarak fenolik ve flavonoid madde miktarlarında meydana gelen artış ile antioksidan aktivitenin artması, propolisin bünyesinde bulunan fenolik asitler, flavanoller, flavonoidler, antosiyaninlerin gibi bileşiklerden kaynaklanmaktadır.

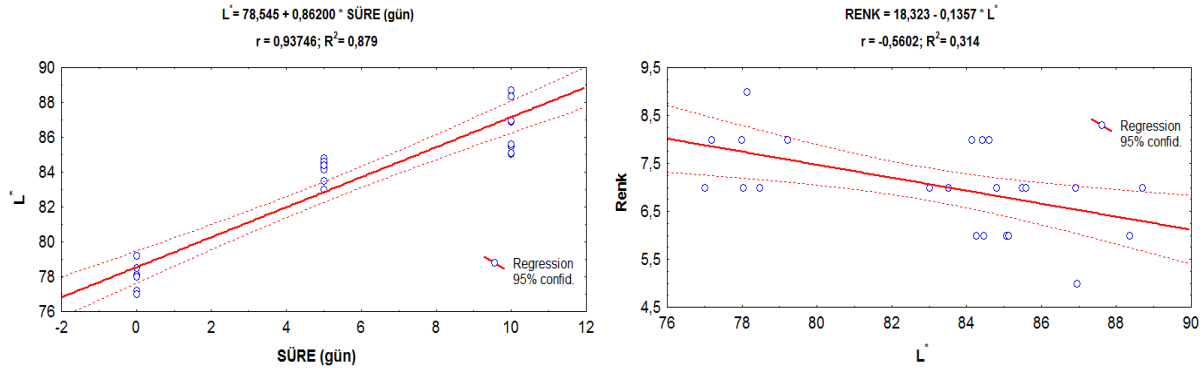
4.4 Mikroenkapsüle Propolis Ekstraktı (MPE) İlave Edilerek Üretilmiş Muz Aromalı Pudinglerin Renk Özellikleri (Color properties of Microencapsulated Propolis Extract (MPE) Containing Banana Flavored Puddings)

Yapılan varyans analizi sonucunda ilave edilen MPE düzeyinin, depolama süresinin ve MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin L^* değeri üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür ($p<0.05$). Tukey testi sonuçlarını gösteren Şekil 16 incelendiğinde ilave edilen MPE düzeyindeki 0. günde puding örneklerinde önemli olmazken, depolama süresindeki artış ile L^* değerlerinde de artış görülmüştür.



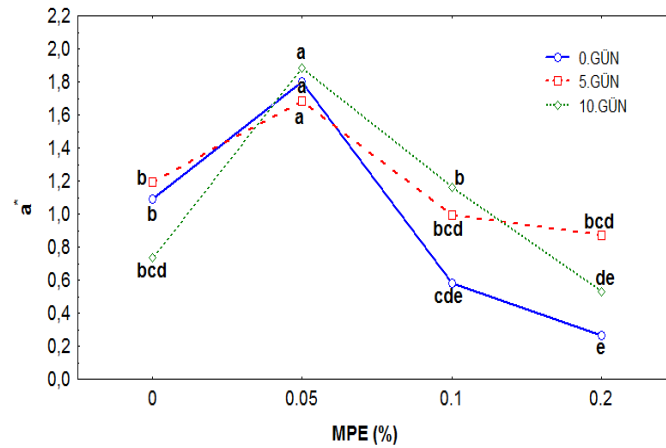
Şekil 16. L* değeri üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkisinin etkisi (farklı harflerle gösterilen değerler p<0.05 düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on L* value (values indicated with different letters differ from each other at p<0.05))

L* değeri ile süre arasındaki korelasyon incelendiğinde, depolama süresi ile L* değeri arasında doğru orantılı kuvvetli bir ilişki (r=0.937) olduğu görülmektedir. Depolama süresinde meydana gelen her bir birimlik artış L* değerinde 0.862 birimlik bir artışa neden olmaktadır. L* değerinin süreye bağlı olarak artışı duysal değerlendirmede görsel olarak puding örneklerinde beğeniyi azalttığı görülmektedir (Şekil 17).



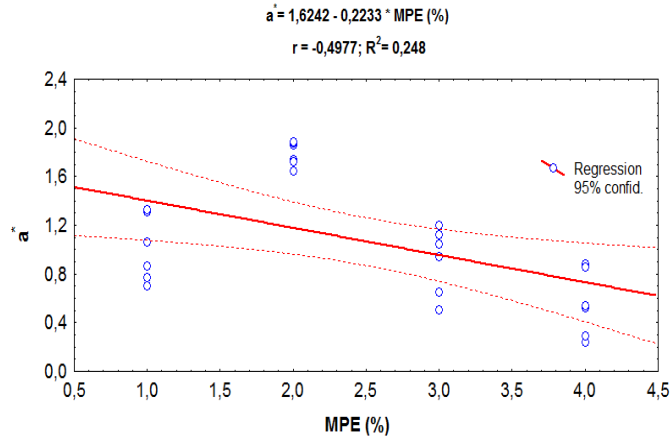
Şekil 17. L* değeri ile depolama süresi ve duysal renk arasındaki ilişkisi (Relationship between L* value, storage time and sensory color)

Puding örneklerinde %0.05 MPE içeren örneklerin depolama süresinde önemli bir farklılığa neden olmadığı görülmüştür. İlave edilen MPE düzeyinin a* değeri üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli (p<0.05) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 18).



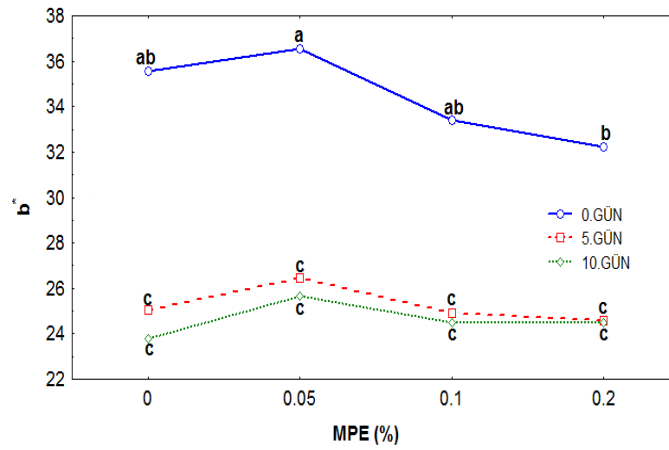
Şekil 18. a* değeri üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkisinin etkisi (farklı harflerle gösterilen değerler p<0.05 düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on a* value (values indicated with different letters differ from each other at p<0.05))

a*değeri ile düzey arasındaki korelasyon incelendiğinde, ilave edilen MPE düzeyi ile a*değeri arasında ters orantılı zayıf bir ilişki ($r = -0.498$) olduğu görülmektedir. İlave edilen düzeye bağlı olarak a*değerinde azalışın meydana geldiği görülmektedir (Şekil 19).



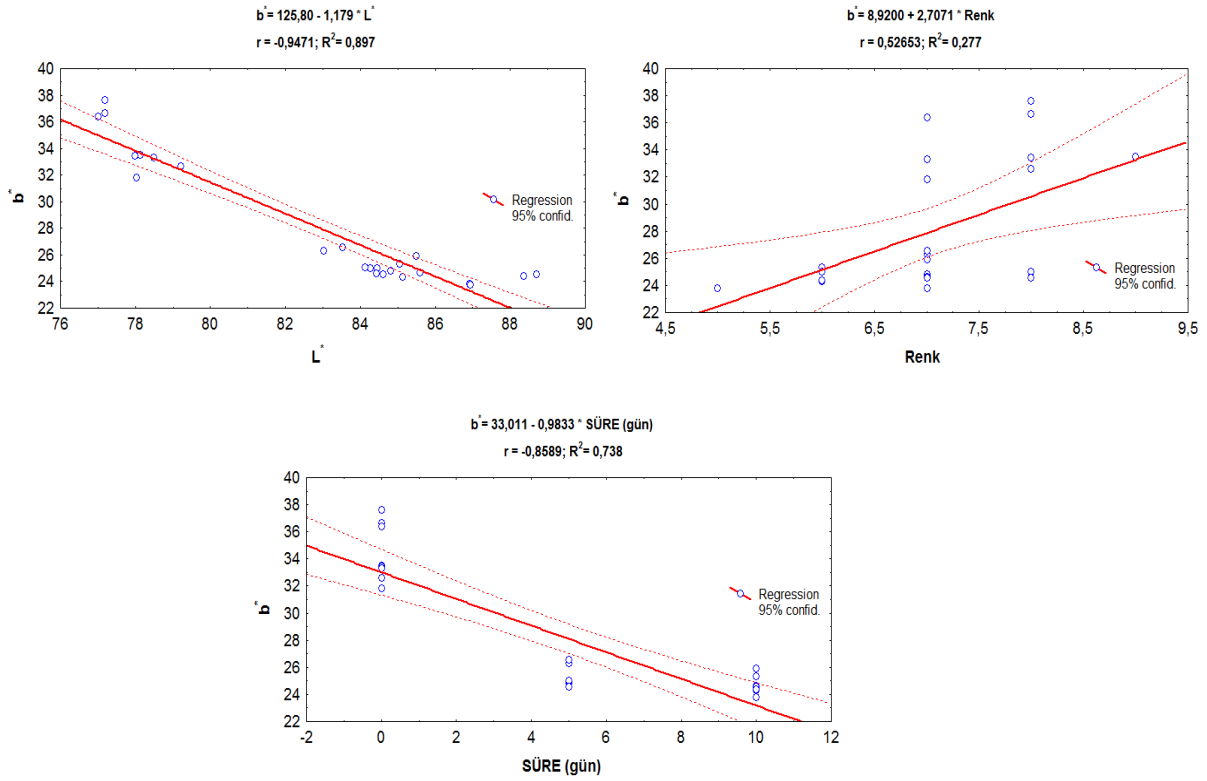
Şekil 19. a* değeri ile % MPE düzeyi arasındaki ilişkisi (Relationship between a* value and % MPE level)

Puding örneklerinde depolama süresi boyunca en düşük b* değerleri kontrol örneğinde gözlemlenmiştir. Depolamanın 5. ve 10. gününde ilave edilen MPE düzeyinin istatistiksel olarak farklılığa neden olmadığı görülmektedir (Şekil 20). Yapılan varyans analizi sonucunda ilave edilen MPE düzeyinin ve depolama süresinin b*değeri üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir ($p < 0.05$).



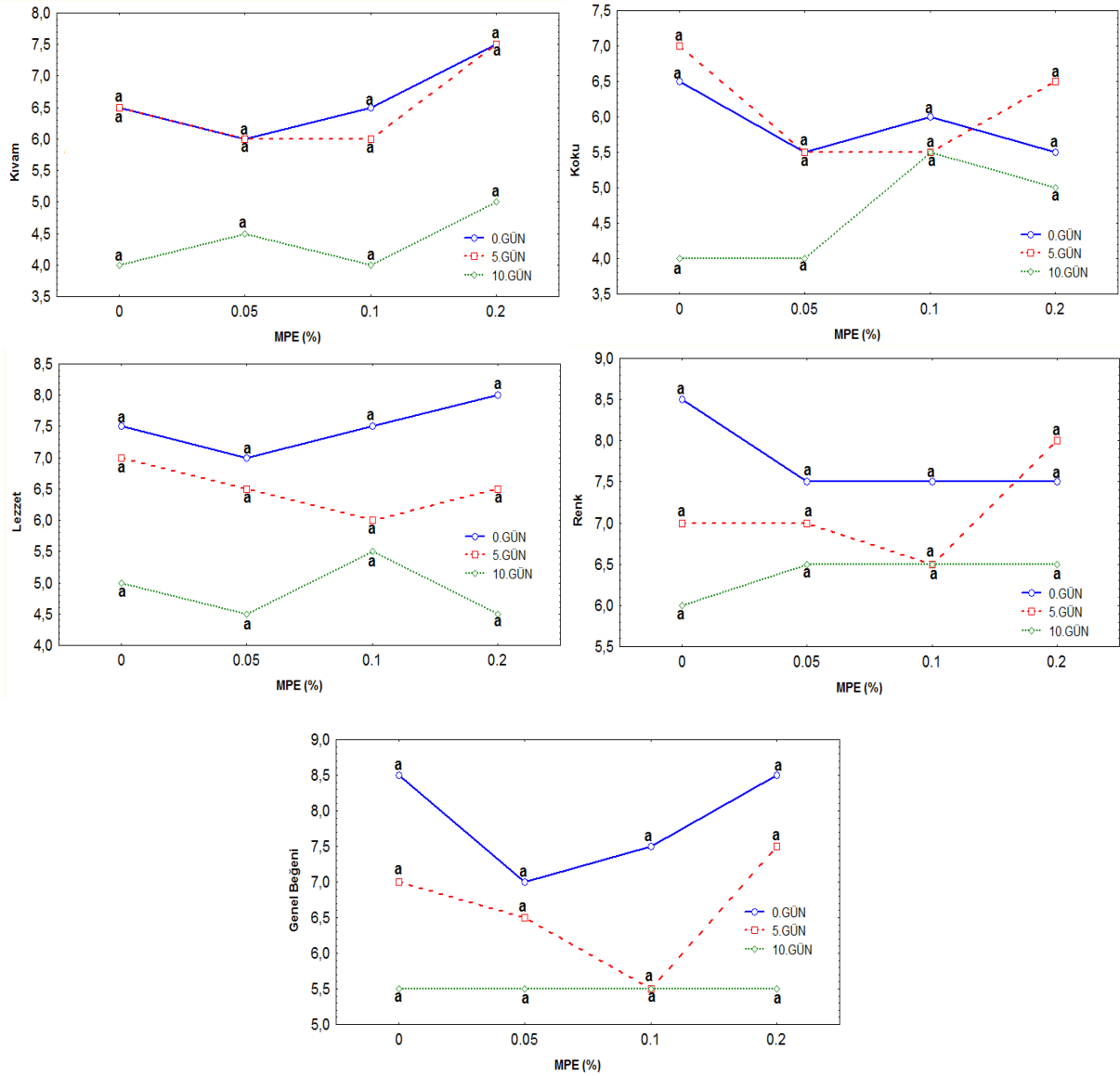
Şekil 20. b* değeri üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkisinin etkisi (Farklı harflerle gösterilen değerler $p < 0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on b* value (Values indicated with different letters are different from each other at $p < 0.05$))

b* değeri ile süre ve renk (duyusal) arasındaki korelasyon incelendiğinde, depolama süresi ile b* değeri arasında ters orantılı kuvvetli bir ilişki ($r = -0.859$) olduğu görülmektedir. Depolama süresine bağlı olarak b* değerinde azalış meydana gelmektedir (Şekil 21). b* değerinde meydana gelen artış duyusal değerlendirmede görsel olarak (renk) puding örneklerinde beğeniyi azaltmaktadır. Duyusal olan renk kriteri ile sarılık değeri b* arasında doğru orantılı kuvvetli bir ilişki ($r = 0.526$) vardır (Şekil 21). Aydınlik derecesinde meydana gelebilecek bir birimlik artışın ise b*değerinde 1.179 birimlik azalışa neden olacağı görülmektedir (Şekil 21).



Şekil 21. b^* değeri ile (a) L^* değeri, (b) duyuşal renk ve (c) süre arasındaki ilişki

Depolama süresinin 0., 5. ve 10. gününde yapılan duyuşal değerlendirmede örneklerinin genel beğeni değerlendirmesinde en düşük puanı depolamanın 10. gününde %0.05, %0.1 ve %0.2 MPE içeren puding örnekleri almıştır. Genel beğeni açısından en çok beğenilen puding örneği 0. günde kontrol örneği olmuştur. Rahim ve Ova (2016) safran ilave ederek ürettiği puding örneklerinde ilave edilen safran miktarı arttıkça duyuşal özelliklerden genel beğenin arttığını ifade etmişlerdir. Başka bir çalışmada farklı oranlarda maca tozu ve propolis kullanılarak üretilen yoğurtlarda en beğenilen sade yoğurt olurken sırası ile %5 maca tozu kullanılan ardından %0.05 propolis ilave edilen yoğurt örnekleri beğenilmiştir (Bilici, 2017). Yapılan varyans analizi sonucunda depolama süresinin duyuşal değerlendirme parametreleri üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir ($p < 0.05$). İlave edilen MPE düzeyinin duyuşal değerlendirme parametreleri üzerinde önemli bir farklılığa neden olmadığı görülmüştür (Şekil 22). Duyuşal değerlendirme ile diğer parametreler arasındaki korelasyon incelendiğinde, Şekil 17(b)'de görüldüğü gibi cihaz ile yapılan renk analizi (L^*) ve duyuşal olarak yapılan renk analizi arasında ters orantılı bir ilişki ($r = -0.550$) ve Şekil 21(b)'de görüldüğü gibi cihaz ile yapılan renk analizi (b^*) ve duyuşal olarak yapılan renk analizi arasında doğru orantılı bir ilişki ($r = 0.527$) olduğu görülmektedir. Viskozite ile duyuşal kıvam arasında ise doğru orantılı zayıf bir ilişki ($r = 0.488$) olduğu görülmektedir (Şekil 15).



Şekil 22. Duyusal değerlendirme (kıvam, koku, lezzet, renk, genel beğeni) üzerine MPE düzeyi x depolama süresinin etkileşiminin etkisi (farklı harflerle gösterilen değerler $p < 0.05$ düzeyinde birbirinden farklıdır) (The effect of the interaction of MPE level x storage time on the functional evaluation (consistency, odour, flavor, color, general taste) (values indicated with different letters differ from each other at the $p < 0.05$ level))

4.5 Mikroenkapsüle Propolis Ekstraktı (MPE) İlave Edilerek Üretilmiş Muz Aromalı Pudinglerin Mikrobiyolojik Özellikleri (Microbiological Properties of Microencapsulated Propolis Extract (MPE) Containing Banana Flavored Puddings)

Çalışmada Plate Count Agar'a yapılan ekim sonrasında depolama süresince (0. gün, 5. gün ve 10.günde) örneklerin hiçbirinde bakteri gelişimine rastlanmamıştır. Elde edilen bu sonuçtan, puding örneklerinin bakteriyolojik kalitesinin iyi olduğu, üretim sırasında ve sonrasında hijyene önem verildiği ve herhangi bir bulaşmanın olmadığı görülmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma sonucunda mikroenkapsüle propolis ekstraktının puding formülasyonuna dahil edilmesiyle tüketilebilir, fonksiyonel bir ürün elde edilmiştir. Doğal bir arı ürünü olan propolis, antimikrobiyal, antiviral, antifungal, antienflamatuar, antikanserijen, antioksidan vb. fonksiyonel özellikleriyle öne çıkmaktadır. Ülkemizde çeşitli fonksiyonel bileşenlerin farklı gıda ürünlerinin pek çok farklı özelliklerinin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalara ilaveten, gıdalarda kötü tat ve kokusu nedeniyle saf halde kullanımı sınırlı olan propolisin, enkapsülasyon teknolojisi kullanılarak bir taraftan biyoaktif bileşenleri korunurken, diğer taraftan kötü tat ve kokusu maskelenerek mikroenkapsüle halde puding türü sütlü tatlılarda kullanım potansiyelinin bulunduğu açığa çıkmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Ahn, M.R., Kumazawa, S., Usui, Y., Nakamura, J., Matsuka, M., Zhu, F., Nakayama, T., 2007. Antioxidant Activity And Constituents Of Propolis Collected In Various Areas Of China. *Food Chemistry*, 101(4), 1383-1392.
- Anon., 2014. TS EN ISO 7833-1: Mikroorganizmaların Sayımı İçin Yatay Yöntem. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anon., 1990. TS 7998: Toz Puding. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Apaydın, H., 2015. Propolisin Hazır Çorbalardan İzole Edilen *Staphylococcus Aureus* Üzerine İnhibisyon Etkisi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi. Tekirdağ.
- Bilici, C., 2017. *Lepidium meyenii* Tozu ve Propolis Ekstraktı İlave Edilerek Fonksiyonel Özellikleri Geliştirilmiş Yoğurt Üretilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi. İstanbul.
- Bostancı, E., 2017. Püskürtmeli Kurutucuda Enkapsüle Edilmiş Propolisin Sakız Üretiminde Kullanım Olasılığının Araştırılması. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Cumhuriyet Üniversitesi. Sivas.
- Burdock, G.A., 1998. Review Of The Biological Properties And Toxicity Of Bee Propolis (Propolis). *Food And Chemical Toxicology*, 36, 347-363.
- Cemeroğlu, B., 2013. Gıda Analizleri. Ankara. Bizim Grup Basımevi.
- Chen, C.N., Wu, C.L., Shy, H.S., Lin, J.K., 2003. Cytotoxic Prenylflavanones From Taiwanese Propolis. *Journal of Natural Products*, 66(4), 503-506.
- Çelik, G., 2016. Fonksiyonel Yeni Süt Ürünleri; Propolis Katkılı Yoğurt Ve Ayrın. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Tunceli Üniversitesi. Tunceli.
- Çıfci, F., 2015. Propolisin Yoğurt Üretiminde Kullanımı. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Samsun.
- Çubukçu, S., 2016. Erzurum Piyasasında Tüketime Sunulan Dondurmaların Mikrobiyolojik Kalitesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi. Erzurum.
- Derzazhamshir, M., 2017. Kazeinmakropeptid İçeren Puding Formülasyonunun Geliştirilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- Ergül, N., Karakaya, S., 2013. Fenilketonüri Hastaları İçin Maviyemiş (*Vaccinium Corymbosum L.*) İçeren Toz Puding Karışımı Üretimi. *Akademik Gıda*. 11(2). 28-36.
- Gökmen, S., Palamutoğlu, R., Sarıçoban, C., 2012. Gıda Endüstrisinde Enkapsülasyon Uygulamaları. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 36-50.
- Hacıbektaşoğlu, F., 2019. Kırmızı Pancarın Dondurma Üretiminde Kullanım İmkanları Üzerine Bir Araştırma. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Gümüşhane Üniversitesi. Gümüşhane.
- Işık, F., Urgancı, Ü., Turan, F., 2017. Yaban Mersini İlaveli Muffin Keklerin Bazı Kimyasal, Fiziksel Ve Duyusal Özellikleri. *Akademik Gıda*, 15(2), 130-138.
- Ivanova, E., Tenou, E., Poncelet, D., 2005. Encapsulation Of Water Sensitive Products: Effectiveness And Assessment Of Fluid Bed Dry Coating. *Journal Of Food Engineering*, 71, 223-230.
- Karakaş, S., 2012. Türk Propolisinin Ticari Bitkisel Yağlarda Çözünürlüğünün İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi. Trabzon.
- Karakaş, M. Ş., 2013. Prebiyotik Lif İçeren *Stevia* Özünü İlaresinin Çilek Aromalı *Acidophilus-Bifidus* Yoğurtlarının Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Harran Üniversitesi. Şanlıurfa.
- Karaoğlu, E., 2011. Lipofilik Maddelerin Aljinat Kitosan Membranlı Sıvı Çekirdekli Enkapsülasyonu. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- Koç, M., Sakin, M., Kaymak-Ertekin, F., 2010. Mikroenkapsülasyon Ve Gıda Teknolojisinde Kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 77-86.
- Koo, H., Gomes, B.P.F.A., Rosalen, P.L., Ambrosano, G.M.B., Park, Y.K., Cury, J.A., 2000. In Vitro Antimicrobial Activity Of Propolis And Arnica Montana Against Oral Pathogens. *Archives Of Oral Biology*, 45, 141-148.
- Laskar, R.A., Sk. I., Roy, N., Begum, N.A., 2010. Antioxidant Activity Of Indian Propolis And Its Chemical Constituents. *Food Chemistry*, 122, 233-237.
- Markham, K.R., Mitchell, K.A., Wilkins, A.L., Daldy, J.A., Lu, Y., 1996. HPLC And GC-MS Identification Of The Major Organic Constituents In New Zealand Propolis. *Phytochemistry*, 42, 205-211.
- Marquele, F.D., Stracieri, K.M., Fonseca, M.J.V., Freitas, L.A.P., 2006. Spray-Dried Propolis Extract. I: Physicochemical And Antioxidant Properties. *Pharmazie*, 61, 325-330.
- Messery, T. M., Said, M. M., Demircan, E., Özçelik, B., 2019. Microencapsulation Of Natural Polyphenolic Compounds Extracted From Apple Peel And Its Application In Yoghurt. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 18(1), 25-34.
- Mol, Z., 2016. Kırmızı Lahana (*Brassica oleracea L.*)'dan Ekstrakte Edilen Antosiyaninler İle Doğal Mavi Renk Maddesi Üretimi Ve Enkapsülasyon Tekniği İle Stabilitésinin Artırılması. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Samsun.
- Moreno, M.I.N., Isla, M.I., Cudmani, N.G., Vattuone, M.A., Sampietro, A.R., 1999. Screening Of Antibacterial Activity Of Amaicha Del Valle (Tucumán. Argentina) Propolis. *Journal Of Ethnopharmacology*, 68, 97-102.
- Nagaoka, T., Banskota, A. H., Tezuka, Y., Midorikawa, K., Matsushige, K., Kadota, S., 2003. Caffeic Acid Phenethyl Ester (CAPE) Analogues: Potent Nitric Oxide Inhibitors From The Netherlands Propolis. *Biological And Pharmaceutical Bulletin*, 26, 487-491.

- Nori, M.P., Favaro-Trindade, C.S., Alencar, S.M., Thomazini, M., Balieiro, J.C.C., Castillo, C.J.C. , 2011. Microencapsulation Of Propolis Extract By Complex Coacervation. *Food Science And Technology*, 44, 429-435.
- Okurkan, M., 2018. Karamuk (*Berberis crataegina*) Antosiyaninlerinin Enkapsülasyonu Ve Dondurma Üretiminde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Cumhuriyet Üniversitesi. Sivas.
- Popova, M. Silici, S., Kaftanoğlu, O., Bankova, V., 2005. Antibacterial Activity Of Turkish Propolis And Its Qualitative And Quantitative Chemical Composition. *Phytomedicine*, 12, 221-228.
- Rahim, S.C., Ova, G., 2016. İran Ve Türkiye Safranları Kullanılarak Yapılan Pudinglerde Dokusal Kalite Özelliklerindeki Değişimlerin Objektif Ve Subjektif Yöntemlerle İncelenmesi. *Akademik Gıda*, 14(4), 388-392.
- Sforcin, J.M., Fernandes, A.Jr., Lopes, C.A.M., Bankova, V., Funari, S.R.C., 2000. Seasonal Effect On Brazilian Propolis Antibacterial Activity. *Journal Of Ethnopharmacology*, 73(1-2), 243-249.
- Tokatlı, F., 2011. Geleneksel Olarak Üretilen Kış Yoğurdunun Fizikokimyasal, Mikrobiyolojik, Duyusal Özellikleri Üzerinde Depolamanın Etkisi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri.
- Yangı, B. , 2012. Propolis Ekstresinin Deneysel İnflamasyon Ve Antioksidan Sistem Üzerine Etkisi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. Eskişehir.
- Yavuz, C., 2011. Türkiye'nin Bazı İllerinden Toplanan Propolislerin Antimikrobiyal, Antioksidan Aktiviteleri Ve Biyoaktif Bileşenlerinin Tayini. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ordu Üniversitesi. Ordu.



PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A HELICAL CROSS-FLOW WATER TURBINE

Özer ÖĞÜÇLÜ*

Ege University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Energy, Izmir, Türkiye

Keywords

*Cross-Flow Water Turbine,
Performance Analysis,
Turbulence Model,
Optimization,
Cmsol.*

Abstract

In this study, a Computational Fluid Dynamics model is designed to investigate the performance analysis of a helical cross-flow water turbine by using Cmsol Multiphysics. In order to predict the main performance characteristics of turbine such as power output and torque, a numerical model is developed which is accurate, fast and quite simple to be used for a simulation. The flow field around turbine is solved with the Rotating Machinery feature in the Cmsol CFD Module using a $k-\omega$ turbulence model and a steady state formulation. The Navier-Stokes equations are used in the model which are arranged in a rotating frame in the inner domain and in fixed coordinates in the outer domain. The boundary between the inner and the outer domain is a continuity boundary condition that transfers momentum to the fluid in the inner domain. This model also uses the Frozen Rotor study type which speeds up the computation time. Then, to increase the performance of the cross-flow water turbine, a new angular velocity profile is explored with Cmsol Optimization Module. Thus, a variable speed turbine control method is developed. Compared to the constant velocity control method, new angular velocity control method yielded a 3% increase in the efficiency of turbine.

HELİSEL ÇAPRAZ AKIŞLI SU TÜRBİNİNİN PERFORMANS ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Anahtar Kelimeler

*Çapraz Akışlı Su Türbini,
Performans Analizi,
Türbülans Modeli,
Optimizasyon,
Cmsol.*

Öz

Bu çalışmada, bir helisel çapraz akışlı su türbininin performans analizini, Cmsol Multiphysics kullanılarak incelemek için bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modeli tasarlanmıştır. Bir helisel çapraz akışlı su türbininin güç çıkışı ve tork gibi ana performans özelliklerini tahmin etmek için, simülasyon için kullanılması doğru, hızlı ve oldukça basit olan sayısal bir model geliştirilmiştir. Türbin etrafındaki akış alanı, bir $k-\omega$ türbülans modeli ve kararlı durum formülasyonu kullanılarak Cmsol CFD Modülündeki Rotating Machinery özelliği ile çözülmüştür. Navier-Stokes denklemleri, iç alanda dönen bir çerçeve içinde ve dış alanda sabit koordinatlarda düzenlenen modelde kullanılmıştır. İç ve dış alan arasındaki sınır koşulu, momentumu iç bölgedeki akışkana aktaran bir süreklilik sınır koşuludur. Bu model ayrıca, bu çalışma için hesaplama süresini önemli ölçüde hızlandıran Frozen Rotor çalışma yöntemini kullanır. Ardından Cmsol Optimizasyon Modülü ile çapraz akışlı su türbininin performansını artırmak için yeni bir açısal hız profili araştırılmıştır. Böylece değişken hızlı bir türbin kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bu kontrol yönteminin performansı, sabit açısal hız kontrol yöntemi altında çalışan bir türbin ile karşılaştırılmıştır. Yeni açısal hız kontrol yöntemi türbin veriminde, sabit hız kontrol metodu ile karşılaştırıldığında, %3'lük bir artış sağlamıştır.

Alıntı / Cite

Öğüçlü, Ö., (2022). Performance Analysis and Optimization of a Helical Cross-Flow Water Turbine, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(2), 605-619.

* İlgili yazar / Corresponding author: ozeroguculu@hotmail.com, +90-232-311-1010

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|---|---|------------|
| Ö. Öğüçlü, 0000-0002-6293-7742 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 25.10.2020 |
| | Revizyon Tarihi / Revision Date | 21.02.2022 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 22.02.2022 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Introduction

Nowadays increasing demand for electrical energy is one of the most important issues in the world. In addition to the negative impact of greenhouse gases, the depletion of fossil fuel resources has recently increased the interest in renewable energies. Because of its huge potential, hydropower takes a particular place among these renewable energies. On the other hand, hydropower is considered as an enormous source of energy in the form of wave, tidal and marine current in the world where the water represents 70% of the earth's surface (Mehmood et al., 2012). Hydropower is derived from falling or fast running water energy, which can be harnessed for useful purposes. A lot of methods of harnessing energy from water are developed over the past decades (Khan et al., 2006). This arising kind of renewable energy which uses rivers and marine currents and shows also a good application possibility is considered as an unusual technology. The kinetic energy of water current is converted to mechanical energy in a device that rotates a generator to produce the electricity (Güney and Kaygusuz, 2010). Water resources are widely used in industry, agriculture, electricity generation as well as in people's daily lives. Since ancient times, hydropower from many water mills has been used as a renewable energy source for irrigation and operation of various mechanical devices such as grinding mills, saw mills, textile mills, tilt hammers, harbor cranes, home elevators and ore mills. As long as the power is an indispensable part of human life, the hydropower will be significant supplementary source of the power.

Hydropower offers an extensive amount of energy all over the world and exists in more than 100 countries, contributing roughly 15% of the global electricity production. In several other countries, hydropower accounts for over half of the electricity generation. Large hydropower plants are being built in Turkey that use a minor part of Turkey's hydroelectric potential. Turkey benefits from its mountainous landscape and position between three seas and it has a significant hydropower capacity estimated at approximately 433 TWh and it is thought that 140 TWh a year is thought economically viable (Sabuncu and Çolakoğlu, 2011). Hydrological data which allows projects feasibility is significant in order to efficient use of water resources. Hydrological data is presented to users by field observation, surveying and subsequent analyzes. In addition, not only the main purpose of the collected and presented data is hydrologic engineering projects but also scientific-based research plays an important role for efficient usage of water resources (Aksu and Korkmaz, 2019).

Flow is a fundamental concept of hydropower. Two main methods are used for obtaining energy from water flow. The classic method is to build a dam to constitute a static head. The other method is to extract energy from different water currents such as tides, oceans, rivers and irrigation channels (Khan et al., 2009). The river flow method extracts energy using a dam to make a head difference and then delivers water to turbines to generate electricity, while tidal flow devices extract energy directly from water streams. For generating power from tidal currents or river streams, kinetic energy has to be converted to mechanical energy by a hydropower generation device. A tidal current or river stream turbine is one of the most important and necessary part of a hydropower generation system. According to the relative position between turbine main shaft and incoming flow direction, these turbines can be classified as vertical axis turbines and horizontal axis turbines. The vertical axis turbines have the advantages of independence of flow direction, better flow direction adaptability, simple blade structure, thus low manufacture cost, low possibility of cavitation and less noise emission compared with the horizontal axis turbines (Ma et al., 2018). These vertical axis turbines are also called Axial Flow Turbines or Cross-Flow Turbines.

2. Literature Survey

The growing demand for energy due to growing population is one of the most important subjects nowadays. Beside increasing environmental effects, decreasing amount of fossil fuels make the renewable energy technologies vital to assure future energy sources and to solve environmental problems. The energy in the flows of river streams, tidal currents or other artificial water channels are considered as available source of one of the renewable energies. River Current Energy Conversion Systems (RCECS) seem convenient in harnessing energy from a stream of flowing river water to generate electricity. In order to formulate a basis for further analysis, Khan et al. (2006) discussed an extensive technology survey and comparison of various river current energy conversion systems and carried out simulations of simplified mathematical modelling of a RCECS device in Matlab. From a system engineering perspective, Khan et al. (2008) provided an overview of the technological advancements in the RCECS field and discussed various merits and prospects of this technology along with related challenges. Further Khan et al. (2009) outlined a review of the existing and upcoming hydrokinetic conversion systems and their fields of

applications starting with a set of basic definitions belong to this technology. They concluded the general trends in system design, duct augmentation and placement methods based on a comprehensive survey of various hydrokinetic systems reported to date. They also presented a detailed assessment of various horizontal and vertical axis turbine systems, along with their classifications and qualitative comparisons. Güney and Kaygusuz (2010) investigated hydrokinetic energy technologies and gave some detailed information about current base of these kinds of systems. In order to familiarize with the turbine and generator used in hydrokinetic energy technology systems, some knowledge was given and the selection information of a suitable turbine has been mentioned in their work. On the other hand, Mehmood et al. (2012) presented a comprehensive review of tidal current technologies to harness energy from ocean energy sources and discussed tidal energy technologies and tidal current turbines in detail. They reported the present status of ocean energy development and also today's popular tidal current technologies. Gorlov Helical Turbine is one of the Cross-Flow Turbines and developed from the Darrieus turbine. Gorlov Helical Turbine is designed with modifying its blades by Professor Alexander M. Gorlov of North-Eastern University (Gorlov, 2004). Numerous studies about the parameters which are affecting the performance of the cross-flow water turbines have been achieved. Niblick (2012) studied experimentally and analytically the helical cross-flow turbines, where the author explored the applicability of a micro scale tidal hydrokinetic generator and emphasized on turbine design and performance. Yang et al. (2013) designed and optimized a new hydrofoil for a helical turbine placed vertically to convert the water currents to energy. Polagye et al. (2013) presented the performance characteristics of a high solidity helical cross-flow turbine rotor for a tidal current generation at the micro scale. Their results suggest that turbine rotor of micropower system can reach efficiencies as high as 25% and can easily start itself at water velocities less than 0.5 m/s. Vallet et al. (2011) aimed to offer a vision of how a generation system based on cross-flow water turbines operating in a river stream should be controlled between two operating regimes in order to maintain its continuity of service. Cavagnaro et al. (2014) performed an adaptive control method related to a helical cross-flow turbine's characteristic performance curve and rotation rate to an optimal torque set point experimentally and also in a simulation. They compared the performance of adaptive control technique to the performance of constant speed and non-adaptive control. Their results demonstrated that important improvement over constant speed operation and small improvement over non-adaptive method in simulation. Strom et al. (2017) introduced a new alternative control method which doesn't require additional moving parts for turbine. They demonstrated experimentally that this method results in a 79% increase in turbine power output compared to standard control methods. This control strategy provides a structurally powerful turbine which operates at relatively low angular velocities to succeed high efficiencies and make possible a new generation of environmentally friendly turbines for wind and water current power generation.

3. Material and Method

3.1. Mathematical Model

This section presents how to develop a numerical model for cross-flow water turbines with the use of the Rotating Machinery feature in the CFD Module of Comsol Multiphysics. Nowadays the CFD models take place increasingly in hydrodynamic researches due to the quick development of computer technology. If the CFD method is used properly, it is a powerful tool. However it is computationally expensive, particularly when it is dealing with complex geometries such as cross-flow turbines. The Rotating Machinery physics interfaces are used in models that include moving rotating parts such as in mixers, compressors, stirred tanks, turbines and pumps. The Rotating Machinery Fluid Flow interface models and solves the flow using the Navier-Stokes equations in geometries including rotating parts such as turbines. The rotation is accomplished as the inner domain is prescribed to be a rotating domain (Comsol, 2018a).

In cases where it is possible to divide the model into rotationally fixed geometries, the predefined rotating machinery multiphysics couplings can be used. The first step is to divide the model geometry into two parts that are both rotationally fixed. The second step is to specify the parts as a rotating frame or a fixed frame. Then the predefined coupling automatically performs the coordinate transformation and the joining of the fixed and rotating parts (Comsol, 2018a). The boundary between the outer and the inner domain is defined as a continuity boundary that delivers momentum to the fluid in the inner domain. The Rotating Machinery physics interface expresses the Navier-Stokes equations in a rotating coordinate system whereas the parts which are not rotated are defined in the fixed material coordinate system. The rotating and fixed domains are coupled together by an identity pair where the boundary condition is applied as a flux continuity (Comsol, 2018a).

This study explains how to model a rotating machinery simulation with the frozen rotor approach for a cross-flow water turbine. The frozen rotor approach is a computationally efficient method. This approach can deliver a decent approximation of the flow fields at a minimal computation effort. Frozen rotor means that an impeller or rotor is frozen in position and the flow in the rotating domain is considered as stationary in terms of a rotating coordinate

system. The flow in each of both zones is solved using the moving reference frame equations. This approach can be described as freezing the motion of the moving part in a given position and then observing the resulting flow field with the rotor in that fixed position. The frozen rotor solution gives a general idea of the circulation pattern set up in the turbines and can produce good approximations of certain averaged flow quantities, such as the torque and power output (Comsol, 2018a).

The model presented in this study employs a Rotating Machinery, Turbulent Flow, $k-\omega$ simulation with the frozen rotor approach. Turbulence is modeled with the $k-\omega$ model instead the $k-\epsilon$ turbulence model. The $k-\omega$ turbulence model is a widely used model for turbomachinery simulations, with good performance for swirling flows and in the near-wall region. Although the $k-\omega$ model is better suited for these types of flows, it takes longer to converge than the $k-\epsilon$ model due to the strong nonlinearity in the turbulence coefficients (Comsol, 2018a).

For the improving of wind turbine blades, a great deal of airfoil types are designed in wind energy systems technology. Because of technical similarities between wind and water turbines, these airfoils can be used in water turbines. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) series airfoils are generally used to design the turbine blade geometry. In this study, due to its symmetrical structure, NACA 0018 airfoil profile which is very appropriate for small turbine design is used (Abbott et al., 1945). NACA four digit airfoil series specification is defined by four numbers which describe camber, position of maximum camber and thickness. The first number states the maximum camber in percentage of airfoil chord length. The second number shows the position of maximum camber in tenths of chord length. And the last two numbers express maximum thickness of airfoil in percentage of chord length. If the first two numbers of an airfoil of NACA four digit series are 00, it means that this airfoil is in symmetrical structure and has not a camber geometry (Airfoil Tools, 2020). Figure 1 shows a general NACA airfoil's profile geometry (Comsol, 2018a). In aeronautics, the chord is an imaginary straight line joining the leading edge and trailing edge of an airfoil. The chord length is the distance between the trailing edge and the point where the chord intersects the leading edge of an airfoil (Airfoil Tools, 2020).

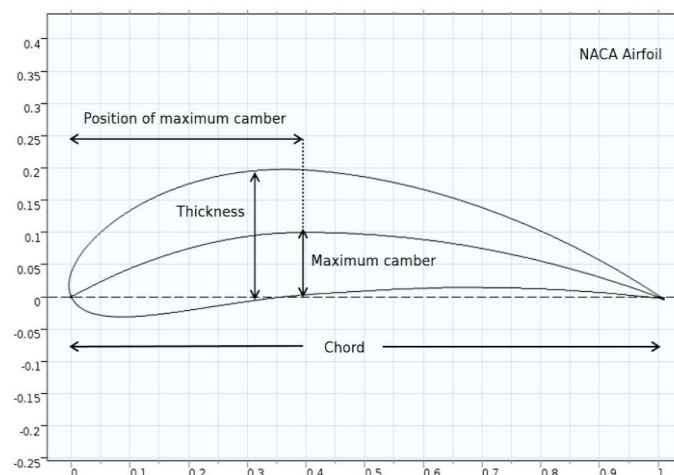


Figure 1. NACA Airfoil Profile Geometry

In this study, the numerical model is defined as a 3D CFD simulation and there are no shaft and arms in the model geometry. But there are only two circular plates at the end of turbine blades. The geometrical parameters of the cross-flow turbine design which are Radius (R), Height (H) and Chord Length (c) are given in Table 1.

Table 1. Cros-Flow Water Turbine Parameters

| PARAMETER | VALUE |
|------------------------------|-----------|
| Profile for Turbine Blades | NACA 0018 |
| Number of Blades | 3 |
| Turbine Radius | 150 mm |
| Turbine Height | 300 mm |
| Blade's Profile Chord Length | 50 mm |
| Helical Rise Angle | 60° |

The coordinate system used in the numerical model of this study is shown in Figure 2. The water flows in the positive direction of the X axis. The turbine rotation and the positive direction of the Z axis comply the right hand rule. Also the initial position of the cross-flow water turbine and the definition of blade position angle (θ) are both shown in Figure 2 (Ma et al., 2018).

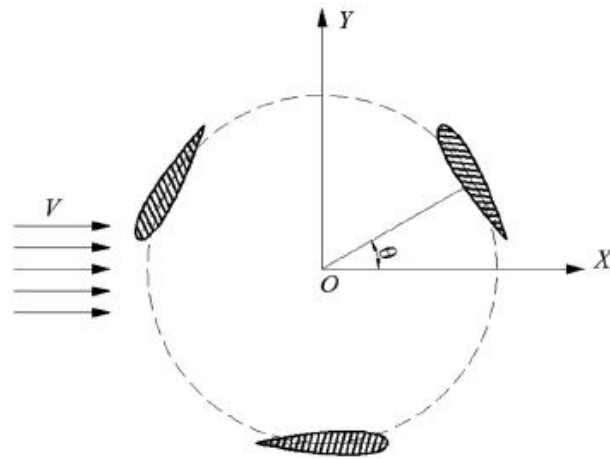


Figure 2. Coordinate System for Cross-Flow Water Turbine Model

To easily deal with the calculation results and to compare different model results, it is required to make each of performance parameters dimensionless. In this study, the dimensionless performance parameters are obtained as follows.

For any medium, the power available in the flow is defined as a measure of the kinetic energy passing per unit time and it is given by the following equation (Niblick, 2012),

$$P_f = \frac{1}{2} \rho A V^3 \tag{1}$$

where ρ is the density of the fluid, V is the free stream velocity, and A is the turbine’s swept area normal to the flow. For a cross-flow turbine; $A= 2RH$, where R is the radius and H is the height of the turbine respectively.

The blade position of the cross-flow turbine can be defined by its azimuthal angle (θ). As the turbine blades rotate, they meet a resultant velocity which is made up of the free flow velocity (V) and the tangential velocity; $V_\theta = \omega R$, where ω is the angular velocity and R is the radius of the cross-flow turbine. For a blade at any azimuthal position, the resultant velocity is expressed by the following V_R equation (Niblick, 2012),

$$V_R = \sqrt{(V + V_\theta \cos\theta)^2 + (V_\theta \sin\theta)^2} \tag{2}$$

A common set of dimensionless performance parameters are usually used for wind and hydrokinetic turbines. The tip speed ratio (TSR) represents the rotational speed of the turbine and it is described by the rate of rotation speed of the turbine blade at the blade tip relative to the free stream velocity. Then the tip speed ratio is defined as the ratio of the tangential velocity to the free stream velocity with using the below-given formulation (Ma et al., 2018),

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \tag{3}$$

where ω is the angular speed of the turbine and R is the turbine radius.

The angle of attack (α) can also be defined. The angle of attack is a measure of the angular distance between the resultant velocity and the chord line of the blade. The angle of attack is calculated by the following equation (Niblick, 2012),

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin\theta}{TSR + \cos\theta} \right) \tag{4}$$

The pressure differences and shear stresses along the blade wall cause the lift (L) and drag (D) forces on the hydrofoil of the blade. And the drag force is defined by the component in line with the relative velocity vector and the lift force is defined by the component in the perpendicular direction. These drag and lift forces on the blades together produce a torque about the cross-flow water turbine axis. This torque is made of the tangential components of the lift and drag forces on the blades multiplied by the turbine radius and it is given by the following expression (Ma et al., 2018),

$$T = R(L\sin\alpha - D\cos\alpha) \quad (5)$$

The coefficient of the torque (C_T) is calculated as the ratio of the torque produced by the turbine to the torque produced by the free stream flow if all of the kinetic force can be accumulated at the full radius. The coefficient of torque can also effectively describe the torque for a three dimensional blade and it is defined as the following equation (Niblick, 2012),

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V^2 AR} \quad (6)$$

The power received by the turbine is formulated as the following expression (Polagye et al., 2013),

$$P = T\omega \quad (7)$$

The power performance coefficient of a turbine (C_p) which is also called efficiency, is defined as the ratio of the shaft power output to the kinetic power output on a cross-sectional area at the same size as the turbine. The power coefficient of a turbine (C_p) is a measure of the efficiency of this power received from the total power available. And its relationship with the coefficient of torque (C_T) is given by the following equation (Ma et al., 2018),

$$C_p = \frac{P}{P_f} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AV^3} = TSR \cdot C_T \quad (8)$$

According to Equations (5) and (4) with Figure 2; the torque is the function of θ and the total torque value in one period is obtained by the integration of the torque function along the rotor blade surface by the following equation (Ma et al., 2018),

$$T = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} T(\theta) d\theta \quad (9)$$

where N is the number of blades. In Comsol Multiphysics, the integration operator “*intop*” is applied to the surface of the rotor blades, which is defined at the Definition section in Comsol. Furthermore, the notation “*spf*” is referred to the Rotating Machinery of CFD module and “*stressx*” and “*stressy*” are stresses in X and Y coordinate directions in Comsol Multiphysics. With the use of a numerical model, a torque value can be obtained easily.

Generally, lift and drag forces are defined as the forces acting on objects that are perpendicular and parallel to the flow direction, respectively. These forces are created due to the pressure and viscous forces acting on the surface of the hydrofoils. Based on the obtained total stress vector on the surface of the hydrofoils, drag and lift forces are obtained by integrating the total stress components along the surface of the hydrofoils. To exam the contribution of pressure and viscous flow to drag and lift forces, they can also be calculated separately. Integrating the total stress components “*spf.T_stressx*” and “*spf.T_stressy*” along the surface of the hydrofoils in Comsol Multiphysics, the drag force along the horizontal direction and the lift force along the vertical direction can be calculated (Ma et al., 2016).

In this study, the helical cross-flow water turbine, also known as the Gorlov turbine, with three blades is investigated. The dimensions of the turbine such as Height; H=0.30 m and Radius; R=0.15 m are chosen as shown in Table 1, because they are convenient for a small scale cross-flow water turbine. The NACA 0018 hydrofoil profile coordinates required for the three dimensional blade drawing are taken from Airfoil Coordinates Database which contains approximately 1600 aircraft airfoil coordinates (Airfoil Tools, 2020).

In the first step, hydrofoil profile is drawn in Comsol Multiphysics using the NACA 0018 hydrofoil profile coordinates. Figure 3 shows the NACA 0018 hydrofoil profile drawing in design software. NACA0018 hydrofoil has

maximum thickness 18% at 30% chord length and maximum camber 0% at 0% chord length (Abbott et al., 1945). In this study, the chord length (c) is chosen as 0.05 m as shown in Table 1.

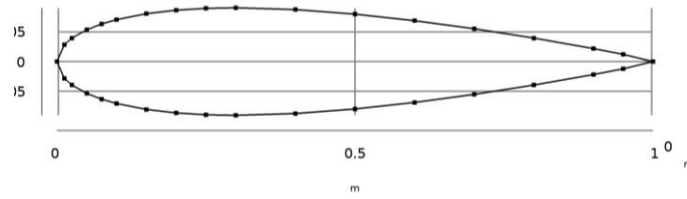


Figure 3. Blade Hydrofoil Drawing

Then the turbine blades are drawn with the helical curve at Height (H) and Radius (R) which coordinates are calculated by the following geometric correlation formulas (Gorlov, 1998)

$$\begin{aligned} x &= R \cos \varphi \\ y &= R \sin \varphi \\ z &= R \varphi \tan \delta \end{aligned} \quad (10)$$

where φ is the helical rotation angle and δ is the helical rise angle. Using these geometric correlation formulas in Microsoft Excel or LibreOffice Calc, we can multiply the coordinates of the hydrofoil profile to form the three-dimensional turbine blade drawing. By using these coordinates, the helical curve can be plot in Comsol. This plotting process is shown in Figure 4.

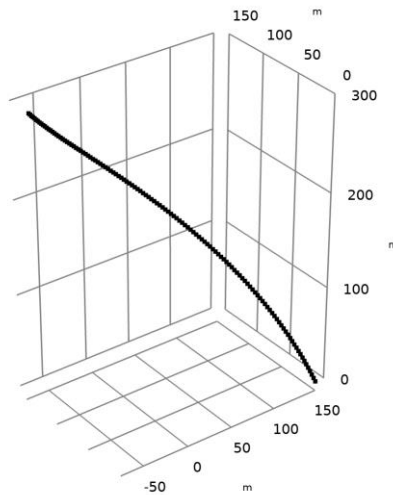


Figure 4. Blade Helix Curve Drawing

Two solid bottom and upper cylindrical blade connection elements are drawn and our solid model is completed (Özekes, 2019). Figure 5 shows the final version of the cross-flow water turbine design.

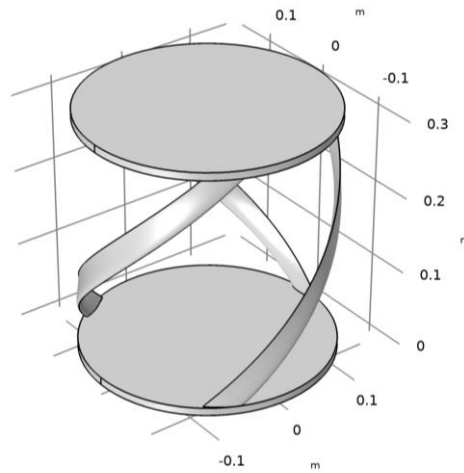


Figure 5. Design of Cross-Flow Water Turbine

The length of the control volume along the free-stream direction is equal to $32R$, while its width in the Y and Z direction is $12R$ as shown in Figure 6. The fluid in the control volume is chosen as water in Comsol.

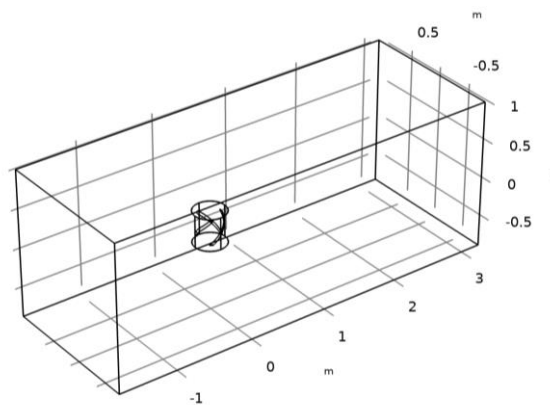


Figure 6. Control Volume of Cross-Flow Water Turbine Model

The lateral, upper and lower walls of the control volume and the surface of the turbine blades are determined as the wall boundary condition. At the same time, the left and right walls of the control volume are set as the inlet and outlet where the water flows evenly along the horizontal direction. At the control volume's fixed walls, no slip boundary conditions are applied. The boundary condition on the rotating turbine blades are set to rotate with the same velocity as the counter clockwise rotation condition. The boundary condition is defined as a velocity on the inlet surface; the inflow velocity is only directed along the X axis and equals V m/s. The outlet surface is set as a pressure outlet.

Before performing a simulation analysis, the model geometry is divided into nodes and elements in the meshing process. The mesh is configured to be tightest around the turbine blades, in order to resolve the flow in the inner domain of the model. In this study, mesh independency is conducted to assure that the number of the mesh is adequate for estimating the maximum velocity around blades for water flow velocity $V = 0.8$ m/s and $TSR=1.5$. Five different numbers of the mesh is generated for the model as shown in Figure 7. The number of domain elements is varied from 170.2 thousands to 5.2 millions.

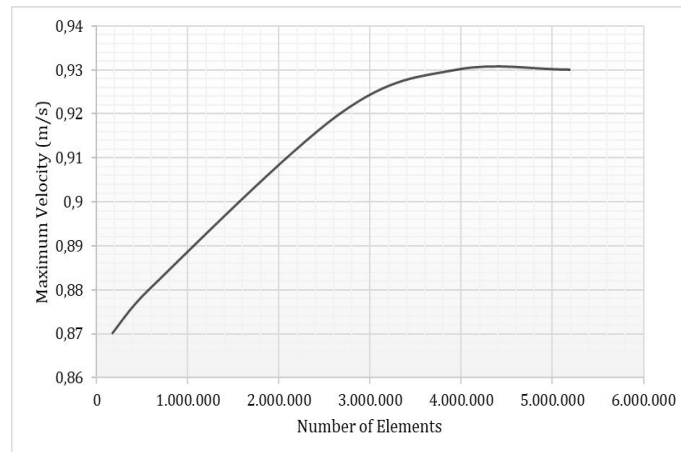


Figure 7. Mesh Independence of Cross-Flow Water Turbine Model

Thus, the final model meshing is shown in Figure 8. The mesh used to discretize the fluid domain and the turbine blade is characterized by tetrahedral elements. The maximum element size for the entire domain is set to 0.0837 m, whereas the minimum element size is 0.01302 m. Because the mesh is configured to be tightest around the blades, the high concentrated mesh distribution is applied close to the blades surface. The maximum element size for the blades surface is set to 0.03536 m, whereas the minimum element size is 0.0018228 m.

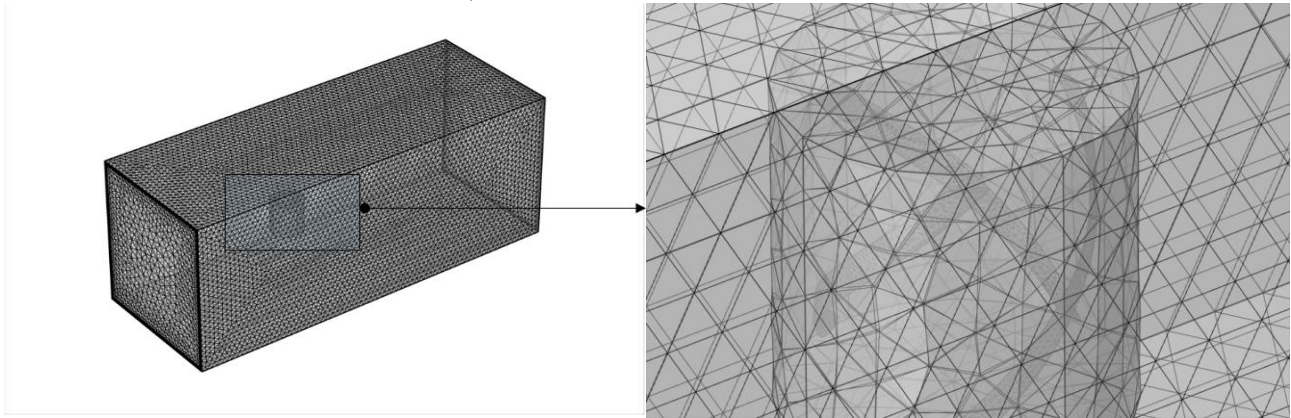


Figure 8. Meshing of Control Volume (left) and Cross-Flow Turbine Model (right)

Then the frozen rotor solution is performed. Figure 9 shows the fluid velocity magnitude around the blades of the turbine for inlet velocity $V=0.8$ m/s and $TSR=1.5$. The maximum velocity is about 0.93 m/s.

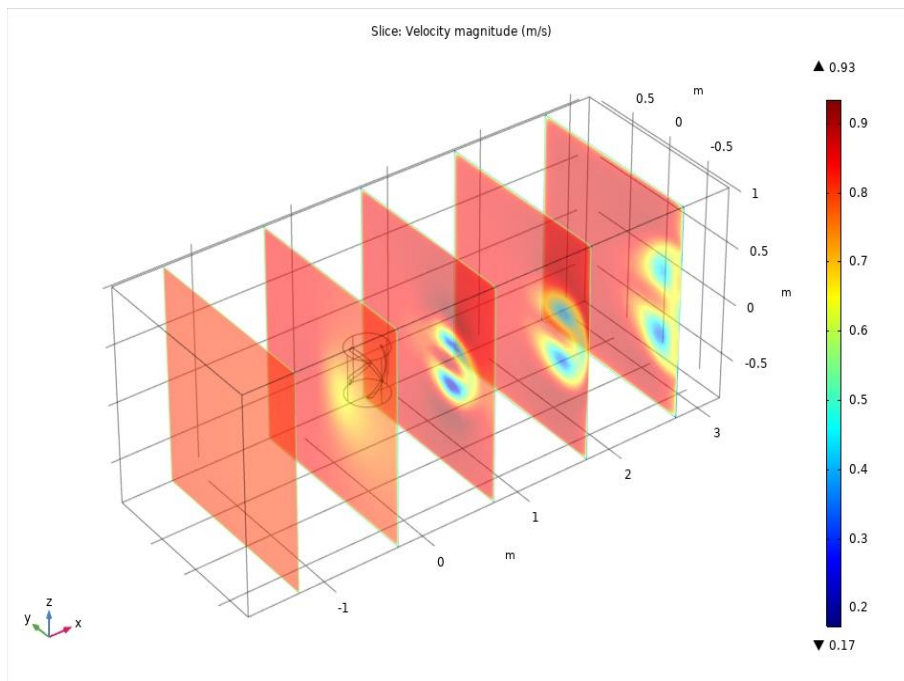


Figure 9. Velocity Magnitude Around Blades of Cross-Flow Water Turbine

Figure 10 presents fluid pressure around blades due to the surrounding water flow for inlet velocity $V=0.8$ m/s and $TSR=1.5$.

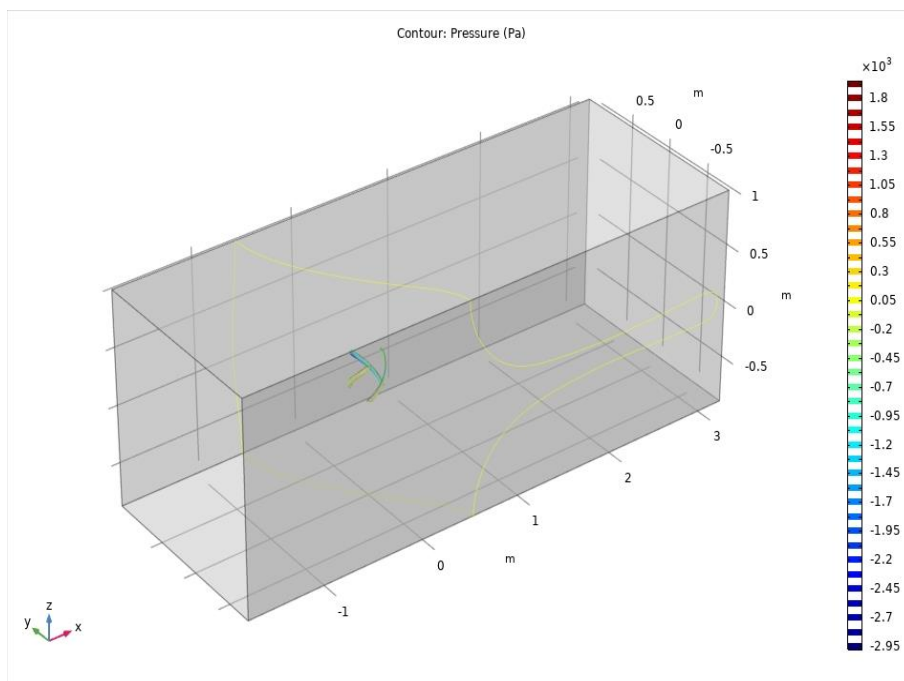


Figure 10. Fluid Pressure Around Blades of Cross-Flow Water Turbine

At last the performance parameters of the cross-flow water turbine can be calculated with Equations (6), (7), (8) and (9) which are given as above.

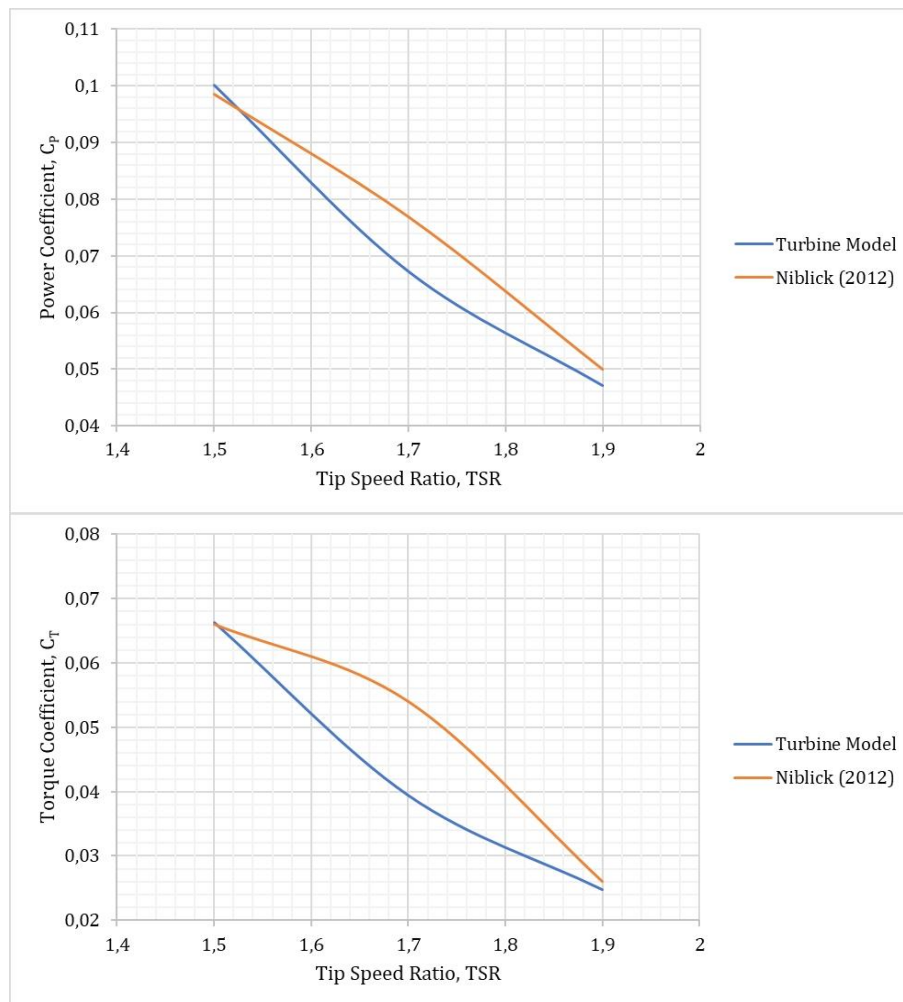


Figure 11. Comparison of C_p and C_t predictions of Presented Model and Experimental Results from Niblick (2012)

3.2. Validation of Turbine Model

In order to validate the numerical turbine model, a vertical axis three-bladed helical cross-flow water turbine is simulated with the same geometrical dimensions and flow conditions as in the experiments of Niblick (2012) at a single flow speed, $V=0.8$ m/s. The model results illustrate that the simulations agree well with the experimental results as shown in Figure 11. The simulations overestimate the torque coefficient (C_t) by about a difference of 0.0003 at $TSR=1.5$, while it is underestimated about a difference of 0.0146 at $TSR=1.7$ and about a difference of 0.0012 at $TSR=1.9$. The simulations overestimate the power coefficient (C_p) by about a difference of 0.0017 at $TSR=1.5$, while it is underestimated about a difference of 0.0096 at $TSR=1.7$ and about a difference of 0.0028 at $TSR=1.9$. The model presented in this study can be used in numerical analyses of any helical cross-flow water turbines which have similar configurations in different water flow conditions as long as the model meshing remains reasonably fine.

4. Optimization of Turbine Control Method

4.1. Optimization

In order to improve a design so that it minimizes energy consumption or maximizes the output in an engineering problem, the Comsol Multiphysics Optimization Module general interface is used to compute optimal solutions. In an optimization process, any engineering model inputs such as geometric dimensions and part shapes or material properties and material distribution can be used as design variables, and any model output can be used as objective function. The optimization process generally finds the best performance values of control variables or design variables of a model which are quantified by means of an objective function (Comsol, 2018b).

For Comsol Multiphysics optimization, the forward model containing the geometry and the physics is composed in the first step. Then the parameters in the Global Definitions are defined, or the control variables to an

Optimization interface are added. The forward model solves properly for some reasonable values of the control variables before proceeding with defining the objective function and constraints, and then finally the optimization problem is solved (Comsol, 2018b). After a Comsol Multiphysics model which include a physical design have been solved, an objective function is commonly attributed to it as a figure of merit. This objective function can quantify all the performance parameters of the system. This objective function changes when some parameters or control variables are varied. These parameters or variables can control any part of the design such as dimensions, boundary conditions, loads, material distribution, material properties and so forth. The control variables often have a set of bounds and design constraints associated with them. For example, dimensions must be within some limits, geometric features must not come to close to each other, only certain materials are possible, and so on.

When optimizing a system modelled as a Multiphysics model, there may also be performance constraints present, which depend on the model solution. In general, an optimization problem is when you want to improve the objective function by varying the control variables within some set of constraints (Comsol, 2018b). In this study, the objective function is chosen as C_P equation which is given by Equation (8) above. Then the optimization problem becomes the maximization of C_P . The control variable is chosen as the angular speed of the turbine (ω) with lower bound of 10 rpm and upper bound of 100 rpm. The optimization problem formulation is given as below (Comsol, 2018b),

$$\begin{aligned} \max_{\omega} \{C_P(\omega)\} \\ 10rpm \leq \omega \leq 100rpm \end{aligned} \tag{11}$$

4.2. Turbine Control Methods

For a modelled system, optimizing process of the system performance for effective control and operation requires critical attention. While the cross-flow turbine is in the running mode, the control objective is to maximize the energy received from water flow (Khan et al., 2008). As shown in Figure 12, the tests made in the field for Water Flow Velocity = 0.8 m/s, point out that maximum C_P appears over a narrow range of TSR which changes with V (Niblick, 2012). The power coefficient of a turbine sharply decreases for small disturbances around optimal TSR. This situation requires a control algorithm to operate the cross-flow water turbine at or near optimal condition in order to supply the need of generation requirements. This control algorithms also can help to reduce turbine structural loads and provide the improvement of the turbine survivability (Polagye et al., 2013).

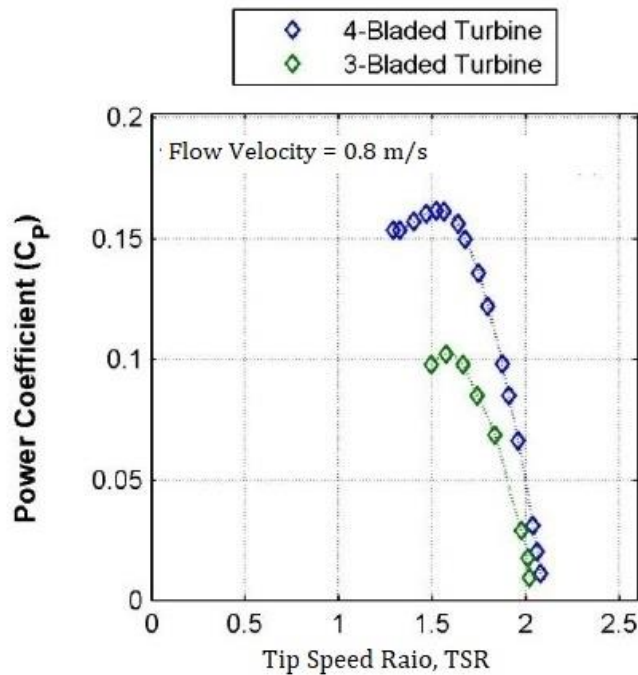


Figure 12. The Power Coefficient C_P Predictions of Experimental Results from Niblick (2012)

Because of technical similarities between wind and water turbines, wind turbine control strategies can be used in water turbines (Cavagnaro et al., 2014). Now with the developments made so far, adequate technical information is available in the wind energy engineering systems. The stall and pitch control which are two general control

methods used in wind turbines, can be investigated to understand the effectiveness of a water turbine system control (Khan et al., 2008). As mechanically varying blade pitch control is an applicable method for horizontal axis or straight bladed cross-flow turbines, helical cross-flow turbines can be controlled by changing the certain load on the generator to adjust either rotor torque or rotational rate. Maximum Power Point Tracking (MPPT) control methods, well known in wind turbine applications and under research for water turbines, rely on a well defined performance curve and allows the controller to track the maximum power point as a function of rotation rate or power output (Polagye et al., 2013). Thus common control approaches of cross-flow water turbines involve the strategy of MPPT which is a feedback control method and it is targeting operation at a single optimal point based on a turbine's typical performance curve while benefiting measurements of rotation rate, power generation and inflow velocity (Cavagnaro et al., 2014). When the generator coupled the turbine is in a grid-connected operation, the system must provide the levels of active and reactive power demanded by the grid. If it is operating in stand-alone mode, the system must provide the demanded power by the load and supply the requested output voltage amplitude and frequency. Because the cross-flow turbine systems benefit from a continuous and relatively slow variable resource, they are suitable for assuring this method. The rotational speed control in MPPT is preferred to the torque control because it can assure steady operation of cross-flow turbines at a low speed which is advised for reasons related to the mechanical structure and the over speed regime which must be avoided (Vallet et al., 2011).

5. Result and Discussion

In this study, the turbine rotation rate as a function of blade position is optimized and it is demonstrated that this approach results in a 3% increase in the power output compared to industry standard control methods. The turbine rotation rate as a function of azimuthal blade position method is applied without improving the mechanical complexity of the cross-flow turbine (Strom et al., 2017). In this study, a new angular velocity profile is explored to increase the performance of the cross-flow water turbine. Then the performance of this control method is compared to a turbine operating under the standard control method of constant angular velocity control as shown in Figure 13. The new angular velocity control method produced a little increase in the turbine efficiency. Compared to the constant velocity control case, the new angular velocity control method yielded a 3% increase in the efficiency for water inlet velocity $V=0.8$ m/s.

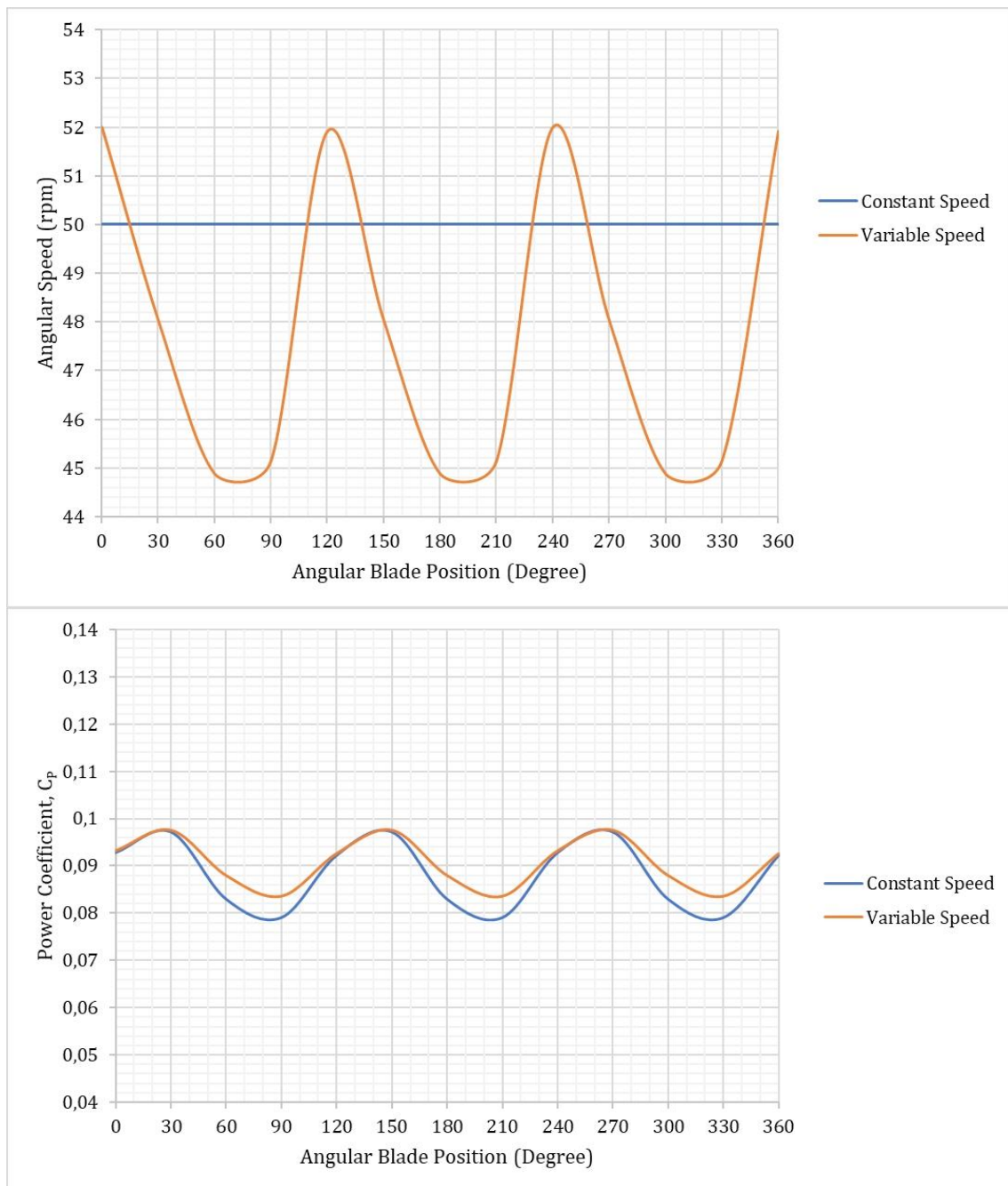


Figure 13. Comparison of C_p Predictions of Constant and Variable Speed Control Results

The model developed in this study can be used to calculate the main performance characteristics of a cross-flow turbine such as the coefficient of torque and the power performance coefficient of the turbine under different loading conditions. The model can also be used to decide and to optimize the control method of the turbine for different water flow velocities. In the future works, the cross-flow turbine design parameters such as turbine height and diameter, blade chord length, and number of blades can be changed and this model can be used easily.

Nomenclature

| | |
|-------|--|
| A | = turbine's swept area |
| c | = turbine blade's profile chord length |
| C_T | = torque coefficient |
| C_p | = power coefficient |
| D | = drag force |
| H | = turbine height |
| N | = number of blades |
| L | = lift force |

| | |
|------------|---|
| P | = power |
| P_f | = power available in flow |
| R | = turbine radius |
| T | = torque |
| V | = flow velocity |
| V_R | = resultant velocity |
| V_θ | = tangential velocity |
| x | = coordinate along X axes |
| y | = coordinate along Y axes |
| z | = coordinate along Z axes |
| θ | = blade position angle |
| α | = angle of attack |
| ρ | = density of fluid |
| ω | = angular velocity |
| φ | = helical rotation angle |
| δ | = helical rise angle |
| CFD | = computational fluid dynamics |
| MPPT | = maximum power point tracking |
| NACA | = national advisory committee for aeronautics |
| RCECS | = river current energy conversion systems |
| TSR | = tip speed ratio |

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Abbott, I.H., Von Doenhoff, A.E., Stivers, L.S., Jr., 1945. Summary of Airfoil Data. NACA Report No.824.
- Airfoil Tools, 2020. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.
- Aksu, H., Korkmaz, M.S., 2019. Türkiye’de Hidrolojik Veri Yönetimi ve Üniversitelerin Katılımı ABD Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(3), 699-704.
- Cavagnaro, B.J., Fabien, B. and Polagye B.L., 2014. Control of A Helical Cross-Flow Current Turbine. Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium, 1–8.
- Comsol Multiphysics, CFD Module Users Guide, 2018.
- Comsol Multiphysics, Optimization Module Users Guide, 2018.
- Güney, M.S., Kaygusuz, K., 2010. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), 2996–3004.
- Gorlov, A.M., 1998. Development of the helical reaction hydraulic turbine. Final Technical Report.
- Gorlov, A.M., 2004. Harnessing power from ocean currents and tides – The helical turbine: Design, characteristics and applications in free flows without dams. Sea Technology, 45(7), 40–43.
- Khan, M.J., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2006. A technology review and simulation based performance analysis of river current turbine systems. Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2288–2293.
- Khan, M.J., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2008. River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2177–2193.
- Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal application: a technology status review. Applied Energy, 86, 1823–1835.
- Ma, J., Koutsougeras, C., Hao Luo, H., 2016. Efficiency of a Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with Airfoil Pitch Control. Proceedings of Comsol Conference in Boston.
- Ma, Y., Hu, C., Li, Y., Li, L., Deng, R., Jiang, D., 2018. Hydrodynamic Performance Analysis of the Vertical Axis Twin-Rotor Tidal Current Turbine. Water, 10(11):1964, 1–21.
- Niblick, A.L., 2012. Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micro power Generation System. MSc. Thesis, University of Washington.
- Polagye, B.L., Cavagnaro, B.J., Niblick, A.L., 2013. Micropower From Tidal Turbines. Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 1–11.
- Özekes, A., 2019. Helisel Dikey Eksen Bir Rüzgar Türbininin Belirli Tasarım Kriterleri Altında Performansının İncelenmesi. MSc Thesis, Manisa Celal Bayar Üniversitesi.
- Sabancı, F., Çolakoğlu, M., 2011. Turkey’s Renewable Energy Sector from a Global Perspective. PwC Turkey Report.
- Strom, B., Brunton, S., Polagye, B., 2017. Intracycle Angular Velocity Control of Cross-Flow Turbines. Nature Energy. 2(17103).
- Vallet, M.A., Bacha, S., Munteanu, I., Bratcu, A.I., Roye, D., 2011. Management and Control of Operating Regimes of Cross-Flow Water Turbines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58 (5), 1866–1876.
- Yang, B.N., Shu, X.W., 2012. Hydrofoil optimization and experimental validation in helical vertical axis turbine for power generation from marine current. Journal of Ocean Engineering, 42, 35–46.



MODELING OF SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OF TI-6AL-4V ALLOY USING REGRESSION ANALYSIS

I. Burcu TOPRAK^{1*}, Oğuz ÇOLAK², Mustafa BAYHAN³

¹Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Control and Automation, Antalya, Türkiye

²Eskişehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Eskişehir, Türkiye

³Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Türkiye

Keywords

Ti-6Al-4V,
Surface Roughness,
Regression Analysis,
Milling.

Abstract

In this study, Ti-6Al-4V was machined under high pressure cooling conditions. Cutting parameters which were assumed as independent variables are consist of 4 different levels of cutting speed (V_c : 50-70-90-110 m/min), feed rate (f : 0.05-0.1-0.15-0.2 mm/rev) and cutting fluid pressure (P : 6-100-200-300 bar). By using SPSS 20 software, regression equations of surface roughness relative to cutting parameters was obtained as linear, second degree and linear logarithmic. Second degree multiple regression model showed best results of estimation. In the model, 95 percent of the surface roughness alterations can be explained by independent variables. Correlation between experimental data and the model was calculated as 0.975. As a result, second degree regression model proved to be successful in predicting surface roughness. The result of the study confirms the literature. When models are compared the most important parameter that affects surface roughness was observed as the feed rate. The results of the study confirms the literature.

Tİ-6AL-4V ALAŞIMININ FREZELENMESİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN REGRESYON ANALİZİ İLE MODELLENMESİ

Anahtar Kelimeler

Ti-6Al-4V,
Yüzey Pürüzlülüğü,
Regresyon Analizi,
Frezeleme.

Öz

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V yüksek basınçlı soğutma şartlarında frezelenmiştir. Bağımsız değişken olarak kabul edilen kesme parametreleri; 4 farklı seviyedeki, kesme hızı (V_c : 50-70-90-110 m/dk), ilerleme oranı (f : 0.05-0.1-0.15-0.2 mm/diş) ve soğutma sıvısı basıncından (P : 6-100-200-300 bar) oluşmaktadır. SPSS 20 programı kullanılarak, yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerine bağlı lineer, ikinci dereceden ve lineer logaritmik regresyon denklemleri elde edilmiştir. En iyi tahmin sonucunu ikinci dereceden çoklu regresyon modeli vermiştir. Modelde, yüzey pürüzlülüğündeki değişimin %95' i bağımsız değişkenler tarafından açıklanabilmektedir. Deney verileri ve model arasındaki korelasyon 0,975 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, ikinci derece regresyon modelinin yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmede başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Modeller incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrenin, ilerleme oranı olduğu gözlenmiştir. Çalışmanın sonuçları literatürü doğrulamaktadır.

Alıntı / Cite

Toprak, I.B., Çolak, O., Bayhan, M., (2022). Modeling of Surface Roughness in Milling of Ti-6Al-4V Alloy Using Regression Analysis, Journal of Engineering Sciences and Design,10(2), 620-630.

* İlgili yazar / Corresponding author: mailto:ibmutlu@akdeniz.edu.tr, +90-242-310-6741

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|---|---|------------|
| I.B. Toprak, 0000-0002-0894-5574 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 01.03.2021 |
| O. Çolak, 0000-0002-1777-9300 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 11.02.2022 |
| M. Bayhan, 0000-0001-5793-5390 | Kabul Tarihi / Accepted Date | 21.02.2022 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Introduction

In metal cutting, it is important to determine the optimum machining parameters for efficient use of machine tools and marketing products with maximum quality. Quality is being evaluated as roughness, precision and geometrical accuracy (Nas et al., 2012). A bad surface quality affects the mechanical properties of the processed workpiece such as sliding, lubrication, corrosion resistance, fatigue and fracture (Kaya, 2009). In metal cutting, there are machining parameters that affect surface finish quality. Cutting speed, depth of cut and feed rate parameters are controllable parameters. Some techniques are used for increasing the quality of the product with controllable parameters and estimating the surface roughness before milling (Meral et al., 2011). One of these techniques is regression analysis.

Meral et al. (2011) showed second order regression model as the most suitable method to be used in modeling surface roughness and feed force depending on experimental parameters such as drill bit type (coated-uncoated), drill bit diameter, feed rate and cutting speed. Çaydas and Haşçalık (2008) have used artificial neural networks and regression method for estimating surface roughness in the processing of aluminum 7075 alloys with water jet cutting. Processing speed, water jet pressure, standoff distance, corrodent particle size, and corrodent flow speed were taken into account as model variables in developing prediction models. Ranganathan et al. (2009) have developed a mathematical model in turning AISI 316 stainless steel. Cutting parameters such as feed rate, cutting speed and depth of cut were taken into account in the study where regression analysis and theory of ANOVA were used for prediction of surface roughness and tool wear. Chavoshi and Tajdari (2010) used artificial neural network and regression method for modeling surface roughness that is formed in the process of turning AISI 4140 steel with CBN tool. Hardness and cutting speed were chosen as entry parameters. Mavi and Korkut (2010) have investigated experimental machinability of vermicular lead molten irons having three different microstructure. They have made mathematical modeling with multiple regression analysis by determining the parameters affecting cutting forces and surface roughness. Ay and Turhan (2010) analyzed the surface quality in process of turning aluminum workpiece. They have modeled the relationship between a dependent (cutting force, surface roughness and vibration) and independent (workpiece size, workpiece diameter, depth of cut and feed rate) variables mathematically by regression analysis method. Taşdemir (2011) aimed the prediction for surface roughness (Ra) by using tool tip radius, tool rake angle and cutting angle parameters as input in the turning process. For this purpose, the regression model and Artificial Neural Network (ANN) were compared by using separately. Asiltürk and Çunkaş (2011) measured surface roughness in turning AISI 1040 steel processes for different cutting parameters. They have built surface roughness models depending on the feed rate, speed, and depth of cut, by using artificial neural networks and multiple regression approach. ANN model predicted the surface roughness at the highest correctness when compared with the regression model by statistical methods. Vikram and Ratnam (2012) have examined EN8 steel for the effect of feed rate, cutting speed and material hardness, on surface roughness in turning aluminum and copper alloys machining. Regression model for predicting surface roughness was developed by using MINITAB software. Asiltürk et al. (2012) subjected AISI 4140 tempered steel of 51 HRC to hard turning at dry cutting conditions. They have built mathematical surface roughness models by using first order, second order and logarithmic multiple regressions depending on cutting speed, feed rate, depth of cut, vibration signal measured online at machine tool holder and acoustic emission. Simunovic et al. (2013) analyzed the effect of cutting parameters on surface roughness, in the milling of aluminum alloy. They have developed a regression model for prediction of surface roughness. Hanief and Wani (2016) have investigated the influence of cutting parameters on the surface roughness by using ANOVA. They have developed ANN and regression models for the prediction of surface roughness in turning red brass. Lin et al. (2020) presented surface roughness modeling for machined parts based on cutting parameters and machining vibration in the end milling process. The prediction models were developed using ANN modeling approach and multiple regression analysis. Akkuş (2021) aimed to create and compare different estimation models for surface roughness values resulting from turning. Ra values were determined according to the experimental design created for this purpose. These values are modeled with Taguchi, multiple regression model, artificial neural network and fuzzy logic.

Ti-6Al-4V material is known as an alloy that is hard for machinability. It is used in aerospace and medical industry. This project is supported by Turkish Aerospace Space Industry (TAI). High pressure cooling technology improves the machinability and extends the tool life during the production of aerospace alloys. In this study, Ti-6Al-4V alloy was processed in CNC milling bench and high pressure cooling conditions at four different cutting speeds, feed

rates and cooling fluid pressures, and meanwhile the mean surface roughness values, R_a , were measured. Different regression models were built for prediction of surface roughness and compared based on the measured R_a values for best performance.

2. Material and Methods

Ti-6Al-4V workpiece of 100x130x50 mm size was used. Hartford VMC 1020 CNC Machining Center shown in Figure 1.a was used to perform the experiments by keeping radial and axial cutting depth constant at 10 mm and 2 mm, respectively (Arokiadass et.al., 2011). Using cutting fluid is recommended during machining of titanium alloys to decrease high temperature occurrences between the cutting tool and chips, thus preventing the titanium from sticking to the cutting tool (Çakır et.al., 2003; Çaydaş, 2008; Akkuş, 2010). Semi-synthetic B-Cool 9665 metal cutting fluid that is miscible with water belonging to Blaser Swisslube Company was preferred for the fact that it is suitable for light and heavy metal cutting and grinding processes of titanium, stainless steel, and steel alloys. High pressure cutting fluid adjusted to a concentration of 7% was applied from a 1.3 mm-diameter nozzle to machine tool-chip interface. Seco F40M [(Ti, Al) N-TiN]-coated cutting tool was used in the experiments. Dimensions of the cutter are listed in Table 1, and schematic diagram is shown in Figure 2. The cutting tool was clamped to tool holder with a thermal Shrink-fit machine. Determined four different cutting speed (V), feed rate (f) and cooling fluid pressure (P) values were given in Table 2. The experiments were conducted according to the Taguchi method which is applied frequently in literature to minimize the number of trials for being time- and cost-economic purposes (Nalbant et.al., 2007; Zhang et.al., 2007, Hascalık and Caydas, 2008; Yang et.al., 2009; Ding et.al., 2010, Fratila and Caizar, 2011; Revankar et.al., 2014; Akkuş et.al., 2017; Xiao et.al., 2018). Taguchi L16 experimental design was developed with Minitab 16 software. With Taguchi optimization method, optimum cutting conditions for minimum surface roughness were determined based on the calculated signal/noise (S/G) ratio, taking into account “the smallest the best” approach; and the confirmation experiment was performed (Toprak et.al., 2012). After the experiments performed at different cutting parameters, roughness values of machined surfaces were measured with T500 device of Hommel Werke Firm (Figure 1.b). Mean values obtained by measuring surface roughness on workpiece at six different points and were used in the analyses. A regression model was built by SPSS 20 software.

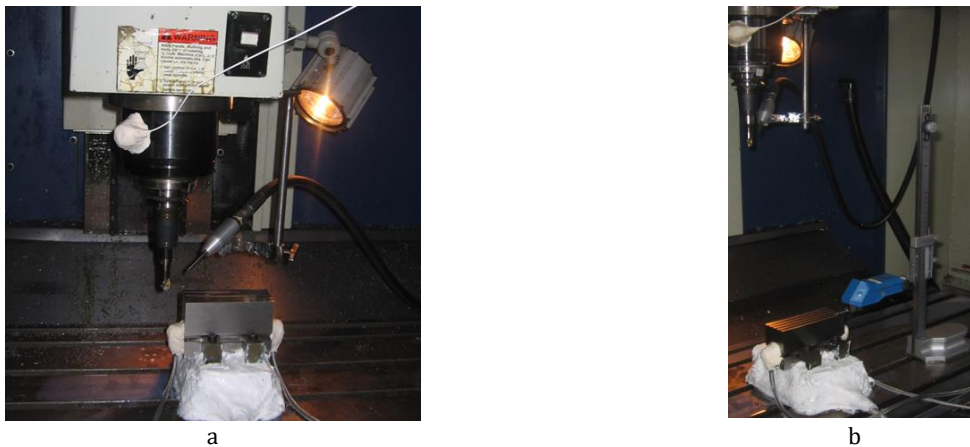


Figure 1. a. Experimental Setup, b. Surface Roughness Measuring Device and Its Use

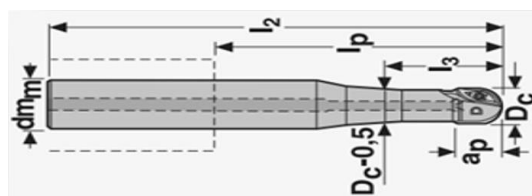


Figure 2. Schematic Diagram of The Cutting Tool

Table 1. Dimensions of Cutting Tool [mm]

| | | | | | |
|----|-----|-----|----|----|----|
| Dc | dmm | l2 | lp | l3 | ap |
| 16 | 20 | 120 | 70 | 36 | 14 |

Table 2. Experimental parameters with their values at 4 levels

| Parameters | Level 1 | Level 2 | Level 3 | Level 4 |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Cutting Speed (V [m/min]) | 50 | 70 | 90 | 110 |
| Feed Rate (f [mm/rev]) | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
| Pressure (P [bar]) | 6 | 100 | 200 | 300 |

3. Experimental Data and Regression Models

In this study, a regression model was used for predicting the surface roughness (Ra) in machining of Ti-6Al-4V workpiece. In regression analysis, a mathematical model is used to explain the relationship between two or more variables that have a cause-effect relationship between them (Kayabaşı and Çakmak, 2019). In a regression model, variation in dependent variable is being tried to be explained by independent variables. The defining ratio of independent variables to dependent variable, also known as coefficient of determination (R^2) is the ratio of defining amount in regression model to the undefined amount. It is the variation amount of one unit increase about the regression coefficient in independent variable that will form in the variable (Meral et.al., 2011). Best regression model was determined according to R^2 coefficient of determination by applying linear regression, second degree multiple regression and linear logarithmic regression to the experiment results given in Table 3. Data 17 in Table 3 belongs to the confirmation experiment that shows Taguchi Optimization was applied successfully. When residuals of normal probability plots of models were examined, error intensity was higher around the curves and plotting have normal distribution (Figure 3).

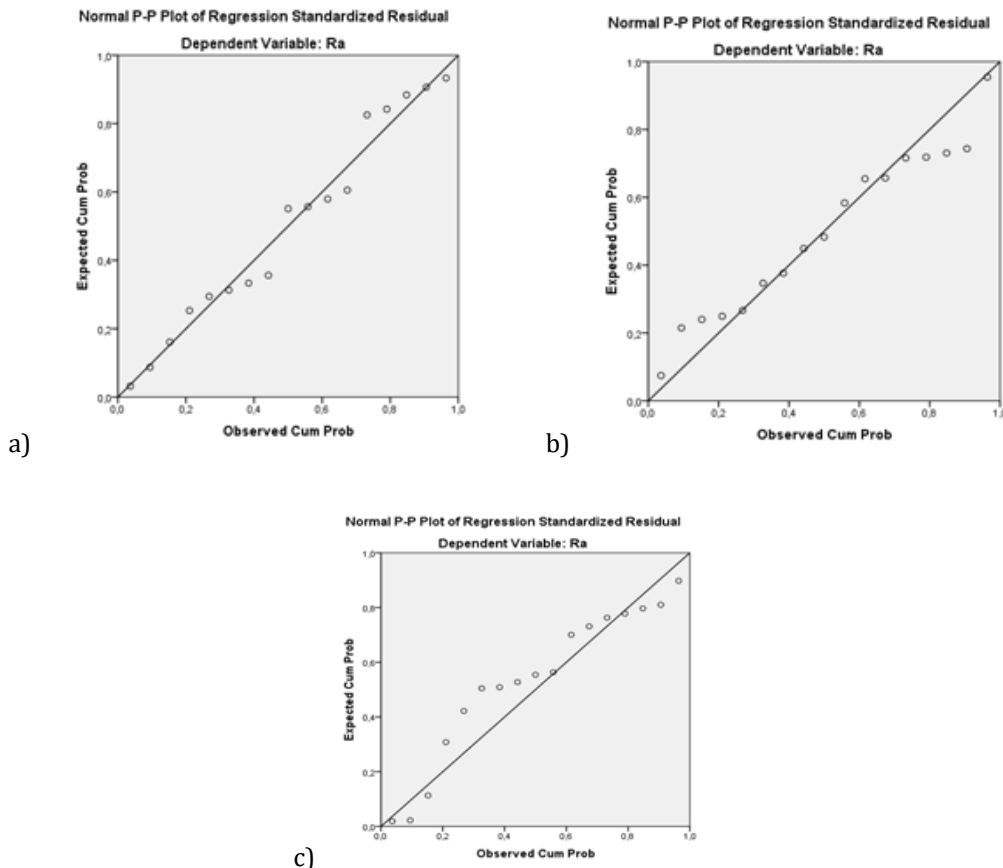


Figure 3. Normal Probability Plots of Models; A) Linear B) Second Degree C) Linear Logarithmic

Equation form that will be obtained with linear regression model is given in Equation 1.

$$Ra = b_0 + b_1V + b_2f + b_3P \quad (1)$$

Backward regression method with multiple linear regression was carried out for the prediction of model coefficients and in third step optimum regression model was obtained.

Table 3. R_a Values According to Experimental Data

| V [m/min] | P [bar] | f [mm/tooth] | R_a experimental [μ m] |
|--------------|------------|-----------------|-------------------------------------|
| 50 | 200 | 0.15 | 1.57 |
| 50 | 300 | 0.2 | 1.72 |
| 50 | 6 | 0.05 | 0.63 |
| 50 | 100 | 0.1 | 1.17 |
| 70 | 6 | 0.1 | 0.85 |
| 70 | 100 | 0.05 | 0.41 |
| 70 | 200 | 0.2 | 1.87 |
| 70 | 300 | 0.15 | 1.59 |
| 90 | 300 | 0.1 | 0.71 |
| 90 | 200 | 0.05 | 0.50 |
| 90 | 6 | 0.15 | 1.08 |
| 90 | 100 | 0.2 | 1.74 |
| 110 | 200 | 0.1 | 1.09 |
| 110 | 300 | 0.05 | 0.42 |
| 110 | 6 | 0.2 | 1.85 |
| 110 | 100 | 0.15 | 1.41 |
| 90 | 300 | 0.05 | 0.32 |

Table 4 shows ANOVA for linear regression models and Table 5 shows coefficients table for linear regression models.

Table 4. ANOVA for Linear Regression Models

| Model | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | |
|-------|----------------|-------|-------------|-------|---------|-------|
| 1 | Regression | 4.503 | 3 | 1.501 | 56.126 | .000b |
| | Residual | .348 | 13 | .027 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 2 | Regression | 4.503 | 2 | 2.252 | 90.654 | .000c |
| | Residual | .348 | 14 | .025 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 3 | Regression | 4.463 | 1 | 4.463 | 172.433 | .000d |
| | Residual | .388 | 15 | .026 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |

a. Dependent Variable: R_a

b. Predictors: (Constant), f, V, P

c. Predictors: (Constant), f, V

d. Predictors: (Constant), f

After analyzing Table 4, it was observed that significant coefficient of dependent variable was less than 0.05 in all three models which indicates that regression models were significant.

Table 5. Coefficients Table for Linear Regression Models

| Model | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. | |
|-------|-----------------------------|------------|---------------------------|-------|--------|------|
| | B | Std. Error | Beta | | | |
| 1 | (Constant) | 0.216 | .186 | | 1.163 | .266 |
| | V | -0.002 | .002 | -.091 | -1.229 | .241 |
| | P | 0.000 | .000 | -.003 | -.037 | .971 |
| | f | 8.953 | .699 | .956 | 12.807 | .000 |
| 2 | (Constant) | 0.214 | .169 | | 1.263 | .227 |
| | V | -0.002 | .002 | -.091 | -1.277 | .222 |
| | f | 8.955 | .671 | .956 | 13.354 | .000 |
| 3 | (Constant) | 0.030 | .091 | | .330 | .746 |
| | f | 8.984 | .684 | .959 | 13.131 | .000 |

a. Dependent Variable: R_a

When table 5 analyzed and equation 2 was obtained. For the final model, value of R² was 92% and redressed R²_d was 91.5%.

$$Ra = 0.030 + 8.984f \quad (p < 0.05) \quad (2)$$

Equation form that will be obtained with second degree multiple regression model is given in Equation 3.

$$Ra = b_0 + b_1V + b_2 f + b_3P + b_4V^2 + b_5f^2 + b_6P^2 + b_7Vf + b_8VP + b_9fP \quad (3)$$

Backward regression method with second degree multiple regression was carried out for the prediction of model coefficients and in sixth step optimum regression model was obtained.

Table 6 shows ANOVA for second degree multiple regression models and Table 7 shows coefficients table for second degree multiple regression models.

Table 6. ANOVA for Second Degree Multiple Regression Models

| | Model | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|------------|----------------|----|-------------|--------|-------|
| 1 | Regression | 4.711 | 9 | .523 | 26.211 | .000b |
| | Residual | .140 | 7 | .020 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 2 | Regression | 4.711 | 8 | .589 | 33.487 | .000c |
| | Residual | .141 | 8 | .018 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 3 | Regression | 4.707 | 7 | .672 | 41.907 | .000d |
| | Residual | .144 | 9 | .016 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 4 | Regression | 4.697 | 6 | .783 | 50.900 | .000e |
| | Residual | .154 | 10 | .015 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 5 | Regression | 4.681 | 5 | .936 | 60.452 | .000f |
| | Residual | .170 | 11 | .015 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 6 | Regression | 4.610 | 4 | 1.153 | 57.354 | .000g |
| | Residual | .241 | 12 | .020 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |

- a. Dependent Variable: Ra
- b. Predictors: (Constant), f*P, V*f, V*P, P², V², f², P, f, V
- c. Predictors: (Constant), V*f, V*P, P², V², f², P, f, V
- d. Predictors: (Constant), V*f, P², V², f², P, f, V
- e. Predictors: (Constant), V*f, P², V², P, f, V
- f. Predictors: (Constant), V*f, P², V², P, V
- g. Predictors: (Constant), V*f, V², P, V

After analyzing table 6, it was observed that significant coefficient of dependent variable was less than 0.05 in all three models which indicates that regression models were significant.

When Table 7 analyzed, parameters which have significant coefficient less than 0.05 were used and equation 4 was obtained. For the final model, value of R² was 95 % and redressed R²_d was 93.4 %.

$$Ra = 2.3311 - 0.0472V + 0.0010P + 0.0002V^2 + 0.1105V * f \quad (p < 0.05) \quad (4)$$

Equation form that will be obtained with linear logarithmic regression model is given in Equation 5.

$$Ra = b_0 + b_1\ln(V) + b_2\ln(f) + b_3\ln(P) \quad (5)$$

Backward regression method with linear logarithmic regression was carried out for the prediction of model coefficients and in third step optimum regression model was obtained.

Table 7. Coefficients Table for Second Degree Multiple Regression Models

| Model | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. | | |
|----------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|--------|--------|--------|------|
| | B | Std. Error | Beta | | | | |
| 1 | (Constant) | 1.7683 | .730 | | 2.421 | .046 | |
| | V | -0.0405 | .016 | -1.655 | -2.545 | .038 | |
| | P | 0.0016 | .003 | .339 | .638 | .544 | |
| | f | 5.5541 | 5.443 | .593 | 1.020 | .342 | |
| | V ² | 0.0002 | .000 | 1.170 | 2.052 | .079 | |
| | f ² | -9.0385 | 13.905 | -.242 | -.650 | .536 | |
| | P ² | 0.0000 | .000 | -.433 | -1.745 | .124 | |
| | V*f | 0.0698 | .047 | .708 | 1.477 | .183 | |
| | V*P | 0.0000 | .000 | .192 | .425 | .683 | |
| | f*P | 0.0018 | .009 | .057 | .207 | .842 | |
| 2 | (Constant) | 1.7666 | .685 | | 2.578 | .033 | |
| | V | -0.0411 | .015 | -1.680 | -2.802 | .023 | |
| | P | 0.0018 | .002 | .385 | .847 | .421 | |
| | f | 5.9715 | 4.746 | .638 | 1.258 | .244 | |
| | V ² | 0.0002 | .000 | 1.181 | 2.216 | .058 | |
| | f ² | -9.2990 | 12.993 | -.249 | -.716 | .495 | |
| | P ² | 0.0000 | .000 | -.437 | -1.887 | .096 | |
| | V*f | 0.0691 | .044 | .701 | 1.562 | .157 | |
| | V*P | 0.0000 | .000 | .196 | .461 | .657 | |
| | 3 | (Constant) | 1.6860 | .633 | | 2.664 | .026 |
| V | | -0.0397 | .014 | -1.621 | -2.897 | .018 | |
| P | | 0.0027 | .001 | .560 | 2.353 | .043 | |
| f | | 5.7087 | 4.501 | .609 | 1.268 | .236 | |
| V ² | | 0.0002 | .000 | 1.189 | 2.338 | .044 | |
| f ² | | -9.4977 | 12.405 | -.254 | -.766 | .464 | |
| P ² | | 0.0000 | .000 | -.440 | -1.992 | .078 | |
| V*f | | 0.0686 | .042 | .695 | 1.623 | .139 | |
| 4 | | (Constant) | 1.8085 | .600 | | 3.016 | .013 |
| | | V | -0.0400 | .013 | -1.633 | -2.981 | .014 |
| | P | 0.0027 | .001 | .562 | 2.411 | .037 | |
| | f | 3.4465 | 3.324 | .368 | 1.037 | .324 | |
| | V ² | 0.0002 | .000 | 1.205 | 2.423 | .036 | |
| | P ² | 0.0000 | .000 | -.447 | -2.068 | .065 | |
| | V*f | 0.0675 | .041 | .684 | 1.632 | .134 | |
| | 5 | (Constant) | 2.2023 | .465 | | 4.731 | .001 |
| | | V | -0.0459 | .012 | -1.873 | -3.761 | .003 |
| | | P | 0.0031 | .001 | .655 | 3.029 | .011 |
| V ² | | 0.0002 | .000 | 1.229 | 2.464 | .031 | |
| P ² | | 0.0000 | .000 | -.463 | -2.138 | .056 | |
| V*f | | 0.1098 | .007 | 1.113 | 16.527 | .000 | |
| 6 | | (Constant) | 2.3311 | .526 | | 4.434 | .001 |
| | | V | -0.0472 | .014 | -1.929 | -3.405 | .005 |
| | | P | 0.0010 | .000 | .210 | 3.114 | .009 |
| | | V ² | 0.0002 | .000 | 1.278 | 2.253 | .044 |
| | V*f | 0.1105 | .008 | 1.120 | 14.625 | .000 | |

a. Dependent Variable: Ra

Table 8 shows ANOVA for linear logarithmic regression models and Table 9 shows coefficients table for linear logarithmic regression models.

Table 8. ANOVA for Logarithmic Regression Models

| | Model | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|------------|----------------|----|-------------|---------|-------------------|
| 1 | Regression | 4.451 | 3 | 1.484 | 48.160 | .000 ^b |
| | Residual | .400 | 13 | .031 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 2 | Regression | 4.441 | 2 | 2.220 | 75.721 | .000 ^c |
| | Residual | .411 | 14 | .029 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |
| 3 | Regression | 4.391 | 1 | 4.391 | 143.126 | .000 ^d |
| | Residual | .460 | 15 | .031 | | |
| | Total | 4.851 | 16 | | | |

a. Dependent Variable: Ra

b. Predictors: (Constant), LN_f, LN_V, LN_P

c. Predictors: (Constant), LN_f, LN_V

d. Predictors: (Constant), LN_f

After analyzing Table 8, it was observed that significant coefficient of dependent variable was less than 0.05 in all three models which indicates that regression models were significant.

Table 9 analyzed parameters which have significant coefficient less than 0.05 were used and equation 6 was obtained. For the final model, the value of R² was 90.5 % and redressed R²_d was 89.9 %.

Table 9. Coefficients Table for Linear Logarithmic Regression Models

| Model | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. | |
|-------|-----------------------------|------------|---------------------------|-------|--------|------|
| | B | Std. Error | Beta | | | |
| 1 | (Constant) | 3.986 | .668 | | 5.969 | .000 |
| | LN_V | -.190 | .148 | -.102 | -1.283 | .222 |
| | LN_P | .016 | .028 | .046 | .571 | .578 |
| | LN_f | .942 | .079 | .950 | 11.880 | .000 |
| 2 | (Constant) | 4.041 | .645 | | 6.268 | .000 |
| | LN_V | -.188 | .144 | -.101 | -1.302 | .214 |
| | LN_f | .939 | .077 | .947 | 12.166 | .000 |
| 3 | (Constant) | 3.235 | .182 | | 17.741 | .000 |
| | LN_f | .944 | .079 | .951 | 11.964 | .000 |

a. Dependent Variable: Ra

$$Ra = 3.235 + 0.944Ln(f) \quad (p < 0.05) \quad (6)$$

When R² values of regression models that were built for surface roughness were examined, the best solution was determined as second degree regression equation with a value 95 %.

Prediction results for three regression models are given in Figure 4.

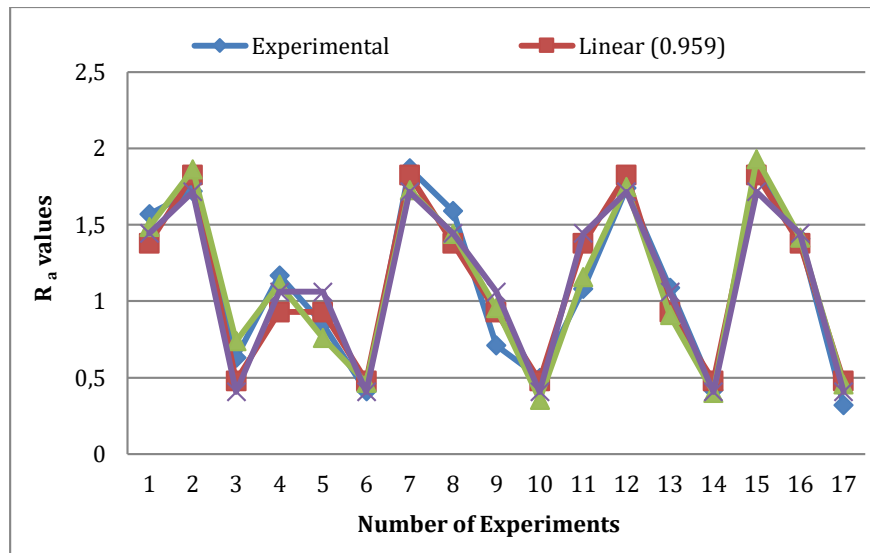


Figure 4. Comparison of Ra Values Acquired Experimentally and By Prediction Using Regression Models

From the figure, it was observed that the most similar results to the experimental Ra values obtained by second degree regression model.

Correlation between regression models and experimental data are shown in Table 10.

Table 10. Correlation of Ra Values Acquired Experimentally and By Prediction Using Regression Models

| Pearson Correlations | | Experimental | Linear | Second degree | Linear logarithmic |
|----------------------|---|--------------|--------|---------------|--------------------|
| Experimental | r | 1 | .959** | .975** | .951** |
| Linear | r | .959** | 1 | .973** | .982** |
| Second degree | r | .975** | .973** | 1 | .956** |
| Linear logarithmic | r | .951** | .982** | .956** | 1 |

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

From Table 10, it was observed that second degree multiple regression model has the highest correlation with the Ra value.

4. Conclusion

In this study, Ti-6Al-4V workpiece was machined at four different levels of cutting speed, feed rate and cutting fluid pressure. With experimental results of cutting speed, feed rate and cutting fluid pressure, models of surface roughness were built by linear regression, second degree regression and linear logarithmic regression methods.

The R² value of the equation attained via the second degree regression model for Ra was found to be 95%. The second degree regression model gave better result than linear and linear logarithmic regression models. Also, similar surface roughness values to experimental results were observed with second degree regression model with correlation of 0.975. As a result, second degree regression model proved to be successful in predicting surface roughness. The result of the study confirms the literature (Akkuş ve Asilturk, 2011; Meral et.al., 2011; Akkuş, 2021; Ayyıldız et. al., 2021). The feed rate was determined as the most important factor affecting surface roughness.

Acknowledgement

We would like to thank to Süleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project No. 2215-D-10), Tubitak 108M380, Blaser Swiss Lube, TUSAŞ-TAI and Süleyman Demirel University CAD-CAM Research and Application Center for their supports in performing the study.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Akkuş, H., 2010. Prediction of Surface Roughness in Turning Operations Using Artificial Intelligence and Statistical Methods, MSc. Thesis, Selçuk University, Konya.
- Akkuş, H., Asiltürk, İ., 2011. Predicting Surface Roughness of AISI 4140 Steel in Hard Turning Process through Artificial Neural Network, Fuzzy Logic and Regression Models, *Scientific Research and Essays*, 6(13), 2729-2736.
- Akkuş H., Yaka H., Uğur L., 2017. Creating The Mathematical Model for The Surface Roughness Values Occurring During The Turning of The AISI1040 Steel, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35 (2), 303-310.
- Akkuş, H., 2021. Investigation of Surface Roughness Values During Machinability of AISI 1040 Steel With Different Estimation Models, *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 24 (2), 84-92.
- Arokiadass, R., Palaniradja, K., Alagumoorthi, N., 2011. Surface Roughness Prediction Model in End Milling of Al/SiCp MMC by Carbide Tools, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(6), 78-87.
- Asiltürk, İ., Çunkaş, M., 2011. Modeling and Prediction of Surface Roughness in Turning Operations Using Artificial Neural Network and Multiple Regression Method, *Expert Systems with Applications*, 38, 5826-5832.
- Asiltürk, İ., Akkuş, H., Demirci, M.T., 2012. Modelling of Surface Roughness Based on Vibration, Acoustic Emission and Cutting Parameters With Regression, *Engineer and Machinery*, 53, 55-62.
- Ay, M., Turhan, A., 2010. Investigation of The Effect Of Cutting Parameters On The Geometric Tolerances And Surface Roughness In Turning Operation, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 7, 55-67.
- Ayyıldız, E.A., Ayyıldız M., Kara F., 2021, Optimization of Surface Roughness in Drilling Medium-Density Fiberboard with a Parallel Robot, *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 6658968, 8 pages.
- Çakır, O., Kiyak, M., Altan, E., 2003. Titanyum ve Alaşımlarının Talaşlı Şekillendirilmesi", II. MakineTasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, 21-30.
- Çaydaş, U., 2008. Investigation of the Machinability of Ti6Al4V Alloy by Electrical Discharge and Electrochemical Machining Processes, Phd Thesis, Fırat University, Elazığ.
- Çaydaş, U., Haşçalık, A., 2008. A study on Surface Roughness in Abrasive Waterjet Machining Process Using Artificial Neural Networks and Regression Analysis Method, *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 574-582.
- Chavoshi, S.Z., Tajdari, M., 2010. Surface Roughness Modelling in Hard Turning Operation of AISI 4140 Using CBN Cutting Tool, *Int J Mater Form*, 3, 233-239.
- Ding, T., Zhang, S., Wang, Y., Zhu, X., 2010. Empirical Models and Optimal Cutting Parameters for Cutting Forces and Surface Roughness in Hard Milling of AISI H13 Steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 45-55.
- Fratila, D., Caizar, C., 2011. Application of Taguchi Method to Selection of Optimal Lubrication and Cutting Conditions in Face Milling of AlMg3, *Journal of Cleaner Production*, 19, 640-645.
- Hanief, M., Wani, M.F., 2016. Artificial Neural Network and Regression-Based Models for Prediction of Surface Roughness During Turning of Red Brass (C23000), *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 10 (1), 1835-1845.
- Hasçalık, A., Caydas, U., 2008. Optimization of Turning Parameters for Surface Roughness and Tool Life Based on the Taguchi Method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, 896-903.
- Kaya, B., 2009. An Online Tool Condition Monitoring System Development for Milling Processes Using Sensor and Decision Integration, PhD Thesis, Kocaeli University, Kocaeli.
- Kayabaşı, O., Çakmak, H., (2019). Design Methodology Of Plastic Injection Process Using Approximate Solution Techniques, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(3), 627-638.
- Lin Y.C, Wu K.D., Shih W.C., Hsu P.K., Hung J.P., 2020. Prediction of Surface Roughness Based on Cutting Parameters and Machining Vibration in End Milling Using Regression Method and Artificial Neural Network, *Appl. Sci.*, 10, 3941; doi:10.3390/app10113941.
- Mavi, A., Korkut, İ., 2010. Modeling With Regression Analysis of the Effect of Cutting Parameters on Cutting Forces and Surface Roughness in Machining Vermicular Graphite Cast Iron, *Journal of Polytechnic*, 13, 281-286.
- Meral, G., Dilipak, H., Sarıkaya, M., 2011. Modeling with Regression Methods of the Thrust Forces and The Surface Roughness in The Drilling of AISI 1050 Materials, *Turkish Science Research Foundation*, 4, 31-41.
- Nalbant, M., Gökkaya, H., Sur, G., 2007. Application of Taguchi Method in the Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning, *Materials & Design*, 28 (4), 1379-1385.
- Nas, E., Samtaş, G., Demir, H., 2012. Mathematically Modeling Parameters Influencing Surface Roughness in CNC Milling, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 18, 47-59.
- Ranganathan, S., Senthilvelan, T., Sriram, G., 2009. Mathematical Modeling of Process Parameters on Hard Turning Of AISI 316 SS by WC Insert, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68, 592-596.
- Revankar, Goutam D., Shetty, Raviraj, Shetty, Rao, Shrikantha S., Gaitonde Vinayak N., 2014. Selection of Optimal Process Parameters in Ball Burnishing of Titanium Alloy, *An International Journal Machining Science and Technology*, 18, 464-483.
- Simunovic, K., Simunovic G., Saric, T., 2013. Predicting the Surface Quality of Face Milled Aluminium Alloy Using a Multiple Regression Model and Numerical Optimization, *Measurement Science Review*, 13, 265-272.
- Taşdemir, Ş., 2011. The Comparative Study to Determine Surface Roughness with Artificial Neural Network and Regression, *Selcuk University Journal of Technical-Online*, 10, 215-226.
- Toprak, I.B., Çağlar, M.F., Colak, O., Kiran, K., Bayhan, M., 2012. Optimization of Surface Roughness by Using Taguchi Method in Milling of Ti-6Al-4 V Super- Alloy at High- Pressure Cooling Conditions, *SDU International Journal of Technological Sciences*, 4(2), 30-39.

- Vikram, K.A., Ratnam, Ch., 2012. Empirical Model for Surface Roughness in Hard Turning Based on Analysis of Machining Parameters and Hardness Values of Various Engineering Materials, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 3091-3097.
- Xiao M., Shen X., Ma Y., Yang F., Gao N., Wei W., Wu D., 2018. Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, Article ID 9051084, 15 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/9051084>.
- Yang, Y.K., Chuang, M.T., Lin, S.S., 2009. Optimization of Dry Machining Parameters for High-Purity Graphite in End Milling Process Via Design of Experiments Methods, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4395-4400.
- Zhang, J.Z., Chen, J.C., Kirby, E.D., 2007. Surface Roughness Optimization in an End-Milling Operation Using the Taguchi Design Method, *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 233-239.



BİTÜMLÜ KAPLAMALARIN SU ETKİLERİNE KARŞI PERFORMANSI ÜZERİNDE ATIK LDPE'NİN ETKİSİ

Tacettin GEÇKİL, Ceren Beyza İNCE*

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|---|
| <i>Bitüm, LDPE, Bitümlü Sıcak Karışım, Marshall Stabilite, Endirekt Çekme Mukavemeti.</i> | <p>Bu çalışmada, bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansı üzerinde atık düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)'nin etkisi araştırılmıştır. Bunun için, bitüm ile LDPE arasında bir etkileşim sağlamak amacıyla saf B 70/100 bağlayıcısına bağlayıcı ağırlığının % 2,5 kadar trietanolamin (TEOA) eklenmiştir. Elde edilen, bitüm-TEOA harmanına bitüm ağırlığının % 1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında LDPE eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitüm numunelerinin fiziksel özellikleri geleneksel testlerle, bitüm-TEOA-LDPE arasındaki etkileşim ise kimyasal analizlerle belirlenmiştir. Daha sonra, Marshall karışım yöntemi esas alınarak saf bağlayıcı ve agrega ile karışım numuneleri hazırlanmış ve optimum bitüm içeriği (OBİ) tespit edilmiştir. Belirlenen OBİ oranı baz alınarak LDPE modifiyeli sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve bütün karışım numuneleri Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) ve endirekt çekme mukavemeti (ITS) testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, atık LDPE katkısı ile bağlayıcıların sertliğinin arttığı ve bitüm-TEOA-LDPE arasında iyi bir etkileşim sağlandığı görülmüştür. Diğer taraftan, özellikle %4 atık LDPE katkılı karışım numunelerinin Marshall stabilitesi, RMS ve endirekt çekme mukavemeti oranı (ITSR) değerlerinde iyileşmeler meydana geldiği ve bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansının artış gösterdiği görülmüştür.</p> |

EFFECT OF WASTE LDPE ON THE PERFORMANCE OF BITUMINOUS PAVEMENTS AGAINST WATER IMPACTS

| Keywords | Abstract |
|--|---|
| <i>Bitumen, LDPE, Bituminous Hot Mixes, Marshall Stability, Indirect Tensile Strength.</i> | <p>In this study, the effect of waste low density polyethylene (LDPE) on the performance of bituminous pavements against water effects was investigated. For this, 2.5% by weight of the binder triethanolamine (TEOA) was added to the pure B 70/100 binder to provide an interaction between bitumen and LDPE. Modified bitumens were obtained by adding LDPE in the ratios of 1, 2, 3, 4 and 5% by weight of bitumen to the obtained bitumen-TEOA blend. The physical properties of pure and modified bitumen samples were determined by conventional tests, and the interaction between bitumen-TEOA-LDPE was determined by chemical analysis. Then, samples were prepared with pure binder and aggregate based on the Marshall mixture method and the optimum bitumen content (OBC) was determined. Based on the determined OBC ratio, LDPE modified hot mix samples were prepared and all mix samples were subjected to Marshall stability and flow, retained Marshall stability (RMS) and indirect tensile strength (ITS) tests. In the results, it was seen that the hardness of the binders increased with the waste LDPE additive and a good interaction was provided between bitumen-TEOA-LDPE. On the other hand, it was observed that Marshall stability, RMS and indirect tensile strength ratio (ITSR) values of especially 4% waste LDPE added mixture samples improved, and the performance of bituminous pavements against water effects increased.</p> |

Alıntı / Cite

Geçkil, T., İnce, C.B., (2022). Bitümlü Kaplamaların Su Etkilerine Karşı Performansı Üzerinde Atık LDPE'nin Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 631-642.

* İlgili yazar / Corresponding author: c.beyzaince@gmail.com, +90-507-831-5591

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| T. Geçkil, 0000-0001-8070-6836 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 27.04.2021 |
| C.B. İnce, 0000-0002-6385-0964 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 28.01.2022 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 28.02.2022 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde taşımacılıktan teknolojiye hatta otomobil sanayisine kadar hemen hemen her sektörde kullanılan plastikler insanoğlunun günlük yaşamının önemli bir parçası haline gelmiştir. Hafif, kolay işlenebilir ve uygun maliyette olmaları plastiklerin üretim hızının artmasına ve dolayısıyla her sektörde kullanılmasına sebep olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre dünya genelinde plastik üretimi 2016 yılında 335 milyon ton iken 2035 yılında bu rakamların iki katına çıkacağı ön görülmektedir (Almeida vd., 2020; Bahij vd., 2020; Gala vd., 2020) Üretilen bu plastiklerin yalnızca yaklaşık %30'unun geri dönüşümde kullanılması ve aynı zamanda üretim hızının artarak devam etmesi atık plastik miktarının da artmasına sebep olmaktadır (Bahij vd., 2020).

Dünyadaki plastik üretiminin yüksek olması ve buna paralel olarak atık miktarının artması ciddi bir çevre kirliliğini de kaçınılmaz kılmaktadır. Doğaya bırakılan plastikler, görsel kirlilik ve yer işgal etmenin yanı sıra birçok canlının ölümüne sebep olmaktadır. Atık plastiklerin canlılar ve çevre üzerinde meydana getirmiş olduğu tüm bu sorunlar, atık yönetimi konusunun önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Bu amaçla, son yıllarda yapılan araştırmaların çoğu atık plastiklerin kullanımı ve geri dönüşümü üzerine olmuştur (Behl vd., 2014; Jung vd., 2018; Njeru vd. 2006).

Bilindiği gibi dünyada en çok üretilen ve kullanılan plastik çeşitlerini polietilen tereftalat (PET), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) oluşturmaktadır (Behl vd., 2014; Geçkil vd., 2020; Leng vd., 2018; Özyurt 2020; Soncu ve Akkoyun 2020). Bu plastiklerin büyük çoğunluğunu (yaklaşık %40'ını), diğer plastiklere nazaran daha kısa kullanım ömrüne sahip olan ve ambalaj sektörünün %50'sini oluşturan LDPE esaslı plastikler meydana getirmektedir (Almeida vd., 2020). LDPE, çoğunlukla alışveriş sektöründe kullanılan taşıma poşetleri olmak üzere, bilgisayar parçaları, içecek kutuları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Abhijith vd., 2019). Kimyasallara karşı dirençli, ısı sızdırmaz, opak ve buhar geçirgenliği minimum olan bir malzeme olan LDPE, zincir yapısında meydana gelen az miktarda dallanma sebebiyle düşük sıcaklıkta bile esnek özellik gösteren bir malzemedir (Sen vd., 2015).

Bu çalışmada, atık plastik çeşitlerinden biri olan ve ciddi çevresel kirliliğe sebebiyet veren LDPE'nin trietanolamin (TEOA) kimyasalı ile birlikte yol mühendisliğinde bir iyileştirici olarak kullanımı araştırılmıştır.

Yol mühendisliğinde bir kaplama çeşidi olan bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar, trafik yükleri ve şiddeti, sıcaklık ve su gibi etmenler sebebiyle zamanla bozulmaya başlamaktadır (El-Maaty Behiry 2013; Geçkil vd., 2020). Su dışındaki diğer etmenler kaplamada çoğunlukla kalıcı deformasyon ve çatlamalara sebep olurken, kaplamadaki suyun varlığı kaplamanın ayrışmasına neden olmaktadır. Suyun varlığı, bitüm ile agrega arasındaki yapışma kuvvetinin azalmasına neden olur ve bu durum adezyon kaybı olarak adlandırılmaktadır. Adezyon kaybı ile kaplama yumuşamaya başlar ve bu durum da kohezyon kaybı olarak ifade edilmektedir. Kısaca, kaplamadaki su sebebiyle meydana gelen bozulmalar adezyon ve kohezyon kaybı ile direkt olarak ilgilidir (El-Maaty Behiry 2013, Kök 2007).

BSK kaplamalarda su sebebiyle meydana gelen bozulmaları azaltmak amacıyla hidrate kireç, portland çimentosu, silan ve silikon katkıları ile metal iyonu yüzey ajan katkıları kullanılmaktadır (Özen 2011; Aksoy vd., 2012). Sudan kaynaklı bozulmaları azaltmak amacıyla çoğunlukla kullanılan bir yöntem olan BSK'ya kireç eklenmesiyle, kireç bitüm ile agrega arasındaki bağ kuvvetini arttırarak yapı ile etkileşime girmektedir (Görkem ve Şengöz 2009). Bununla birlikte, son zamanlarda çeşitli polimer malzemeler de su hasarını önlemek amacıyla BSK'da kullanılmaya başlanmıştır (Kumar vd., 2006; Geçkil vd., 2021).

Bir atık plastik çeşidi ve polimer bir malzeme olan LDPE'nin bitüm modifikasyonunda kullanıldığı çalışmalarda, genel olarak LDPE katkılı bitümlü bağlayıcıların viskozitesinin ve yumuşama noktasının arttığı, duktilite ve penetrasyon değerinin ise azaldığı ayrıca reolojik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür (Al-Hadidy ve Tan 2009; Nejres vd., 2020; Punith vd., 2007). LDPE'nin sıcak karışımlarda kullanıldığı çalışmalarda, Awwab ve Shbeeb (2007) çalışmalarında karışım tasarımında polietilen grubu malzemeleri (HDPE ve LDPE) kullanmışlar ve çalışmanın sonunda polietilen katkılı karışımların stabilite değerlerinin daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Nkanga ve arkadaşları (2017), LDPE katkısının sıcak karışımların stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve LDPE katkısının karışımların stabilitesini önemli ölçüde arttırdığını ifade etmişlerdir. Al-Hadidy ve Tan (2009), LDPE katkısıyla karışımların stabilite ve ITS değerlerinde önemli artışlar meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

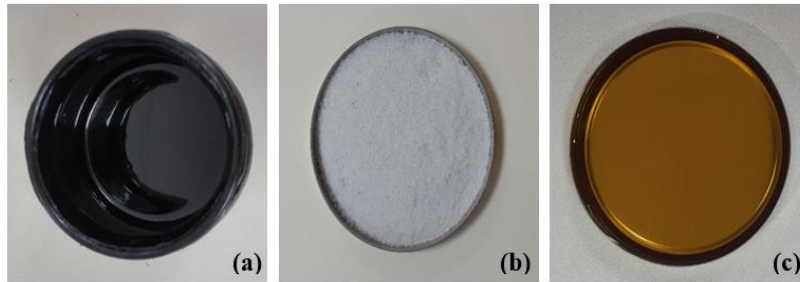
Ancak, LDPE gibi plastik polimer kökenli malzemeler kullanılarak yapılan çalışmalarda, plastiklerin bitüm içerisinde homojen olarak dağılmadığı ve faz ayrışması sorununun meydana geldiği görülmüştür. Bu sebeple, LDPE gibi plastikler bitüm modifikasyonunda genellikle farklı polimerlerle birlikte kullanılmaya çalışılarak faz ayrışması sorunu ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, araştırmacılar son yıllarda bitüm ile kimyasal etkileşim kurabilen polimer üretimine (reaktif terpolimer gibi) ve bitüm ile polimer arasında kimyasal etkileşim sağlayabilen çeşitli katkıları kullanmaya başlamışlardır (Geçkil vd., 2020; Polacco vd., 2015). Bu katkılardan biri olan TEOA, çalışmalarda bitüm ile polimer malzemeler arasında iyi bir kimyasal etkileşim kurmak ve tek fazlı bir yapı elde etmek amacıyla kullanılmıştır (Geçkil vd., 2020; Geçkil vd., 2021).

Bu çalışmada ise, bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansı üzerinde atık LDPE'nin TEOA ile birlikte kullanımının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, hazırlanan modifiye karışım numuneleri, Marshall stabilite ve akma, RMS ve ITS deneylerine tabi tutulmuştur.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

Çalışmada, Elazığ Karayolları Asfalt Şantiyesinden alınan penetrasyon sınıfı B 70/ 100 saf bitüm (Şekil 1a) bağlayıcı olarak, atık LDPE (Şekil 1b) modifiye edici katkı olarak, bitüm ile atık LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlamak amacıyla TEOA kimyasalı (Şekil 1c) kullanılmıştır. Saf bitümün özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Saf Bitüm (a); atık LDPE (b); TEOA (c) (Pure Bitumen (a); waste LDPE (b); TEOA (c))

Tablo 1. Saf Bağlayıcının Özellikleri (Properties of Pure Binder)

| Özellik | Standart | Limit | Sonuç |
|-------------------------------------|-----------|----------|-------|
| Penetrasyon (0.1 mm) | ASTM D5 | 70-100 | 88 |
| Yumuşama noktası (°C) | ASTM D36 | 43-51 | 46,75 |
| Düktilite (cm) | ASTM D113 | min. 100 | 117 |
| Parlama noktası (°C) | ASTM D92 | min. 230 | 238 |
| Özgül ağırlık (gr/cm ³) | ASTM D70 | 1,0-1,1 | 1,038 |

Modifiye edici katkı olarak kullanılan atık LDPE, Bursa-SÖZAL Kimya LTD.ŞTİ.'den tedarik edilmiştir. LDPE'nin özellikleri (Beşergil 2008; Sen vd., 2015) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. LDPE'nin Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of LDPE)

| Özellik | LDPE |
|--------------------------------|-------------|
| Yoğunluk (gr/cm ³) | 0,910-0,925 |
| Sertlik (D) | 41-46 |
| Erime noktası (°C) | 105-115 °C |
| Çekme dayanımı (MPa) | 7-40 |
| Elastik modül (GPa) | 0,07-0,3 |
| Uzama (%) | 90-800 |

Bitüm ile LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlamak amacıyla İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarından temin edilen TEOA kimyasalı kullanılmıştır. TEOA'nın özellikleri (Geçkil vd., 2020) Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. TEOA'nın Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of TEOA)

| Özellik | TEOA |
|--------------------------------|--|
| Kimyasal formül | C ₆ H ₁₅ NO ₃ |
| Molar kütle | 149.19 gr/mol |
| Kaynama noktası (°C) | 335.4 (°C) |
| Yoğunluk (gr/cm ³) | 1.12 gr/cm ³ |
| Yapı | Bazik |

Çalışmada, BSK aşınma tabakası tasarımında Karayolları 8.Bölge Müdürlüğü Malatya asfalt plentinden temin edilen kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Tablo 4'de, seçilen agrega gradasyonu ise Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Agreganın Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of Aggregate)

| Özellik | Standart | Limit | Sonuç |
|--|--------------|-------|-------|
| Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³) | ASTM C127 | - | 2,70 |
| Kaba agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³) | ASTM C127 | - | 2,67 |
| Kaba agrega su emme yüzdesi | ASTM C127 | ≤2,0 | 0,47 |
| İnce agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³) | ASTM C128 | - | 2,75 |
| İnce agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³) | ASTM C128 | - | 2,63 |
| İnce agrega su emme yüzdesi | ASTM C128 | ≤2,0 | 1,66 |
| Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³) | ASTM D 854 | - | 2,85 |
| Aşınma kaybı, Los Angeles (%) | TS EN 1097-2 | ≤27,0 | 27,0 |
| Donma kaybı, MgSO ₄ (%) | TS EN 1367-2 | ≤16,0 | 2,0 |
| Yassılık indeksi (%) | TS EN 933-3 | ≤20,0 | 5,0 |

Tablo 5. Agregada Gradasyonu (Aggregate Gradation)

| Elek no (mm) | 19 | 12,5 | 9,5 | 4,75 | 2,36 | 1,18 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,075 |
|--------------|-----|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|-------|
| Geçen (%) | 100 | 94 | 84 | 58 | 35 | 22 | 16 | 12 | 8 | 5 |

2.2. Metot (Method)

2.2.1. LDPE Katkılı Bitümlerin Hazırlanması (Preparation of LDPE Additive Bitumens)

Çalışmada, LDPE katkıli bağlayıcılar elde etmek amacıyla, ilk olarak 160 °C sıcaklığa kadar ısıtılan saf bitüme bitüm ağırlığının %2,5'i kadar TEOA ilave edilerek 500 devirde 10 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi yapıldı. Karıştırma işlemi sıcaklık ve devir ayarlı bir modifiye bitüm karıştırıcısı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan TEOA oranı, karıştırma süresi ve devir sayısı laboratuvarında yapılan ön çalışmalar (Geçkil vd., 2021) sonucunda belirlendi. Daha sonra, bitüm ağırlığının %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında LDPE ilave edilerek, 1000 devirde 50 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi (Al-Hadidy ve Tan 2009; Punith vd., 2007) devam ettirildi. Tüm modifiye bitümlerin hazırlanmasında aynı işlem sırası takip edildi.

Çalışmada kullanılan saf ve LDPE katkıli bitümler sırasıyla B, B+%1L, B+%2L, B+%3L, B+%4L ve B+%5L olarak ifade edilmiştir.

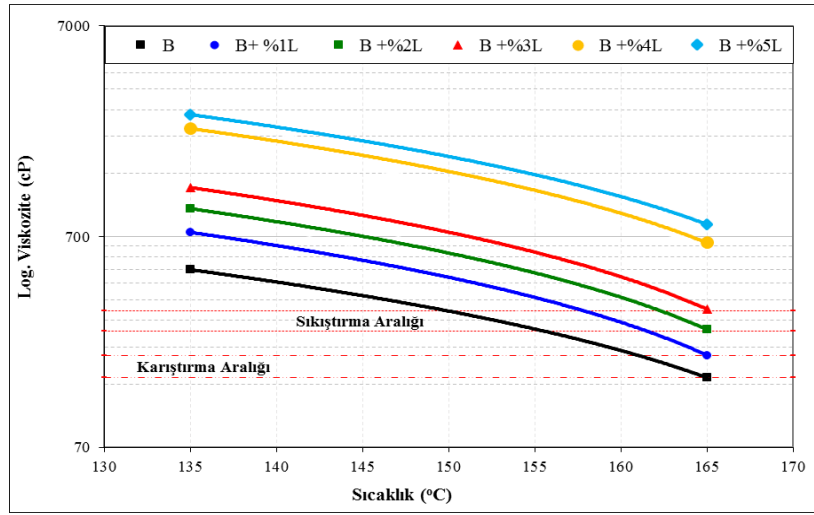
Saf ve LDPE katkıli bağlayıcıların fiziksel özellikleri ASTM D5, ASTM D36 ve ASTM D113 standartlarına göre sırasıyla penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite deneyleri ile belirlenerek elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik özellikleri ASTM D4402 standardına göre RV deneyi ile belirlenmiştir. RV deneyi sonucunda elde edilen viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 2'de verilmiştir. Elde edilen bu grafik yardımıyla saf ve LDPE katkıli bağlayıcıların karıştırma (170±20 cP)-sıkıştırma (280±30 cP) sıcaklık aralıkları (Geçkil, 2008) ve ortalama karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar yine Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6'da görüldüğü gibi, B 70/100 penetrasyon sınıflı saf bitüme LDPE ilavesiyle (%1, 2, 3, 4 ve 5) penetrasyon değerleri saf bitüme kıyasla sırasıyla %13,8; %25,5; %26,7; %33,9 ve %35,3 oranında azalma göstermiştir. LDPE ilavesiyle oluşan bu sertleşmenin doğal bir sonucu olarak, bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri de saf bağlayıcıya göre sırasıyla %5,3; %10; %12,8; %22,6 ve %26,5 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte, bağlayıcıların duktilite değerleri de saf bitüme kıyasla sırasıyla %4,3; %7,7; %9,4; %13,7 ve %15,4 azalma

göstermiştir. Tüm sonuçlardaki artış ve azalış oranlarının %4 LDPE oranında pik yaptığı, bu orandan sonra değişimlerin azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, LDPE katkısıyla bağlayıcıların sertleşme eğiliminin arttığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığı ifade edilebilir.

Tablo 6. Bağlayıcıların Geleneksel Test Sonuçları (Conventional Test Results of Binders)

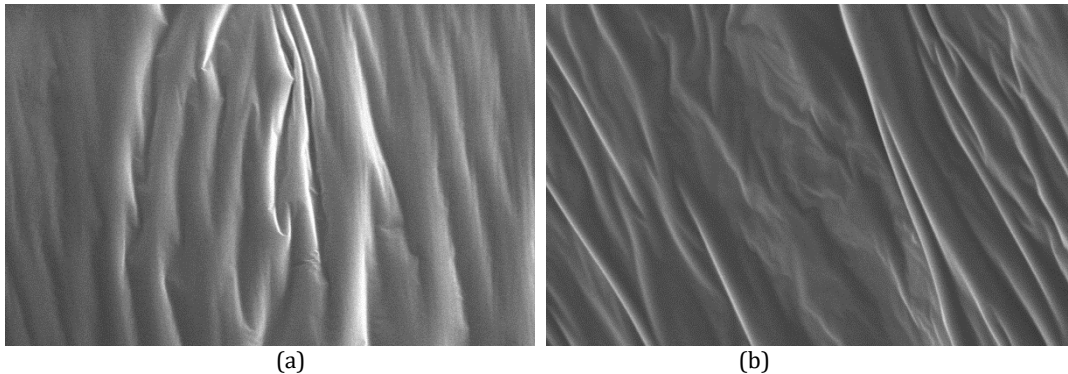
| Özellik | Bağlayıcı türü | | | | | |
|--------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | B | B +%1L | B +%2L | B +%3L | B +%4L | B +%5L |
| Penetrasyon | 88 | 75,9 | 65,6 | 64,5 | 58,1 | 56,9 |
| Yumuşama noktası | 46,8 | 49,3 | 51,5 | 52,8 | 57,4 | 59,2 |
| Düktilite | 117 | 112 | 108 | 106 | 101 | 99 |
| PI | -0,63 | -0,34 | -0,17 | 0,11 | 0,88 | 1,20 |
| Karıştırma aralığı, °C | 160,8-165,7 | 165.7-167.3 | 167.3-170.7 | 169.0-170.7 | 174.2-175.9 | 175.9-177.7 |
| Sıkıştırma aralığı, °C | 149.9-156.0 | 157.6-160.8 | 162.4-165.7 | 165.7-167.3 | 172.4-174.2 | 174.2-175.9 |
| Karıştırma sıcaklığı, °C | 163,3 | 166,5 | 169 | 169,9 | 175,1 | 176,8 |
| Sıkıştırma sıcaklığı, °C | 153 | 159,2 | 164,1 | 166,5 | 173,3 | 175,1 |



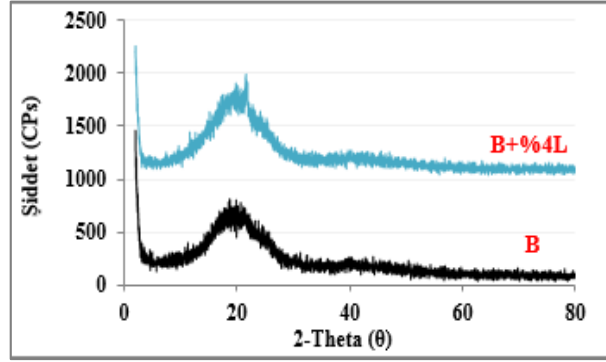
Şekil 2. Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık Grafiği (Viscosity-Temperature Graph of Binders)

Şekil 2 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışıyla bağlayıcıların viskozite değerlerinin artış gösterdiği ancak kritik bir oran %4 LDPE oranından sonra artış hızının azaldığı görülmektedir. Elde edilen viskozite değerleri yardımıyla bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıkları da LDPE katkı oranının artışı ile beraber artış göstermiştir (Tablo 6). Tüm bu sonuçlar, LDPE katkısı ile bağlayıcıların kıvamının sertleştiğini ve bu sebeple bağlayıcıların plentte karıştırma ve yoldaki serme esnasında daha fazla enerji harcanabileceğini ifade etmektedir. Ancak LDPE katkısının çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararlar göz önüne alındığında, fazla enerji sarfiyatının göz ardı edilebileceği söylenebilir.

Çalışmada saf ve LDPE katkılı bitümlerin kimyasal yapısında meydana gelen değişimler SEM ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Bu amaçla saf bitüm (B) ile kritik oran olan B+%4L bağlayıcılarının SEM görüntüleri (2.5K büyütme) Şekil 3'de, XRD desenleri ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Bağlayıcıların SEM Görüntüleri; (A) B; (B) B+%4L (SEM Images of Binders)



Şekil 4. Bağlayıcıların XRD Desenleri (XRD Patterns of Binders)

Şekil 3a'da saf bitümün (B) SEM görüntüsü incelendiğinde, yapının oldukça homojen ve tek fazlı olduğu görülmektedir. Saf bitüme %4 LDPE+ TEOA ilave edildiğinde ise (Şekil 3b), saf bitümde olduğu gibi homojen, tek fazlı bir yapının elde edildiği görülmektedir. Şekil 4'de saf bitümün (B) XRD deseni incelendiğinde, iki farklı makromoleküler yapının mevcut olduğu görülmektedir. İlk pik $2\theta \cong 20^\circ$ geniş ve yayvan olan kristalin bölgeyi, ikinci pik ise $2\theta \cong 40^\circ$ civarında ve daha az alana sahip olan amorf bölgenin varlığını göstermektedir. B+%4L bağlayıcısının XRD deseni incelendiğinde ise saf bitüme göre pik şiddetinin arttığı ve kristalin bölgelerin kısmen arttığı, ancak LDPE katkısıyla $2\theta \cong 40^\circ$ civarındaki pikin giderek yayvanlaşmaya başladığı ve amorf yapının giderek arttığı görülmüştür. Bu durum LDPE katkısının, bitüm-TEOA harmanıyla birleşmesiyle yapıyı amorflaştırıldığı ve kimyasal bir etkileşime girdiği şeklinde açıklanabilir.

2.2.2. LDPE Modifiyeli Karışımların Hazırlanması (Preparation of LDPE Modified Mixtures)

Atık LDPE katkısının BSK kaplamaların suya karşı direncine olan etkisini tespit etmek için, saf ve LDPE katkılı bağlayıcılar kullanılarak ASTM D1559 standardına göre Marshall tasarım yöntemi ile BSK numuneleri elde edilmiştir. Bunun için öncelikle, agrega ve saf bitüm kullanılarak katkısız sıcak karışımlar için optimum bitüm içeriği (OBİ) tespit edilmiştir. Bu OBİ oranı baz alınarak saf ve modifiye bitümler ile karışım numuneleri hazırlanmıştır. Her bir karışım numunesi için 1200 gr agrega alınmış ve bitümler kendi karıştırma sıcaklıklarında karıştırma cihazıyla karıştırılmış (Şekil 5a) ve sıkıştırma sıcaklıklarında işlenmiştir. Numuneler 457 mm yükseklikten serbest düşürülen sıkıştırma tokmağı (Şekil 5b) ile her bir yüzüne 75, toplamda 150 vuruş yapılarak (Geçkil vd., 2021) sıkıştırılmıştır.

Çalışmada, saf ve LDPE modifiyeli karışımlar yine sırasıyla B, B+%1L, B+%2L, B+%3L, B+%4L ve B+%5L olarak ifade edilmiştir.

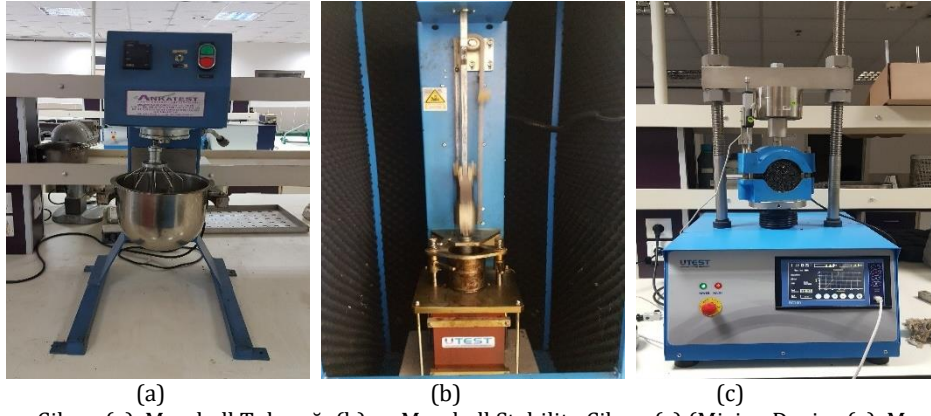
3. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi (Marshall Stability and Flow Test)

BSK'ların plastik akmaya karşı gösterdiği direnç ASTM D1559'a göre Marshall stabilite ve akma deneyi ile tespit edilmektedir. Deneyde, hazırlanmış olan karışım numunelerinin ağırlıkları ve yükseklikleri alınarak $60 \pm 1^\circ \text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda ortalama 35 dakika bekletildikten sonra çıkarılarak Marshall stabilite cihazına (Şekil 5c) yerleştirilir. Daha sonra numuneler 50 ± 2 mm/dakika yükleme hızına maruz bırakılarak kırıldıkları andaki stabilite ve akma değerleri tespit edilir. Stabilite değeri, kaplamaların deformasyonlara karşı koyabildiği en yüksek yük değerini ifade ederken; akma değeri ise bu yük değerine ulaşıldığında oluşan deformasyonu ifade etmektedir. Deneyde, standart kabul edilen yükseklik 63,5 mm olup, bu değerden farklı olan numuneler için denklem (1) bağıntısı kullanılarak, numunelerin düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanır (Geçkil vd., 2021).

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (1)$$

Denklem 1'de yer alan c; düzeltme katsayısını, h ise numune yüksekliğini ifade etmektedir. Marshall stabilite ve akma deneyi sonucunda, stabilite ve akma değerleri kullanılarak BSK'nın sertliklerinin ve deformasyonlara karşı dirençlerinin bir ölçüsü olarak kabul gören Marshall oranı (MQ) değerleri de tespit edilebilmektedir. MQ değeri, karışım stabilitesinin akma değerine oranlanmasıyla belirlenmekte olup, bu değer yüksek olması BSK kaplamanın deformasyonlara karşı dirençli olduğunu ifade etmektedir (Geçkil vd., 2021).



Şekil 5. Karıştırma Cihazı (a), Marshall Tokmağı (b) ve Marshall Stabilite Cihazı (c) (Mixing Device (a), Marshall Rammer (b), and Marshall Stability Device(c))

3.2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall Stability - RMS)

Bu deneyle, BSK kaplamaların sudan kaynaklı nem hasarlarına karşı dayanımları belirlenebilmektedir. Bunun için, karışım numuneleri 60 ± 1 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite cihazı ile yüklemeye tabi tutulmaktadır. Elde edilen stabilite değeri numunenin normal stabilite değerine bölünmesiyle RMS değeri elde edilmektedir. Deney sonucunda, yüksek RMS değerine sahip olan sıcak karışım numunelerinin su veya nem hasarlarına karşı daha yüksek dirence sahip olduğu değerlendirilmektedir (Geçkil vd., 2021).

3.3. Endirekt Çekme Mukavemeti Deneyi (Indirect Tensile Strength Test - ITS)

ITS deneyi, ısı ve yüklere maruz kalan sıcak karışım yol kaplamalarının bünyesinde meydana gelen çekme gerilmelerini simüle etmektedir. AASHTO T245 standardına göre gerçekleştirilen deney Marshall stabilite test cihazı kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde, silindirik numuneler dakikada 50mm'lik yüklenme hızında çap düzlemi doğrultusunda düşey olarak yüklemeye maruz bırakılarak kırılması sağlanır. Deney sonucunda, BSK kaplamalarda meydana gelen bu kırılmalar ile kaplamanın yapısı arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Ayrıca, kaplamanın sahip sertlik ve durabilitesi hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir. Karışım numunelerinin ITS değeri denklem (2) yardımı ile hesaplanabilmektedir (Geçkil vd., 2021; Ahmedzade vd. 2007).

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi t x d} \quad (2)$$

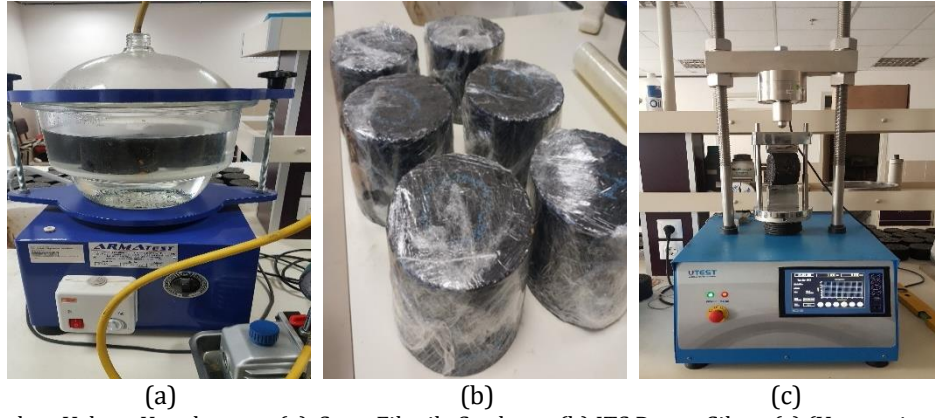
Denklem 2'de, P_{max} ; numuneye uygulanmış maksimum yükü, t ; numune kalınlığını, d ise numune çapını ifade etmektedir. Karışım numunelerinin ITS değerleri, BSK'nın kohezyon yeteneğine bağlı olarak değişmekte ve bu da büyük oranda bitümün özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Geçkil vd., 2021; Ahmedzade vd. 2007).

3.4. Su Hasarına Karşı Direnç (Resistance to Water Damage)

Su hassasiyeti, BSK kaplamaların su ile temas etmesinden sonra bünyesinde oluşan nem sebebiyle oluşabilecek hasara karşı göstermiş olduğu direnci ifade edilmektedir. Kaplamadaki su veya nemin varlığı, bitüm ile agrega arasındaki bağı zayıflatır ve kaplamada bozulmalara sebep olur. BSK kaplamalarda suya karşı hassasiyet AASHTO T283 standardı ile belirlenmektedir. Standarda göre BSK numuneleri "koşullandırılmamış" ve "koşullandırılmış" olmak üzere iki gruba ayrılarak değerlendirilir. Koşullandırılmamış numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Koşullandırılmış numuneler ise numunelerin hava boşlukları %60-80 su ile dolacak şekilde vakum işlemine (Şekil 6a) maruz bırakılır. Bunun ardından numuneler streç film (Şekil 6b) ile sarılarak 16 saat boyunca -18°C sıcaklıktaki dondurucuda bekletilir ve süre bitiminde bu numuneler 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Süre bitiminde banyodan alınan numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki banyosunda bekletilir. Bu işlemlerden sonra koşullandırılmamış (ITS_{kuru}) ve koşullandırılmış ($ITS_{yaş}$) numuneler Marshall cihazı kullanılarak endirekt çekme direnci (ITS) testine (Şekil 6c) tabi tutulur. Deney sonucunda BSK numunelerinin endirekt çekme direnci oranı (ITSR) değerleri denklem (3) yardımı ile hesaplanır.

$$ITSR = (ITS_{yaş}/ITS_{kuru}) \times 100 \quad (3)$$

BSK numunelerinin sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençleri bakımından ITSR değerlerinin %80'den daha fazla olması istenmektedir (Görkem ve Şengöz 2009; Geçkil vd., 2020).

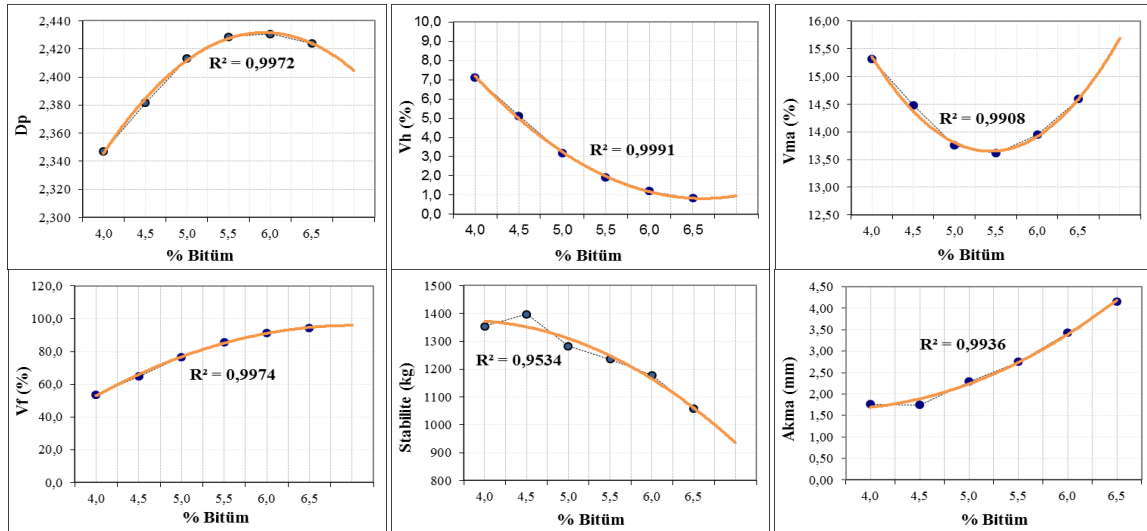


Şekil 6. Numunelere Vakum Uygulanması (a), Streç Film ile Sarılması (b) ITS Deney Cihazı (c) (Vacuuming The Samples (a), Wrapping With Stretch Film (b) ITS Test Device (c))

4. Bulgular (Findings)

4.1. Marshall Stabilite Sonuçları (Marshall Stability Results)

Karışım tasarımı için saf B 70/100 bitümü ve 1200 gr agregata kullanılarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bunun için sabit tutulan 1200 gr agreganın ağırlıkça %4; %4,5; %5; %5,5; %6; %6,5'i kadar bağlayıcı ilave edilerek her bir yüzdede üç karışım numunesi toplamda 18 karışım numunesi hazırlanmıştır. Her bir numunenin ağırlığı ve yüksekliği ölçüldükten sonra, hacim özgül ağırlığı (D_p), boşluk oranı (V_h), agregalar arası boşluk oranı (VMA) ve bitümlü dolu boşluk oranı (V_f) gibi hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Ardından tüm numunelerin stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanmış olan sıcak karışım numunelerinin elde edilen çeşitli hacimsel ve mekanik özelliklerinin bitümlü değişim grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. OBİ Belirlenmesinde Kullanılan Grafikler (Graphs Used in The Determination of OBI)

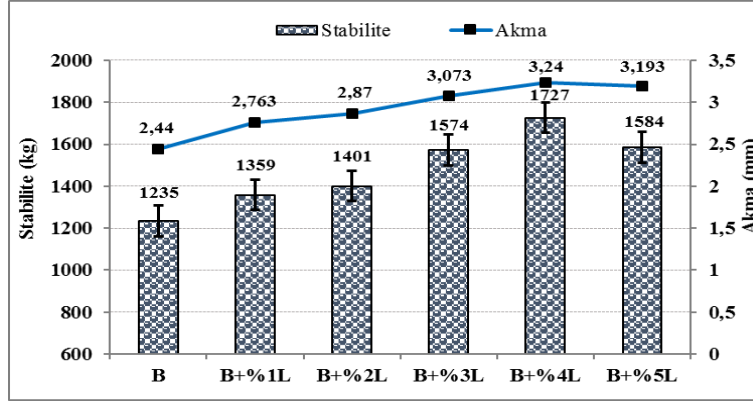
Tablo 7. Karışımların Hacimsel Özellikleri ve Marshall Stabilite-Akma Değerleri (Volumetric Properties And Marshall Stability-Flow Values of Mixtures)

| Karışım türü | D_p (gr/cm ³) | V_h (%) | VMA (%) | V_f (%) | Stabilite(kg) | Akma(mm) |
|--------------|-----------------------------|-----------|---------|-----------|---------------|----------|
| B (%5) | 2,40 | 3,91 | 14,39 | 72,81 | 1235 | 2,44 |
| B+%1L | 2,394 | 3,97 | 14,44 | 72,50 | 1359 | 2,763 |
| B+%2L | 2,402 | 3,66 | 14,16 | 74,14 | 1401 | 2,87 |
| B+%3L | 2,404 | 3,56 | 14,07 | 74,72 | 1574 | 3,073 |
| B+%4L | 2,398 | 3,81 | 14,29 | 73,37 | 1727 | 3,24 |
| B+%5L | 2,402 | 3,66 | 14,16 | 74,18 | 1584 | 3,193 |
| KTŞ | - | 3-5 | 14-16 | 65-75 | >900 | 2-4 |

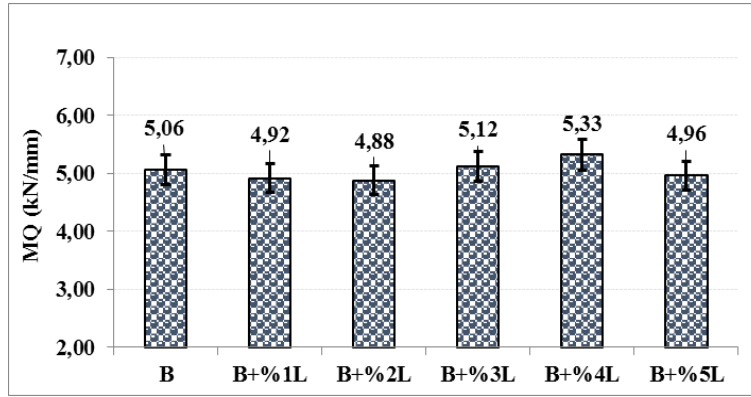
Şekil 7'de elde edilen grafikler kullanılarak, maksimum D_p (%6) ve stabilite (%4,5), %4 V_h için karşılık gelen değer (%4,8) ve %70 V_f için karşılık gelen değerlerin (%4,8) aritmetik ortalaması hesaplanarak OBİ %5 olarak tespit

edilmiştir. Bu OBİ oranında saf (B) numunesi hazırlandıktan sonra Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'nin asfalt betonu aşınma tabakasına ait olan maksimum ve minimum değerleri ile kıyaslaması yapılmış (Tablo 7) ve bu değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada, tespit edilen OBİ= %5 esas alınarak saf ve LDPE ilaveli sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve elde edilen değerler aynı tabloda gösterilmiştir. LDPE katkılı modifiye karışım numunelerinin saf karışım numuneleri ile kıyas yapılabilmesi amacıyla bu oran sabit tutulmuştur.

Saf ve LDPE ilaveli karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma değerleri Şekil 8'de, MQ değerleri ise Şekil 9'da verilmiştir.



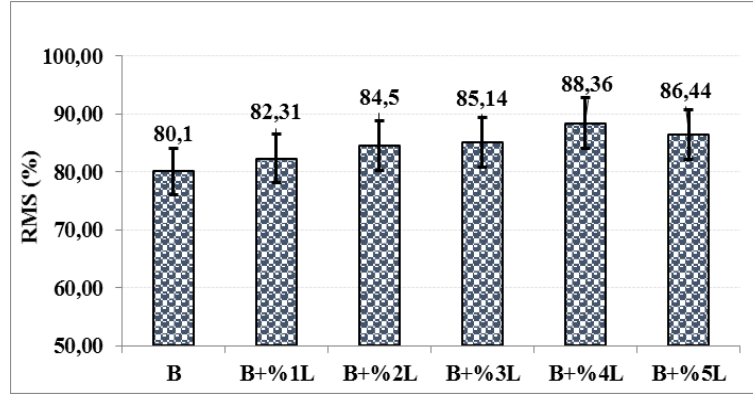
Şekil 8. Karışımların Marshall Stabilite-Akma Değerleri (Marshall Stability-Flow Values of Mixtures)



Şekil 9. Karışımların MQ Değerleri (MQ Values of Mixtures)

Şekil 8 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışıyla karışım numunelerinin stabilite değerlerinin giderek arttığı görülmektedir. Saf karışım numunesine göre LDPE katkılı karışımların stabilite değerlerindeki artış oranları sırasıyla %10; %13,4; %27,4; %39,8 ve %28,3 şeklindedir. Karışım numuneleri içerisindeki en yüksek stabilite değerine ise %4 LDPE katkılı karışım numunesinin ulaştığı görülmektedir. Bu durumda LDPE katkısının, kaplamaların kalıcı deformasyon direncini önemli derecede arttırdığını söylemek mümkündür. LDPE modifiyeli karışımların akma değerleri incelendiğinde ise (Şekil 8), katkı artışıyla akma değerlerinin büyük oranda artış gösterdiği görülmektedir. Saf karışıma göre meydana gelen artış oranları sırasıyla %13,2; %17,6; %25,9; %32,8 ve %30,9 şeklindedir. Akma değeri, BSK kaplamanın trafik yükleri altındaki esnek veya plastik davranışını karakterize eden bir değerdir. Saf karışıma göre en yüksek akma değeri %4 LDPE katkılı karışımında elde edilmiştir. LDPE katkısıyla karışımların akma değerinin artış göstermesi, kaplamanın kırılma anında esnek davranış sergileyeceğini göstermektedir. Şekil 9 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artmasıyla karışımların MQ değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışım numunesine göre sırasıyla %2,8; %3,6 azalma, %1,2; %5,3 artış ve %2 azalma şeklinde meydana gelmiştir. MQ, karışımların kayma gerilmelerine karşı direncinin bir ölçüsüdür. Elde edilen sonuçlardan LDPE katkısının, karışımların kayma gerilmelerine karşı direncini arttırdığını söylemek mümkündür.

Atık LDPE'nin BSK kaplamaların suya karşı hassasiyeti üzerindeki etkilerini belirlemek için saf ve LDPE modifiyeli karışım numunelerinin RMS değerleri tespit edilerek elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.

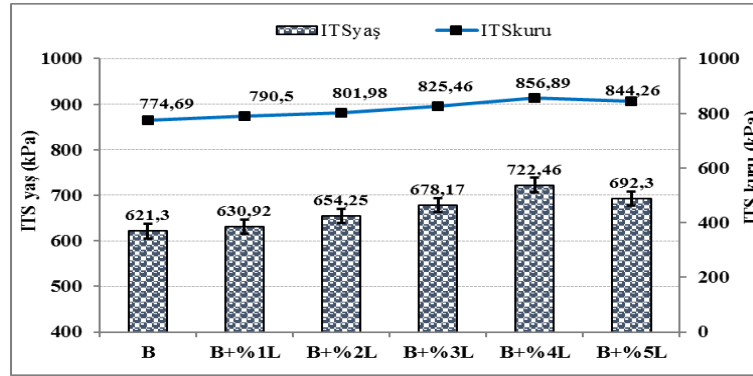


Şekil 10. Karışımların RMS Değerleri (RMS Values of Mixtures)

Şekil 10 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışı ile modifiye karışımların saf karışıma göre RMS değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu artışlar sırasıyla %2,8; %5,5; %6,3; %10,3 ve %7,9 şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, en yüksek RMS değerinin B+%4L karışımlardan elde edildiği ve dolayısıyla suya karşı hassasiyetin en az B+%4L karışımlar olduğu söylenebilir. LDPE katkısıyla RMS değerlerinin artış göstermesi, LDPE katkısının agrega ile asfalt arasındaki bağlanma yeteneği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve dolayısıyla da BSK kaplamanın sudan kaynaklı bozulmalara karşı direnci üzerinde artışa sebep olduğu belirtilebilir.

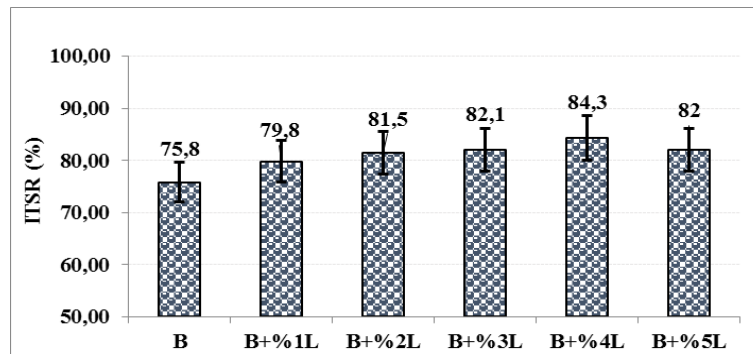
4.2. ITS ve Su Hasarı Direnci Sonuçları (ITS and Water Damage Resistance Results)

LDPE'nin BSK'nın sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençlerini belirlemek amacıyla, koşullandırılmış ve koşullandırılmamış saf ve LDPE modifiyeli karışım numunelerine ITS deneyi uygulanmıştır. Belirlenen ITS değerleri Şekil 11'de, ITSR değerleri ise Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 11. Karışımların ITS Değerleri (ITS Values of Mixtures)

Şekil 11 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışıyla ITS_{yaş} karışım numunelerinin indirekt çekme mukavemet değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %1,5; %5,3; %9,2; %16,3 ve %11,4 artış şeklindedir. ITS_{kuru} karışım numunelerinin indirekt çekme mukavemet değerlerinde meydana gelen değişimler ise saf karışıma kıyasla sırasıyla %2; %3,5; %6,6; %10,6 ve %9,0 artış şeklindedir. LDPE katkı oranının artışıyla karışım numunelerinin ITS_{yaş} ve ITS_{kuru} değerlerinin artış göstermesi, trafik yüklerine maruz kalan BSK kaplamaların yük altında oluşan çekme gerilmelerine karşı direncinin arttığını ifade etmektedir.



Şekil 12. Karışımların ITSR Değerleri (ITSR Values of Mixtures)

Şekil 12’de, LDPE katkı oranının artışıyla karışımların ITSR değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %5,3; %7,5; %8,3; %11,2 ve %8,2 artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek ITSR değeri B+%4L karışımlarda görülmüştür. LDPE modifiyeli karışımların, ITSR değerlerinin %80’in üzerinde olması, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı LDPE katkısının etkili olduğunu göstermektedir.

RMS ve ITSR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, LDPE katkısının BSK kaplamalarının suya karşı performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, %4 LDPE oranının kaplamaların adezyon ve kohezyon yeteneğini arttırmada etkili olduğu görülmüştür.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, atık LDPE katkısının bitümlü kaplamaların suya karşı performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Saf ve LDPE katkılı bağlayıcıların fiziksel test sonuçlarına göre, LDPE katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin arttığı, bitüm sınıfının %2 LDPE oranıyla birlikte 50/70 olarak değiştiği ve bu sebeple daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabilmesi görülmüştür.
2. Kimyasal analiz sonuçlarına göre, bitüm ile LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlandığı ve bitüm-TEOA-LDPE karışımının homojen tek fazlı bir yapıda davrandığı tespit edilmiştir.
3. Marshall stabilite sonuçlarına göre, LDPE katkısı ile karışımların stabilitesinin %39,8 kadar arttığı ve en yüksek stabilite değerinin B+%4L katkılı karışımlardan elde edildiği görülmüştür.
4. MQ sonuçlarına göre, LDPE katkısı ile MQ değerinin %5,3 artış ile B+%4L karışımlardan elde edildiği görülmüştür.
5. RMS sonuçlarına göre, LDPE ilavesiyle RMS değerinin %10,3 artış ile B+%4L karışımlardan elde edildiği ve bu oranda BSK’nın su etkilerine karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.
6. ITSR sonuçlarına göre, LDPE katkısıyla karışımların ITSR değerlerinin %11,2 artış ile B+%4L karışımlardan elde edildiği ve LDPE’nin yol kaplamalarının nem direncini iyileştirdiği görülmüştür.
7. Elde edilen bu olumlu sonuçların bitüm, TEOA ve LDPE arasında oluşan kimyasal etkileşim sebebiyle meydana gelen homojen tek fazlı bir bağlayıcı yapısından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, bir atık plastik çeşidi olan LDPE katkısının bitüm ve dolayısıyla karışım modifikasyonunda kullanılmasıyla BSK kaplamalarının suya karşı performansını arttırmada önemli bir etkiye sahip olduğu ifade edilebilir. Bu olumlu durumun yanında, atık LDPE’nin yol mühendisliğinde bir iyileştirici olarak kullanılmasıyla, bu atıkların çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararların ortadan kaldırılabilmesini söylemek mümkündür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından İÜ-BAP 2016/65 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- AASHTO, 1994. T245 Method Of Test For Resistance To Plastic Flow Of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, AASHTO.
- AASHTO, 1989. T283 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. AASHTO.
- Abhijith, G., Abhishek, R., Adithyan, S., Adwaith, P., Sivaselvi, K., 2019. Reinforcement of Bitumen Using Low Density Polyethylene and Green Sand. *Materials Today: Proceedings*, 18, 5057–5062.
- Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., 2007. The Effect of Carbon Black on the Mechanical Properties of Asphalt Mixtures. *Journal of Engineering and Natural Sciences Sigma*, 25(2), 179-189.
- Aksoy, A., Iskender, E., Oruç, Ş., Özen H., 2012. SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması. *İMO Teknik Dergi*, 80, 5967-5986.
- Al-Hadidy, A.I., Tan, Y., 2009. Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), 618-623.
- Almeida, A., Capita, S., Bandeira, R., Fonseca, M., Picado-Santos, L., 2020. Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 232, 117253.
- ASTM, 1992. C 127-88 Test Method for Specific Gravity and Adsorption of Coarse Aggregate, USA, ASTM International.

- ASTM, 1992. C128 Test Method for Specific Gravity and Adsorption of Fine Aggregate, USA, ASTM International.
- ASTM, 2013. D05 Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. USA, ASTM International.
- ASTM, 2014. D36 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-And-Ball Apparatus), USA, ASTM International.
- ASTM, 2008. D70 Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method), West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2013. D92 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2017. D113 Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2002. D1559 Standard Test Method for Marshal Test, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2015. D 4402 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using A Rotational Viscometer. USA, ASTM International.
- Awwab, M.T., Shbeeb, L., 2007. The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures. American Journal of Applied Sciences, 4(6), 390-396.
- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., Faqiri, A., 2020. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. Waste Management, 113, 157–175.
- Behl, A., Sharma, G., Kumar, G., 2014. A sustainable approach: utilization of waste PVC in asphaltting of roads. Construction and Building Materials 54, 113-117.
- Besergil, B., 2008. Polimer Kimyası (ikinci baskı). Gazi Kitabevi, Ankara.
- El-Maaty Behiry, A.E.A., 2013. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. Ain Shams Engineering Journal, 4 (3), 351-363.
- Gala, A., Guerrero, M., Serra, J.M., 2020, Characterization of post-consumer plastic film waste from mixed MSW in Spain: A key point for the successful implementation of sustainable plastic waste management strategies. Waste Management 111, 22–33.
- Geçkil, T., 2008. Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C.B., 2020. Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile Modifiye Edilmiş Saf Bitümün Fiziksel, Morfolojik ve Isıl Özellikleri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(1), 157-166.
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C.B., 2021. Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci. Politeknik Dergisi, 24(2), 461-471.
- Görkem, Ç., Şengöz, B., 2009. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. Construction and Building Materials, 23 (6), 2227–2236.
- Jung, M.R., Horgen, F.D., Orski, S.V., 2018. Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. Marine Pollution Bulletin, 127, 704–716.
- Kök, B.V., 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kumar, P., Chandra, S., Bose, S., 2006. Strength characteristics of polymer modified mixes. International Journal of Pavement Engineering, 7(1), 63–71.
- Leng, Z., Sreeram, A., Padhan, R.K., Tan, Z., 2018. Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). Journal of Cleaner Production, 196, 615-625.
- Nejres, M., Mustafa, Y.F., Aldewachi, H.S., 2020. Evaluation of natural asphalt properties treated with egg shell waste and low density polyethylene. International Journal of Pavement Engineering, 1029-8436.
- Njeru, J., 2006. The urban political ecology of plastic bag waste problem in Nairobi, Kenya. Geoforum, 37, 1046–1058.
- Nkanga, U.J., Joseph, J.A., Adams, F.V., Uche, O.U., 2017. Characterization of bitumen/plastic blends for flexible pavement application. Procedia Manufacturing, 7, 490-496.
- Özen, H., 2011. Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. Construction and Building Materials, 25(2), 756–765.
- Özyurt, H., 2020. Design And Properties Of Composite Sustainable Building Material By Using Waste HDPE. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 8(3), 777 – 782.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., Stastna, G., 2015. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. Advances in Colloid and Interface Science, 224, 72-112.
- Punith, V.S., Veeraragavan. A., 2007. Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. Journal of Materials in Civil Engineering, 19, 500-507.
- Sen, S.K., Raut, S., 2015. Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 3, 462–473.
- Soncu, S., Akkoyun M., 2020. Surface Free Energy And Flexural Properties Of Wollastonite Filled Polypropylene Composites, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 9(2), 389 – 395.
- TS, 2012. EN 933-3 Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi, TSE.
- TS, 2010. EN 1097-2 Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2 : Parçalanma direncinin tayini için metotlar, TSE.
- TS, 2010. EN 1367-2 Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, TSE.



AR-GE PROJE SEÇİM SÜRECİ İÇİN YENİ BİR ENTEGRE SEZGİSEL BULANIK GRUP KARAR VERME YAKLAŞIMI

Bahadır Fatih YILDIRIM^{1*}, Sultan KUZU YILDIRIM²

¹ İstanbul Üniversitesi, Ulaştırma ve Lojistik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Sayısal Yöntemler Bölümü, İstanbul, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|---|
| <i>Sezgisel Bulanık Sayılar, Gri İlişkisel Analiz, Sezgisel Bulanık Grup Karar Verme, Çok Kriterli Karar Verme.</i> | AR-GE projeleri ciddi yatırım ve işgücü planlaması gerektiren projelerdir. Başarılı bir şekilde organize edilen AR-GE projeleri, hem işletmeye hem de ülkeye önemli katma değer sağlamaktadır. Gerek fon sağlayan kurum, gerekse proje önerisinde bulunan işletme açısından uygun projenin değerlendirilmesi kompleks bir karar sürecidir. Bu çalışmada bir işletmenin AR-GE departmanı tarafından önerilen 4 proje alternatifi arasından, 2021 yılı için değerlendirmeye sunulacak en uygun AR-GE projesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Proje değerlendirme karar sürecinin etkinliğini artırmak üzere dilsel değişkenler ve bulanık sezgisel sayı karşılıkları ile alternatifler değerlendirilmiş ve karar matrisi oluşturulmuştur. Son adımda sezgisel bulanık gri ilişkisel analiz yöntemi uygulanarak en ideal projeye karar verilmiştir. Analiz sonucuna göre proje önerisi alternatifleri arasından A2'nin en ideal proje, A3'ün ise idealden uzak proje olduğu belirlenmiştir. Araştırmada, proje seçiminde kullanılmak üzere, grup kararını birleştiren ve karar sürecindeki belirsizliği azaltan yeni bir yaklaşım önerilmiştir. |

A NEW INTEGRATED INTUITIONISTIC FUZZY GROUP DECISION MAKING APPROACH FOR R&D PROJECT SELECTION PROCESS

| Keywords | Abstract |
|--|---|
| <i>Intuitionistic Fuzzy Numbers, Grey Relational Analysis, Intuitionistic Fuzzy Group Decision Making, Multi Criteria Decision Making.</i> | R&D projects require serious investment and workforce planning. Successfully organized R&D projects provide significant added value to both the business and the country. Evaluating the appropriate project for both the funding institution and the business proposing the project is a complex decision process. This study, it was aimed to determine the most suitable R&D project to be evaluated for 2021 among the 4 projects alternatives proposed by the R&D department of an enterprise. To increase the effectiveness of the project evaluation decision process, linguistic variables and intuitionistic fuzzy number equivalents and alternatives were evaluated and a decision matrix was created. In the last step, the most ideal project was determined by applying the intuitionistic fuzzy grey relational analysis method. According to the results of the analysis, it was determined that among the project proposal alternatives, A2 was the most ideal project and A3 was far from ideal. A new approach to the project selection process is proposed that unifies the group decision and reduces the uncertainty in the decision process. |

Alıntı / Cite

Yıldırım, B. F., Kuzu Yıldırım, S., (2022). AR-GE Proje Seçim Süreci İçin Yeni Bir Entegre Sezgisel Bulanık Grup Karar Verme Yaklaşımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 643-653.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. F. Yıldırım, 0000-0002-0475-741X
S. Kuzu Yıldırım, 0000-0001-6577-1584

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 29.07.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 23.02.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 27.02.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

* İlgili Yazar / Corresponding author: mbahadurf.yildirim@istanbul.edu.tr, +90-212-440-00-00

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde işletmeler, artan rekabet koşullarına uyum sağlamak, faaliyet gösterdiği sektörün dinamikleri ölçeğinde yaşanan gelişmeleri takip etmek ve sektörde öncü konumda bulunmasını sağlayacak araştırma geliştirme faaliyetleri yürütmek durumundadır. Kaynakların kıt ve sınırlı olduğu, gelişim ve değişim sürecinin ise çok hızlı olduğu bu dönemde işletmenin sahip olduğu finans, iş gücü kaynaklarını ve zamanı doğru alanda ve doğru projelerde değerlendirmesi işletmenin rekabet edebilirliğinde kritik öneme sahiptir. İçinde bulunduğumuz dönem, işletmelere mevcut kaynaklarını kullanmalarında hata şansı tanımamakta, etkin çıktı üretmeyen projeler, kıt kaynakların boşa harcanmasına, dolayısıyla işletmelerin rekabet avantajını kaybetmesine, hatta işletmenin varlığını sürdüremez hale gelmesine neden olmaktadır. Bilim ve teknolojiye ilerleme kaydetmek, yeni ürün ve sistemler üretmek amacıyla yürütülen AR-GE projeleri, işletmelere sağladığı avantajların yanı sıra devletler için de önem arz etmektedir. OECD tarafından yayımlanan, AR-GE ve ilgili kavramların açıklandığı Frascati kılavuzunda AR-GE, "İnsanlığın bilgi dağarcığının artırılmasına ve bu dağarcığın yeni uygulamalar tasarlamak üzere kullanılmasına ilişkin sistematik ve yaratıcı çalışmalar" olarak tanımlanmıştır (OECD, 2015). Günümüzde devletler ulusal çıkarları doğrultusunda belirledikleri politikalara uygun, düzenli ve sistemli AR-GE faaliyetlerinin yürütülmesini sağlamak amacıyla özel sektörün/akademinin AR-GE projelerine finansal destek sağlamakta, büyük ölçekli projelerde ortak olarak projelere dahil olmaktadır.

Kurum ve kuruluşların sahip oldukları kısıtlı kaynaklar göz önünde bulundurulduğunda bilimsel ve teknolojik hedeflerine katkı sağlayacak AR-GE projelerinin seçimi, içerisinde belirsizlik barındıran, kompleks ve bilgi yoğun bir karar problemi olarak ortaya çıkmaktadır. AR-GE projesi seçim ve değerlendirme süreci birbiri ile ilişkili ve çelişen çok kriter içeren, değerlendirmelerde ölçüm hatalarına sebebiyet verecek belirsizlikler barındıran bir süreçtir. Bu nedenle literatürde birçok araştırmacı tarafından etkin karar almayı sağlamak üzere matematik modeller kullanılarak seçim sürecinin incelendiği görülmektedir. Proje seçim süreci birden fazla alternatif ve birden fazla kriterden oluşan tipik bir Çok Kriterli Karar Verme problemidir. Literatürde farklı sektörlerde, farklı ölçeklerde işletme için proje seçim süreci ÇKKV yöntemleri ile incelenmiştir.

Bu çalışmada bir işletmenin AR-GE departmanında 2021 yılı içerisinde yürütülmesi muhtemel AR-GE projelerinden en uygun olanını belirlemek ve kaynak planlamasını en uygun projeyi baz alarak etkin bir şekilde hazırlamak üzere proje alternatifleri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda çalışma aşağıdaki başlıklarda organize edilmiştir. Çalışmanın izleyen 2. Bölümünde proje seçim sürecine yönelik ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı literatür incelenmiş, 3. Bölümde sezgisel bulanık sayılar hakkında teorik bilgilere değinildikten sonra 4. Bölümde Gri ilişkisel analiz yönteminin sezgisel bulanık sayılar ile genişletildiği Sezgisel Bulanık Gri İlişkisel Analiz yöntemi incelenmiştir. Ardından çalışmada incelenen işletmenin AR-GE departmanında hazırlanan 4 proje önerisinden 2021 yılı için değerlendirmeye alınacak en uygun projenin belirlenmesine yönelik uygulama yapılarak son bölümde bulgular, sonuçlar ve öneriler tartışılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

İşletmeler artan rekabet koşullarında varlıklarını korumak ve sürdürülebilir bir büyüme sağlamak için AR-GE projelerine daha çok önem vermektedir. AR-GE projelerinin seçimi ise oldukça karmaşık bir karar verme sürecidir. Bu süreç, fırsat ortamlarının araştırılması, proje seçeneklerinin oluşturulması, hem nitel hem de nicel olmak üzere birden çok niteliğin farklı paydaşlar tarafından değerlendirilmesi gibi birçok boyut içerir. Ayrıca işletmeler kısıtlı kaynaklarını rasyonel şekilde değerlendirebilmek için karşılaştığı alternatifler arasından en optimal seçimi yapmak zorundadır. Bu durumlar göz önüne alındığında AR-GE projelerinin seçim süreçlerinde Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinin oldukça yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Osawa ve Murakami (2002), işletme yöneticileri ve proje liderlerinin harcadığı zamanı azaltmak amacıyla, nitel ve nicel kriterleri göz önüne alan çok kriterli yeni bir metod önermiştir. Elektrik endüstrisinde 150 proje ile yapılan araştırmada yöntemin AR-GE projelerinin seçiminde faydalı olduğu belirtilmiştir. Hsu vd. (2003) ve Huang vd. (2008) bulanık AHP yöntemi ile devlet destekli AR-GE projelerinin seçim sürecini incelemişlerdir. Liang (2003), otomotiv sektöründeki AR-GE projelerinin değerlendirmesinde AHP yöntemini kullanmış, projelerin sonlandırılması veya devam etmesi yönündeki karar sürecini yapılandırmıştır. Wang vd.(2005), projelerin değerlendirilmesinde ulusal ekonomiye katkıları ve gelişmişlik düzeyine etkileri gibi kriterleri önemsemıştır. Araştırmada bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır. Lawson vd. (2006), KOBİ'lerin AR-GE projesi seçim kararında risk kriterlerini (teknik, ticari) de göz önünde bulunduran yeni bir hibrit model önermiştir. Mohanty vd. (2007), AR-GE projelerinin seçim sürecinde bulanık maliyet analizi ile birlikte bulanık ANP yöntemini kullanmışlardır. Önerilen bulanık yaklaşım ile tercihlerdeki belirsizliğin üstesinden gelmek amaçlanmıştır. Eilat vd. (2008) Veri Zarflama Analizini dengeli puan kartları ile genişleterek AR-GE projelerinin seçiminde yeni bir model önermiştir. Tolga ve Kahraman (2008), alternatif AR-GE projeleri arasından seçim yapmak için parasal (bulanık reel opsiyon

değeri) ve parasal olmayan (yetenek, başarı olasılığı, trendler vb.) kriterleri dikkate alan bulanık AHP yöntemi kullanmıştır.

Yakıcı Ayan ve Perçin (2012), Tolga (2008), AR-GE projelerinin seçiminde grup kararına dayalı bulanık TOPSIS modelini önermişlerdir. Yıldız (2014) Bulanık VIKOR yöntemini kullanarak proje seçim sürecini incelemiştir. Sarı (2017), AR-GE projelerini sıralarken entropi ağırlıklı TOPSIS yöntemini kullanmıştır. Endüstri işletmelerinin değerlendirmesine göre seçimdeki en önemli kriter projede kullanılması gereken personel sayısını minimum yapma isteği iken ikinci kriter projenin süresidir. Güler vd. (2018), TOPSIS ve DEMATEL yöntemleri ile küçük bir işletmenin AR-GE projelerini önceliklendirmiştir.

Bayraktaroğlu ve Kundakçı (2019), bulanık EDAS yöntemi ile Denizli'de faaliyet gösteren bir işletmenin AR-GE merkezinde proje seçimi için bir karar modeli önermiştir. Üç uzman karar vericinin değerlendirme kriterleri göz önüne alındığında, projenin AR-GE niteliği ve ortaya çıkan ürünün pazarda ilk niteliği taşıması proje seçiminde etkili faktörler olarak belirlenmiştir. Binici ve Aksakal (2020), UTA yöntemi ile AR-GE projelerinin seçiminin yapıldığı bir yarışmada projelerin değerlendirme sürecini incelemiştir. Marjinal faydayı dikkate alan bu yöntem ile projelerin daha etkin ve doğru şekilde sıralandığını ileri sürmüşlerdir. Kurt ve Yıldız (2020), AR-GE/İnovasyon projelerinin değerlendirilmesi için bulanık TOPSIS tabanlı karar modeli önermiştir.

AR-GE proje seçim problemleri haricinde bu çalışmada kullanılan yöntem ile benzerlik gösteren çalışmalardan Aydemir ve Şahin (2019), sağlık hizmet kalitesi ve müşteri memnuniyetini etkileyen faktörleri gri ilişkisel analiz (GRA) yöntemi kullanılarak değerlendirmiştir. Yurtyapan ve Aydemir (2022), işletmeler için uygun ERP yazılımını seçmek üzere sezgisel bulanık ve aralıklı gri sayı tabanlı MACBETH yöntemi kullanmışlardır. Şahin ve Aydemir (2021), CNC makine seçimi probleminde, güçlü-zayıf yöntemiyle kriterler ağırlıklarını belirleyerek gri ilişkisel analizi, COPRAS, ve MULTIMOORA metodları ile 3 sıralama elde etmişlerdir. Altan Koyuncu vd.(2021), bir imalat şirketinin Endüstri 4.0'ı göz önünde bulundurarak değerlendireceği uygunluk modelini belirlemek için bulanık TOPSIS (FTOPSIS) ve sezgisel bulanık TOPSIS (IFTOPSIS) yöntemlerini kullanmışlardır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Sezgisel Bulanık Küme ve Sayılar (Intuitionistic Fuzzy Sets and Numbers)

Zadeh (1965) tarafından geliştirilen bulanık küme kavramı, karar problemi gibi gerçek dünya problemlerinde, insan yargı ve düşüncelerinin yer aldığı karmaşık sistemlerde ikili üyelik fonksiyonu ile ifade edilen klasik kümelerin yetersiz kalmasından yola çıkarak geliştirilmiştir. Bulanık küme teorisi muğlaklık ve belirsizliğin üstesinden gelmede etkin bir araç olarak ekonomi, mühendislik, yönetim gibi birçok farklı alanda başarı ile uygulanmıştır. Bulanık küme teorisi ile belirsizlik, olasılık teorisinin bir elemanı olarak rassallık ile eşanamlı olarak kullanılması yerine çok boyutlu bir kavram olarak ele alınmaya başlanmış ve rassallığın belirsizlik ile eşlenik olmadığı, belirsizlik kavramının sadece bir alt başlığı olduğu kabul edilmiştir (Yıldırım, 2019).

Bulanık Küme teorisinde üyelik derecesi, niteliklerin dereceli üyelik fonksiyonları ile ifade edilmesini önermektedir. Bulanık kümelerde üyelik derecesi $[0,1]$ aralığındaki tüm değerleri alabilmekte iken klasik kümelerde sadece 0 ya da 1 değerini alabilmektedir.

Zadeh'in önerdiği ve geleneksel olarak kabul edilen bulanık küme teorisi, farklı araştırmacıların farklı eklemeleri ile farklı yaklaşımlar olarak genişletilmiştir. Bunlar arasında literatürde kabul görmüş olan Atanassov (1986) tarafından geliştirilmiş sezgisel bulanık küme teorisi birçok alanda uygulanmıştır. Zadeh'in bulanık küme teorisi sadece $[0,1]$ aralığında tanımlı üyelik derecesini gösterecek şekilde modellenmişken, Atanassov'un sezgisel bulanık küme teorisinde geleneksel bulanık küme teorisinden farklı olarak üyelik derecesine ek olarak üye olmama (non-membership) derecesi de tanımlanmıştır. Sezgisel bulanık küme teorisinde hem üyelik hem de üye olmama dereceleri $[0,1]$ aralığında yer almaktadır. Geleneksel bulanık küme teorisinde üyelik derecesi ve üye olmama derecesi toplamı 1 olarak hesaplanmakta ancak sezgisel bulanık küme teorisinde bu iki parametrenin toplamı 1 olmak zorunda değildir. Atanassov bu toplamı 1'e tamamlamak üzere hesistancy degree (tereddüt derecesi) isimli üçüncü bir parametre tanımlamıştır. Bu bakımdan sezgisel bulanık küme teorisinin belirsizliğin üstesinden gelmede geleneksel bulanık küme teorisinden daha etkin olduğu yapılan çalışmalar ile saptanmıştır (Xu, 2007b).

X boş olmayan bir küme olmak üzere X 'de tanımlı A sezgisel bulanık kümesi

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

eşitliği ile gösterilir. x elemanın kümeye ait olma derecesi $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ ve ait olmama derecesi $\nu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ ile tanımlanır.

$$0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1, \quad \forall x \in X \quad (2)$$

sezgisel bulanık küme teorisinde üçüncü parametre olarak tanımlanan tereddüt derecesi π_A , $0 \leq \pi_A(x) \leq 1, \quad \forall x \in X$ koşulunu sağlar ve

$$\pi_A = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x) \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Sezgisel bulanık küme teorisinde kullanılan sezgisel bulanık sayılar (SBS) için tanımlanmış temel aritmetik operatörler (Yazdani et al., 2016, Yazdani et al., 2017), $a = (\mu_a, \nu_a)$ ve $b = (\mu_b, \nu_b)$ sezgisel bulanık sayılar olmak üzere;

$$a + b = (\mu_a + \mu_b - \mu_a \mu_b, \nu_a \nu_b) \quad (4)$$

$$a \times b = (\mu_a \mu_b, \nu_a + \nu_b - \nu_a \nu_b) \quad (5)$$

$$\lambda \cdot a = (1 - (1 - \mu_a)^\lambda, \nu_a^\lambda), \quad \lambda > 0 \quad (6)$$

$$a^\lambda = (\mu_a^\lambda, 1 - (1 - \nu_a)^\lambda), \quad \lambda > 0 \quad (7)$$

eşitlikleri ile gösterilmektedir.

3.2. Sezgisel Bulanık Gri İlişkisel Analiz (Intuitionistic Fuzzy Grey Relational Analysis)

Gri sistem teorisi özellikle gri ilişkisel analiz uygulamaları yönüyle farklı kullanım alanlarına sahiptir. Gri sistem teorisinde, sisteme etki eden faktörlerin belirlenebilmesi için gri ilişki analizi ve belirsizlik altında gri karar verme süreçlerine ilişkin modeller geliştirilmektedir (Aydemir vd., 2013). Gri ilişkisel analiz yönteminin sezgisel bulanık sayılar üzerinden analiz edilme aşamaları aşağıda verilmiştir.

Adım 1. Karar verici grup tarafından sezgisel bulanık karar matrislerinin oluşturulması.

m adet alternatifin n adet kritere göre t adet karar verici tarafından değerlendirildiği bir karar modelinde, i . alternatifin j kriterine göre k . karar verici tarafından yapılan değerlendirmesi $r_{ij}^{(k)} = (\mu_{ij}^{(k)}, \nu_{ij}^{(k)}, \pi_{ij}^{(k)})$, Tablo 1.'de yer alan dilsel değerlendirme ölçeği kullanılarak elde edilir. Bu adımda karar vericilerin tekil dilsel değerlendirmeleri Tablo 1'de yer alan sezgisel bulanık sayı karşılıklarına göre bir karar matrisine yazılır. Böylece her bir karar verici için R^k karar matrisi elde edilir.

$$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11}^{(k)} & r_{12}^{(k)} & L & r_{1n}^{(k)} \\ r_{21}^{(k)} & r_{22}^{(k)} & L & r_{2n}^{(k)} \\ M & M & & M \\ r_{m1}^{(k)} & r_{m2}^{(k)} & L & r_{mn}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad k \in T, \quad (8)$$

Tablo 1. Alternatif değerlendirme için dilsel ifadeler ve sezgisel bulanık sayı karşılıkları (Linguistic terms and equivalent intuitionistic fuzzy numbers for evaluating alternatives)

| Dilsel İfade | Sezgisel Bulanık Sayı |
|-----------------------|-----------------------|
| Kesinlikle Zayıf (EP) | (0,05; 0,95; 0,00) |
| Çok Zayıf (VP) | (0,15; 0,80; 0,05) |
| Zayıf (P) | (0,25; 0,65; 0,10) |
| Ortalama Zayıf (MP) | (0,35; 0,55; 0,10) |
| Ortalama (F) | (0,50; 0,40; 0,10) |
| Ortalama Güçlü (MG) | (0,65; 0,25; 0,10) |
| Güçlü (G) | (0,75; 0,15; 0,10) |
| Çok Güçlü (VG) | (0,85; 0,10; 0,05) |
| Kesinlikle Güçlü (EG) | (0,95; 0,05; 0,00) |

Adım 2. Karar vericilerin ağırlıklarının belirlenmesi.

Karar sürecinde karar verici grubun üyelerinin değerlendirmelerinin karar sürecinde ne derece etkili olacağını belirlemek üzere, karar vericinin önem derecesi diğer bir ifade ile ağırlığı Tablo 2.'de yer alan dilsel değişkenler kullanılarak belirlenir. Ardından tabloda yer alan sezgisel bulanık sayı karşılıklarına göre işlem yapılır.

Tablo 2. Karar verici ağırlıklandırma için dilsel ifadeler ve sezgisel bulanık sayı karşılıkları (Linguistic terms and equivalent intuitionistic fuzzy numbers for weighting DMs)

| Dilsel İfade | Sezgisel Bulanık Sayı |
|------------------|-----------------------|
| Çok önemli (VI) | (0,90; 0,05; 0,05) |
| Önemli (I) | (0,75; 0,20; 0,05) |
| Ortalama (M) | (0,50; 0,40; 0,10) |
| Önemsiz (U) | (0,25; 0,60; 0,15) |
| Çok Önemsiz (VU) | (0,10; 0,80; 0,10) |

$KV_k = (\mu_k, \nu_k, \pi_k)$ k . karar vericinin sezgisel bulanık skorunu göstermek üzere, bu karar vericinin ağırlığı Eşitlik (9) kullanılarak hesaplanır (Boran vd., 2009).

$$\lambda_k = \frac{\left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + \nu_k} \right) \right)}{\sum_{k=1}^t \left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + \nu_k} \right) \right)}, \quad \sum_{k=1}^t \lambda_k = 1 \quad (9)$$

Adım 3. Bütünleşik karar matrisinin elde edilmesi.

Grup karar verme sürecinin işletildiği karar problemlerinde karar vericilerin tekil değerlendirmelerinin tek bir karar matrisinde birleştirilmesi diğer bir ifade ile bütünleşik karar matrisinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiş sezgisel bulanık operatörler bulunmakla birlikte bu çalışmada karar vericilerin ağırlıklarının ortalama hesaplama sürecine dahil edilmesine olanak sağladığı için Xu (2007a) tarafından önerilen Sezgisel Bulanık Ağırlıklı Ortalama (IFWA) operatörü kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} r_{ij} &= IFWA_{\lambda} \left(r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(t)} \right) \\ &= \lambda_1 r_{ij}^{(1)} \oplus \lambda_2 r_{ij}^{(2)} \oplus \dots \oplus \lambda_t r_{ij}^{(t)} \\ &= \left(1 - \prod_{k=1}^t (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^t \left((\nu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} \right), \prod_{k=1}^t (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} - \prod_{k=1}^t \left((\nu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} \right) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Adım 4. Kriter ağırlıklarının belirlenmesi.

Karar probleminde hangi kriterin karar modeline ne oranda etki edeceğinin bir ölçüsü olarak kriterlerin ağırlıklarının (önem derecelerinin) hesaplanması gerekmektedir. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde (Vlachos ve Sergiadis, 2007) tarafından önerilen sezgisel bulanık entropi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre öncelikle her bir kriter için entropi değeri Eşitlik (11) ve (12) kullanılarak belirlenir. Entropi yöntemi karar vericilerin değerlendirme yapmaksızın karar matrisinin incelenerek objektif bir ağırlıklandırma yapılmasına imkan tanımaktadır.

$$H_j = -\frac{1}{n \ln 2} \sum_{i=1}^m \left[\mu_{ij} \ln \mu_{ij} + \nu_{ij} \ln \nu_{ij} - (1 - \pi_{ij}) \ln (1 - \pi_{ij}) - \pi_{ij} \ln 2 \right] \quad (11)$$

$$E(I) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\min(\mu_I(x_i), \nu_I(x_i)) + \pi_I(x_i)}{\max(\mu_I(x_i), \nu_I(x_i)) + \pi_I(x_i)} \quad (12)$$

Elde edilen entropi değerleri Eşitlik (13) yardımıyla kriterlere ait ağırlıkların hesaplanmasında kullanılır.

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (13)$$

Adım 5. Referans serinin belirlenmesi.

Referans seri her bir kritere ait optimal değeri barındıran seridir. Sezgisel bulanık karar matrisinde maksimum değer olan $\alpha^+ = (1, 0, 0)$, her bir kriter için referans değeri olarak kullanılır.

$$r_0 = (r_{0j})_{1 \times n} = [\alpha^+, \alpha^+ L \alpha^+] \quad (14)$$

Adım 6. Gri ilişkisel katsayının hesaplanması

İki sezgisel bulanık sayı arasındaki mesafeyi hesaplamak üzere Eşitlik (8) kullanılır. (Xu ve Yager, 2008; Szmidt ve Kacprzyk, 2000):

$$d(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{2} (|\mu_{\alpha_1} - \mu_{\alpha_2}| + |\nu_{\alpha_1} - \nu_{\alpha_2}| + |\pi_{\alpha_1} - \pi_{\alpha_2}|) \quad (15)$$

Gri ilişkisel katsayı alternatifin performans skorunun (r_{ij}), referans skora (r_{0j}) uzaklığını belirlemek üzere hesaplanır. Gri ilişkisel katsayı büyüdükçe r_{ij} 'nin r_{0j} 'ye yakınlığı söylenebilir. Gri ilişkisel katsayı Eşitlik (16) kullanılarak hesaplanır.

$$\xi_{ij} = \frac{\delta_{\min} + \rho \delta_{\max}}{\delta_{ij} + \rho \delta_{\max}}, \quad i \in M, \quad j \in N, \quad (16)$$

Eşitlikte yer alan ρ , ayırıcı katsayı olup 0 ile 1 arasında değerler alır, $\rho \in [0, 1]$. ρ , sıfıra yaklaştıkça (azaldıkça) gri ilişkisel katsayının aralığı genişlemektedir. Literatürde genellikle $\rho = 0,5$ olarak kullanılmaktadır.

Adım 7. Gri ilişkisel derecenin belirlenmesi.

Gri ilişkisel katsayılar hesaplandıktan sonra her bir alternatifin gri ilişkisel derecesi Eşitlik (10) kullanılarak hesaplanır.

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \xi_{ij}, \quad i \in M \quad (17)$$

Adım 8. Alternatiflerin sıralanması.

Bir önceki adımda elde edilen gri ilişkisel dereceler büyükten küçüğe sıralanarak alternatiflerin sıralaması elde edilir.

4. AR-GE Proje Seçiminde Sezgisel Bulanık Gri İlişkisel Analiz Uygulaması (An Application of Intuitionistic Fuzzy GRA in R&D Project Selection)

Çalışmanın uygulama kısmında bir işletmede AR-GE departmanında hazırlanan 4 proje önerisinden 2021 yılı için değerlendirmeye alınacak en uygun projenin belirlenmesi, bir karar problemi olarak incelenmiştir. Çalışmada

işletme gizliliği nedeniyle sektör bilgisi ve proje isimleri paylaşılmamıştır. İşletme belirleyeceği en uygun proje önerisi ile üniversite sanayii işbirliği kapsamında TÜBİTAK 1501 Sanayi AR-GE Projeleri Destekleme Programı'na başvuruda bulunacağı için karar probleminde kullanılan kriter seti, TÜBİTAK tarafından değerlendirilmede kullanılmak üzere belirlenen (i) *Endüstriyel AR-GE içeriği, teknoloji düzeyi, yenilikçi yönü*, (ii) *Proje planının ve kuruluş altyapısının proje için uygunluğu* (iii) *Proje çıktılarının ekonomik yarara ve ulusal kazanıma dönüştürülebilirliği* boyutları gözetilerek Tuzkaya ve Yolcu (2015) ve Kas Bayrakdaroğlu ve Kundakçı (2019) tarafından derlenen kriterlerden oluşturulmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. Kriter Seti (Criteria set)

| Kod | Kriter |
|-----|---|
| C1 | Proje yönetimi ve yöntem yönünden yapılabilirlik |
| C2 | Altyapı ve ekipman yönünden yapılabilirlik |
| C3 | Proje ekibi yönünden yapılabilirlik |
| C4 | Proje bütçesi |
| C5 | Yatırımın geri dönüş süresi |
| C6 | AR-GE riskleri |
| C7 | Pazar riskleri |
| C8 | Finansal riskler |
| C9 | Zaman kısıtı |
| C10 | Paydaş ihtiyaçları bakımından önemi |
| C11 | Katma değer |
| C12 | AR-GE niteliği |
| C13 | Ulusal/uluslararası pazarda ilk olma |
| C14 | Akademik çıktı ve yeni buluşlara olanak sağlaması |

İşletmenin AR-GE departmanı direktörü ve birim uzmanı ile danışman olarak proje ekibinde yer alan bir akademisyenden oluşturulan karar verici grup üyelerinin önem dereceleri Tablo 2'de yer alan dilsel değişkenler kullanılarak belirlenmiştir. Ardından Eşitlik (9) yardımıyla karar verici grubun üyelerinin ağırlıkları belirlenmiş olup Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Karar verici grubun önem dereceleri (Importance level of the decision-makers)

| Karar Verici | Dilsel Değerlendirme | SBS Karşılığı | Eşitlik (9) | λ_k |
|--------------|----------------------|--------------------|-------------|-------------|
| KV1 | I | [0,75; 0,20; 0,05] | 0,789 | 0,344 |
| KV2 | VI | [0,90; 0,05; 0,05] | 0,947 | 0,413 |
| KV3 | M | [0,50; 0,40; 0,10] | 0,556 | 0,242 |
| Toplam | | | 2,292 | 1,000 |

Tablo 4'te yer alan ağırlıklar incelendiğinde karar vericilerin önem dereceleri sırasıyla 34,4 %, 41,3 % ve 24,2 % olarak belirlenmiştir.

Karar verici grubun ağırlıkları belirlendikten sonra her bir karar verici bir diğer karar vericilerden bağımsız olmak üzere Tablo 1'de yer alan dilsel değişkenler yardımıyla proje alternatiflerini her bir kritere göre skorlamışlardır. Karar verici grubun değerlendirmeleri Tablo 5'te birleştirilmiş olarak gösterilmiştir.

Tablo 5. Karar vericilerin proje alternatiflerine ait dilsel değerlendirmeleri (Linguistic evaluations of the project alternatives by the decision makers)

| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A1 | KV1 | VG | MG | G | EG | EG | G | F | EG | P | EP | F | G | P | MP |
| | KV2 | G | MG | G | G | VG | VG | MG | F | F | VP | F | G | P | F |
| | KV3 | G | G | VG | EG | VG | F | VP | MG | F | EP | EG | VP | EP | VP |
| A2 | KV1 | MG | G | VG | G | G | EG | VG | F | P | EG | VG | EG | G | MP |
| | KV2 | F | G | G | VG | G | MP | G | EP | F | F | EG | G | VG | F |
| | KV3 | MG | VG | VG | MG | G | P | VG | EG | MP | P | MP | MG | P | EG |
| A3 | KV1 | F | VG | VG | VG | VG | EP | VP | G | MP | F | F | EP | VG | EP |
| | KV2 | F | MG | MP | F | F | EP | MP | VP | VP | EP | P | MG | G | VP |
| | KV3 | G | G | MP | VG | MG | MG | EG | EG | F | VP | EP | EG | MG | P |
| A4 | KV1 | F | MG | F | G | G | MP | MP | EG | P | G | P | EP | P | EG |
| | KV2 | G | MG | MG | F | G | P | VP | G | G | G | P | VP | G | EG |
| | KV3 | VG | G | F | VG | MG | VP | VG | F | P | VP | MP | MG | F | F |

Tablo 5'te yer alan dilsel değerlendirmelerin sezgisel bulanık sayı karşılıkları Tablo 1'den derlenerek analize devam edilmiştir.

Karar vericilerin tekil değerlendirmelerini tek bir grup kararına indirgenmek için sezgisel bulanık ağırlıklı Ortalama (IFWA) operatörü Eşitlik (10) kullanılarak uygulanmıştır. Bu işlemin ardından hesaplanan ve gri ilişkisel analiz yönteminde değerlendirilecek olan sezgisel bulanık karar matrisi Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Birleştirilmiş Sezgisel Bulanık Karar Matrisi (Aggregated intuitionistic fuzzy decision matrix)

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A1 | [0,79; 0,13; 0,08] | [0,68; 0,22; 0,1] | [0,78; 0,14; 0,08] | [0,9; 0,08; 0,02] | [0,9; 0,08; 0,02] | [0,76; 0,16; 0,08] | [0,51; 0,39; 0,1] |
| A2 | [0,59; 0,3; 0,1] | [0,78; 0,14; 0,08] | [0,81; 0,12; 0,07] | [0,78; 0,14; 0,08] | [0,75; 0,15; 0,1] | [0,72; 0,25; 0,03] | [0,81; 0,12; 0,07] |
| A3 | [0,58; 0,32; 0,11] | [0,76; 0,16; 0,08] | [0,61; 0,31; 0,09] | [0,75; 0,18; 0,07] | [0,7; 0,22; 0,08] | [0,25; 0,69; 0,06] | [0,62; 0,35; 0,03] |
| A4 | [0,72; 0,19; 0,09] | [0,68; 0,22; 0,1] | [0,57; 0,33; 0,1] | [0,71; 0,2; 0,09] | [0,73; 0,17; 0,1] | [0,26; 0,65; 0,09] | [0,49; 0,42; 0,08] |
| | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 |
| A1 | [0,79; 0,17; 0,03] | [0,43; 0,47; 0,1] | [0,09; 0,88; 0,02] | [0,71; 0,24; 0,04] | [0,66; 0,23; 0,11] | [0,21; 0,71; 0,08] | [0,38; 0,53; 0,09] |
| A2 | [0,63; 0,35; 0,03] | [0,39; 0,51; 0,1] | [0,75; 0,22; 0,03] | [0,86; 0,11; 0,02] | [0,84; 0,12; 0,04] | [0,74; 0,18; 0,08] | [0,69; 0,27; 0,04] |
| A3 | [0,72; 0,23; 0,05] | [0,32; 0,59; 0,09] | [0,26; 0,68; 0,06] | [0,31; 0,6; 0,09] | [0,69; 0,27; 0,04] | [0,77; 0,15; 0,08] | [0,14; 0,81; 0,05] |
| A4 | [0,83; 0,13; 0,04] | [0,52; 0,35; 0,12] | [0,66; 0,23; 0,11] | [0,28; 0,62; 0,1] | [0,29; 0,64; 0,07] | [0,57; 0,32; 0,12] | [0,91; 0,08; 0] |

Tablo 6'da gösterilen birleştirilmiş sezgisel bulanık karar matrisi Eşitlik (11)-(13) kullanılarak kriterlere ait önem dereceleri belirlenmiş, Tablo 7'de özetlenmiştir.

Tablo 7. Kriter ağırlıkları (Criteria weights)

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H_j | 0,248 | 0,233 | 0,238 | 0,188 | 0,194 | 0,248 | 0,270 |
| w_j | 0,070 | 0,072 | 0,071 | 0,076 | 0,075 | 0,070 | 0,068 |
| | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 |
| H_j | 0,223 | 0,299 | 0,215 | 0,236 | 0,247 | 0,240 | 0,225 |
| w_j | 0,073 | 0,066 | 0,073 | 0,071 | 0,070 | 0,071 | 0,072 |

Kriterlerin önem dereceleri belirlendikten sonra Eşitlik (14)'de gösterildiği üzere referans seri oluşturulmuştur. Kriterlerin tamamı fayda yönlü olduğu için (maksimizasyon) referans seri değerleri en büyük sezgisel bulanık sayı olan [1; 0; 0] değerlerinden oluşturulmuştur.

Tablo 5'te yer alan karar matrisi referans seri (A_0) ve kriter ağırlıkları (w) ile genişletilerek Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Nihai Sezgisel Bulanık Karar Matrisi (Intuitionistic fuzzy decision matrix)

| w_j | 0,070 | 0,072 | 0,071 | 0,076 | 0,075 | 0,070 | 0,068 |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
| A0 | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] |
| A1 | [0,79; 0,13; 0,08] | [0,68; 0,22; 0,1] | [0,78; 0,14; 0,08] | [0,9; 0,08; 0,02] | [0,9; 0,08; 0,02] | [0,76; 0,16; 0,08] | [0,51; 0,39; 0,1] |
| A2 | [0,59; 0,3; 0,1] | [0,78; 0,14; 0,08] | [0,81; 0,12; 0,07] | [0,78; 0,14; 0,08] | [0,75; 0,15; 0,1] | [0,72; 0,25; 0,03] | [0,81; 0,12; 0,07] |
| A3 | [0,58; 0,32; 0,11] | [0,76; 0,16; 0,08] | [0,61; 0,31; 0,09] | [0,75; 0,18; 0,07] | [0,7; 0,22; 0,08] | [0,25; 0,69; 0,06] | [0,62; 0,35; 0,03] |
| A4 | [0,72; 0,19; 0,09] | [0,68; 0,22; 0,1] | [0,57; 0,33; 0,1] | [0,71; 0,2; 0,09] | [0,73; 0,17; 0,1] | [0,26; 0,65; 0,09] | [0,49; 0,42; 0,08] |
| w_j | 0,073 | 0,066 | 0,073 | 0,071 | 0,070 | 0,071 | 0,072 |
| | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 |
| A0 | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] | [1; 0; 0] |
| A1 | [0,79; 0,17; 0,03] | [0,43; 0,47; 0,1] | [0,09; 0,88; 0,02] | [0,71; 0,24; 0,04] | [0,66; 0,23; 0,11] | [0,21; 0,71; 0,08] | [0,38; 0,53; 0,09] |
| A2 | [0,63; 0,35; 0,03] | [0,39; 0,51; 0,1] | [0,75; 0,22; 0,03] | [0,86; 0,11; 0,02] | [0,84; 0,12; 0,04] | [0,74; 0,18; 0,08] | [0,69; 0,27; 0,04] |
| A3 | [0,72; 0,23; 0,05] | [0,32; 0,59; 0,09] | [0,26; 0,68; 0,06] | [0,31; 0,6; 0,09] | [0,69; 0,27; 0,04] | [0,77; 0,15; 0,08] | [0,14; 0,81; 0,05] |
| A4 | [0,83; 0,13; 0,04] | [0,52; 0,35; 0,12] | [0,66; 0,23; 0,11] | [0,28; 0,62; 0,1] | [0,29; 0,64; 0,07] | [0,57; 0,32; 0,12] | [0,91; 0,08; 0] |

Referans seri ve kriter ağırlıkları ile genişletilen karar matrisinde her bir alternatifin her bir kriterine göre performans skorunun referans seriye olan uzaklıkları Eşitlik (15) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Alternatiflerin referans seriye uzaklıkları (Distances of alternatives to reference serie)

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | Min | Max |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|------|
| A1 | 0,21 | 0,32 | 0,22 | 0,10 | 0,10 | 0,24 | 0,49 | 0,21 | 0,57 | 0,91 | 0,29 | 0,34 | 0,79 | 0,62 | 0,10 | 0,91 |
| A2 | 0,41 | 0,22 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,19 | 0,37 | 0,61 | 0,25 | 0,14 | 0,16 | 0,26 | 0,31 | 0,14 | 0,61 |
| A3 | 0,42 | 0,24 | 0,39 | 0,25 | 0,30 | 0,75 | 0,38 | 0,28 | 0,68 | 0,74 | 0,69 | 0,31 | 0,23 | 0,86 | 0,23 | 0,86 |
| A4 | 0,28 | 0,32 | 0,43 | 0,29 | 0,27 | 0,74 | 0,51 | 0,17 | 0,48 | 0,34 | 0,72 | 0,71 | 0,43 | 0,09 | 0,09 | 0,74 |
| | | | | | | | | | | | | | | | Δ | 0,09 |

Tablo 9’da yer alan veriler $\rho = 0,5$ ayırıcı katsayısı ile birlikte Eşitlik (16)’da kullanılarak gri ilişkisel katsayılar hesaplanmıştır. Bu işlemin ardından gri ilişkisel katsayılar sezgisel bulanık entropi yöntemi ile hesaplanmış ağırlık katsayıları ile çarpım toplamı alınarak Eşitlik (17) gri ilişkisel dereceler belirlenmiş ve gri ilişkisel dereceler büyükten küçüğe olacak şekilde proje önerisi alternatifleri sıralanmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen gri ilişkisel katsayı ve dereceler ile proje önerisi alternatiflerine ait sıralamalar Tablo 10’da gösterilmiştir.

Tablo 10. Gri ilişkisel katsayı ve dereceler ile alternatif sıralamaları (Grey relational coefficients, grey relational degrees and alternative rankings)

| w_j | 0,070 | 0,072 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | γ_i | Sıra |
|------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | | |
| A1 ξ_1 | 0,82 | 0,70 | 0,80 | 0,98 | 0,97 | 0,78 | 0,57 | 0,82 | 0,53 | 0,40 | 0,73 | 0,68 | 0,43 | 0,50 | 0,697 | 2 |
| A2 ξ_2 | 0,63 | 0,80 | 0,85 | 0,80 | 0,77 | 0,74 | 0,85 | 0,65 | 0,51 | 0,77 | 0,92 | 0,89 | 0,75 | 0,71 | 0,761 | 1 |
| A3 ξ_3 | 0,62 | 0,78 | 0,64 | 0,77 | 0,72 | 0,45 | 0,65 | 0,74 | 0,48 | 0,45 | 0,47 | 0,71 | 0,79 | 0,41 | 0,621 | 4 |
| A4 ξ_4 | 0,74 | 0,70 | 0,61 | 0,72 | 0,75 | 0,45 | 0,56 | 0,87 | 0,58 | 0,68 | 0,46 | 0,46 | 0,61 | 1,00 | 0,660 | 3 |

Analiz sonucuna göre proje önerisi alternatiflerinin sıralaması A_2 f A_1 f A_4 f A_3 şeklinde gerçekleşmiştir. Buna göre işletmenin A_2 projesini TÜBİTAK’a sunmak üzere değerlendirmeye alması önerilmektedir. İdealden en uzak proje önerisi olarak A_3 projesi belirlenmiştir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

1501 Sanayi Ar-Ge Destek Programı, ülke ihtiyaçları ve ulusal hedeflere yönelik Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme (KOBİ) ölçeğinde kuruluşların proje esaslı araştırma-teknoloji geliştirme ve yenilikçilik faaliyetlerini desteklemek üzere TÜBİTAK tarafından bütçe esaslı çağrılarla yürütülen bir programdır. TÜBİTAK 1501 Sanayi Ar-Ge Destek programına sunulacak proje önerisi/yönetim süreci işletmeler için gerek sahip olunan işgücü, finansman ve zaman gibi kaynakların kısıtlı olması, gerekse proje çağrılarının uygunluğu bakımından yönetsel bir karar problemi olarak incelenmelidir.

Karar verici konumunda bulunan yöneticilerin uygun proje önerisini belirlemek üzere deneyim ve tecrübelerine dayalı sezgilerinin karar modeline dahil edilerek karar probleminin incelenmesine olanak sağlamak üzere dilsel değerlendirme ifadelerinden faydalanılması ve dilsel ifadelerin sezgisel bulanık sayılar cinsinden karar problemine dahil edilmesi ve ÇKKV yöntemlerinden Gri İlişkisel Analiz yöntemi ile analiz edilmesine dayalı bu çalışmada bir işletmenin 4 proje önerisi alternatifi 14 kriter üzerinden karar verici konumunda bulunan 3 uzman görüşlerine dayalı olarak incelenmiştir. Yapılan analiz, uzman görüşlerinin karar verici grubun yönetsel yetki/deneyim düzeyi esas alınarak ağırlıklandırılarak tek bir karar matrisinde birleştirilmesi, elde edilen karar matrisinin sezgisel bulanık entropi yöntemi ile objektif olarak ağırlıklandırılması ve son olarak sezgisel bulanık gri ilişkisel analiz yöntemi ile değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Analiz sonucunda işletmenin tasarladığı proje fikirlerinden en ideal olanı kriter setinden elde edilen skorlarına göre belirlenmiştir.

İzleyen çalışmalarda kriter önem derecelerini belirlemek üzere entropi yöntemine alternatif olabilecek CRITIC, SD gibi objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden faydalanılabilir. Ayrıca AHP, ANP, FUCOM, BWM, DEMATEL gibi subjektif ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak elde edilecek kriter önem dereceleri kullanılarak analiz tekrarlanabilir. Çalışma kapsamında kullanılan gri ilişkisel analiz yönteminde oluşturulan referans serisi en büyük sezgisel bulanık sayı olan [1;0;0] sayısından oluşturulmuştur. Referans serinin oluşturulması aşamasında sezgisel bulanık performans skorları sezgisel bulanık sayılar için tanımlanmış skor ve doğruluk fonksiyonları kullanılarak kriter için en büyük sezgisel bulanık sayının referans serisinde kullanılması şeklinde bir yol izlenerek analiz tekrarlanabilir. Bu yaklaşım sıralama sonucunu değiştirmemekle birlikte kesin sayılar cinsinden hesaplanan gri ilişkisel dereceler kullanılarak alternatiflerin birbirlerine göre göreceli skorlarının belirlenmesine imkan tanınması bakımından tercih edilebilir. Bu çalışmada uzman görüşlerine dayalı olarak hesaplanan sezgisel bulanık karar matrisi ve sezgisel bulanık ağırlık değerleri gri ilişkisel analiz yöntemi dışındaki TOPSIS, VIKOR, ELECTRE, ARAS, COPRAS gibi literatürde çok bilinen yöntemler kullanılarak analiz edilebileceği gibi literatüre yakın zamanda önerilen MABAC, MAIRCA, MARCOS, EDAS gibi yöntemler ile kullanılarak analiz edilebilir ve elde edilen sonuçlar kıyaslanabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Altan Koyuncu, C., Aydemir, E., & Başarır, A. C. (2021). Selection Industry 4.0 maturity model using fuzzy and intuitionistic fuzzy TOPSIS methods for a solar cell manufacturing company. *Soft Computing*, 25(15), 10335-10349.
- Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87-96.
- Atanassov, K. T. (1999). Intuitionistic fuzzy sets. In *Intuitionistic fuzzy sets* (pp. 1-137). Physica, Heidelberg.
- Ayan, T. Y., & Perçin, S. (2012). AR-GE Projelerinin Seçiminde Grup Kararına Dayalı Bulanık Karar Verme Yaklaşımı. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 26(2), 237-255.
- Aydemir, E., & Sahin, Y. (2019). Evaluation of healthcare service quality factors using grey relational analysis in a dialysis center. *Grey Systems: Theory and Application*.
- Aydemir, E., Bedir, F., & Özdemir, G. (2013). Gri Sistem Teorisi Ve Uygulamaları: Bilimsel Yazın Taraması. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 187-200.
- Bayrakdaroğlu, F. K., & Kundakçı, N. (2019). Bulanık Edas Yöntemi ile Ar-Ge Projesi Seçimi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (24), 151-170.
- Binici, E., & Aksakal, E. (2020). Ar-Ge proje seçim problemine yeni bir yaklaşım ve çözüm önerisi: UTA yöntemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 211-226.
- Boran, F. E., Genç, S., Kurt, M., & Akay, D. (2009). A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11363-11368.
- Çağrı Tolga, A., & Kahraman, C. (2008). Fuzzy multiattribute evaluation of R&D projects using a real options valuation model. *International Journal of Intelligent Systems*, 23(11), 1153-1176.
- Eilat, H., Golany, B., & Shtub, A. (2008). R&D project evaluation: An integrated DEA and balanced scorecard approach. *Omega*, 36(5), 895-912.
- Güler, E., Avci, S., Alkan, Ü. A., & Aladağ, Z. (2018). Bir Üretim İşletmesinde Dematel ve Topsis Yöntemleri ile Ar-Ge Projelerinin Seçimi. *TURAN: Stratejik Arastirmalar Merkezi*, 10(40), 397.
- Hsu, Y.G., Tzeng, G.H. ve Shyu, J.Z. (2003). Fuzzy Multiple Criteria Selection of Government-Sponsored Frontier Technology R&D Projects. *R&D Management*, 33(5), 539-551.
- Huang, C. C., Chu, P. Y., & Chiang, Y. H. (2008). A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection. *Omega*, 36(6), 1038-1052.
- Kas Baydaroğlu, F. ve Kundakçı, N. (2019). Bulanık EDAS Yöntemi ile AR-GE Projesi Seçimi, *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 2019 (24), 151-170.
- Kurt, Z. B., & Yıldız, A. (2020). Ar-Ge/İnovasyon Projelerinin Değerlendirilmesi ve Önceliklendirilmesi İçin Fuzzy TOPSIS Tabanlı Karar Modeli. *Electronic Letters on Science and Engineering*, 16(2), 93-107.
- Lawson, C. P., Longhurst, P. J., & Ivey, P. C. (2006). The application of a new research and development project selection model in SMEs. *Technovation*, 26(2), 242-250.
- Liang, W. Y. (2003). The analytic hierarchy process in project evaluation: an R&D case study in Taiwan. *Benchmarking: An International Journal*. 10(5), 445-456.
- Mohanty, R. P., Agarwal, R., Choudhury, A. K., & Tiwari, M. K. (2005). A fuzzy ANP-based approach to R&D project selection: a case study. *International Journal of Production Research*, 43(24), 5199-5216.
- OECD (2015), Frascati Manual. Guidelines for collecting and reporting data on research and experimental development. Erişim Tarihi: 12.09.2020 <http://oe.cd/frascati>
- Osawa, Y., & Murakami, M. (2002). Development and application of a new methodology of evaluating industrial R&D projects. *R&D Management*, 32(1), 79-85.
- Sahin, Y., & Aydemir, E. (2021). A Comprehensive Solution Approach for CNC Machine Tool Selection Problem. *Informatica*, 1-28.
- Sarı, E.B. (2017). "Endüstri İşletmelerinde Ar-Ge Projelerini Öncelik Sıralamasında Entropi Ağırlıklı Topsis Yöntemine Dayalı Çok Kriterli Bir Analiz", *International Journal of Academic Value Studies*, 3(11), 159 -170
- Szmidt, E., & Kacprzyk, J. (2000). Distances between intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy sets and systems*, 114(3), 505-518.
- Szmidt, E., & Kacprzyk, J. (2001). Entropy for intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy sets and systems*, 118(3), 467-477.
- Tolga, A. Ç. (2008). Fuzzy multicriteria R&D project selection with a real options valuation model. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 19(4, 5), 359-371.
- Tübitak 1501 - Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı Proje Öneri Değerlendirme Raporu (AGY 200) Hazırlama Kılavuzu. Online, Erişim Tarihi: 12.09.2020 https://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/21566/agy200_agy201_kilavuz.docx
- Tuzkaya, U. R. ve Yolver, E. (2015). R&D Project Selection by Integrated Grey Analytic Network Process and Grey Relational Analysis: An Implementation for Home Appliances Company. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 8, 35-41.
- Vlachos, I. K., & Sergiadi, G. D. (2007). Intuitionistic fuzzy information-applications to pattern recognition. *Pattern Recognition Letters*, 28(2), 197-206.
- Wang, K., Wang, C. K., & Hu, C. (2005). Analytic hierarchy process with fuzzy scoring in evaluating multidisciplinary R&D projects in China. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 52(1), 119-129.
- Xu, Z. (2007). Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 15(6), 1179-1187.
- Xu, Z. (2007a). Some similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and their applications to multiple attribute decision making. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 6(2), 109-121.
- Xu, Z. (2007b). Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 15(6), 1179-1187.
- Xu, Z., & Yager, R. R. (2008). Dynamic intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making. *International journal of approximate reasoning*, 48(1), 246-262.
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K., & Zolfani, S. H. (2017). Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3728-3740.

- Yazdani, M., Hashemkhani Zolfani, S., & Zavadskas, E. K. (2016). New integration of MCDM methods and QFD in the selection of green suppliers. *Journal of Business Economics and Management*, 17(6), 1097-1113.
- Yıldırım, B. F. (2019). "Kredi Kartı Platformlarının Sezgisel Bulanık TOPSIS Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi". *BDDK Bankacılık ve Finansal Piyasalar*, 13 (1), 37-58.
- Yıldız, A. (2014). Bulanık VIKOR Yöntemini Kullanarak Proje Seçim Sürecinin İncelenmesi. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(1), 115-127.
- Yurtyapan, M. S., & Aydemir, E. (2022). ERP software selection using intuitionistic fuzzy and interval grey number-based MACBETH method. *Grey Systems: Theory and Application*, 12(1), 78-100.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.



DEPREM RİSKİNİN KENTSEL PLANLAMA SÜRECİNE ETKİSİ: İPSALA, KEŞAN VE ENEZ İLÇELERİ (EDİRNE) ÖRNEĞİ

Neslihan KARATAŞ^{1*}, Mehmet Ali KAYA²

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, İzmir, Türkiye

²Trakya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Edirne, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|---|
| <i>Depremsellik, İpsala, Enez, Keşan, Sakınım Planlaması.</i> | Bir kentin planlanmasında depremsellik durumu ve jeolojik veriler önemli bir yer tutmaktadır. Her ne kadar planlama süreci ve kentlerin oluşumu yeryüzünde gerçekleşse de yeraltının jeolojik yapısı ve bu yapının sığ derinliklerde üç boyutta da çok sık değişiminin belirlenmesi önemlidir. Bu değişimin jeofizik (/jeolojik) bilgilerle değerlendirilmesi, yer üstündeki arazi kullanım dağılım biçimini belirleyen temel unsurdur. Edirne ili ve ilçeleri Deprem Bölgeleri Haritasında I.- IV. Derece Deprem Bölgesi içerisinde yer almaktadır. Edirne'nin ilçelerinden Enez, Keşan ve Ipsala Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) Marmara denizinde devam ederek Saroz körfezinden Ege denizine ulaşan kuzey koluna çok yakındır. Bu nedenle 1. Derece deprem bölgesinde yer almaktadırlar ve KAFZ'da (Marmara denizinden Saroz körfezine kadar) meydana gelebilecek herhangi bir depremden en fazla etkilenecek yerleşim birimleridir. Bu nedenle Edirne ili depremsellik durumu göz önünde bulundurulduğunda KAFZ'na çok yakın olan Keşan, Enez ve Ipsala ilçelerinin kent planları depremsellik açısından yeniden ele alınarak afete duyarlı olarak değerlendirilmiştir. Sakınım planlaması çerçevesinde planların revizyonuna yönelik çözüm önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır. |

EFFECT OF EARTHQUAKE RISK ON THE URBAN PLANNING PROCESS: THE CASE OF IPSALA, KEŞAN AND ENEZ DISTRICTS (EDİRNE)

| Keywords | Abstract |
|--|---|
| <i>Seismicity, Ipsala, Enez, Keşan, Mitigation Planning.</i> | Seismicity and geological data take an important place in the planning of any city. Although the planning process and the formation of cities take place on earth, it is important to determine the geological structure of the underground and the frequent changes of this structure in shallow depths in three dimensions. Evaluation of this change with geophysical (geological) information is the main factor that determines the distribution of land use above ground. Edirne province and districts earthquake zones map I. IV. It is located within the degree earthquake zone. Enez, Keşan and Ipsala, one of the districts of Edirne, are very close to the northern branch of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ), which reaches the Aegean sea from the Saros gulf. For this reason, they are located in the 1st Degree earthquake zone and are the most affected by any earthquake that may occur in NAFZ (from Marmara sea to Saroz gulf). Therefore, considering the seismicity of Edirne province, the city plans of Keşan, Enez and Ipsala districts, which are very close to the NAFZ, have been evaluated in terms of seismicity and evaluated as sensitive to disaster. Within the framework of mitigation planning, proposals for a solution to the revision of plans were tried to be developed. |

Alıntı / Cite

Karataş, N., Kaya, M.A., (2022). Deprem Riskinin Kentsel Planlama Sürecine Etkisi: İpsala, Keşan ve Enez İlçeleri (Edirne) Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 654-679.

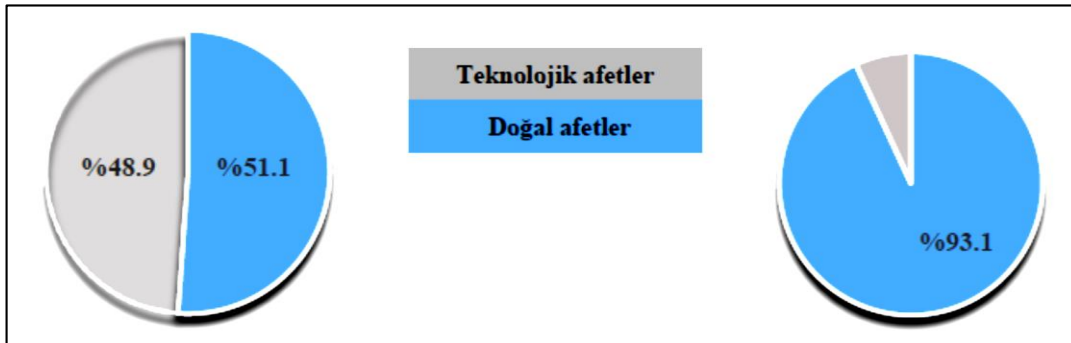
* İlgili yazar / Corresponding author: neslihan.karatas@deu.edu.tr, +90-232-301-8446

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|----------------------------------|------------|
| N. Karataş, 0000-0002-9842-9213 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 08.09.2021 |
| M.A. Kaya, 0000-0002-6190-3436 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 23.02.2022 |
| | Kabul Tarihi / Accepted Date | 01.03.2022 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

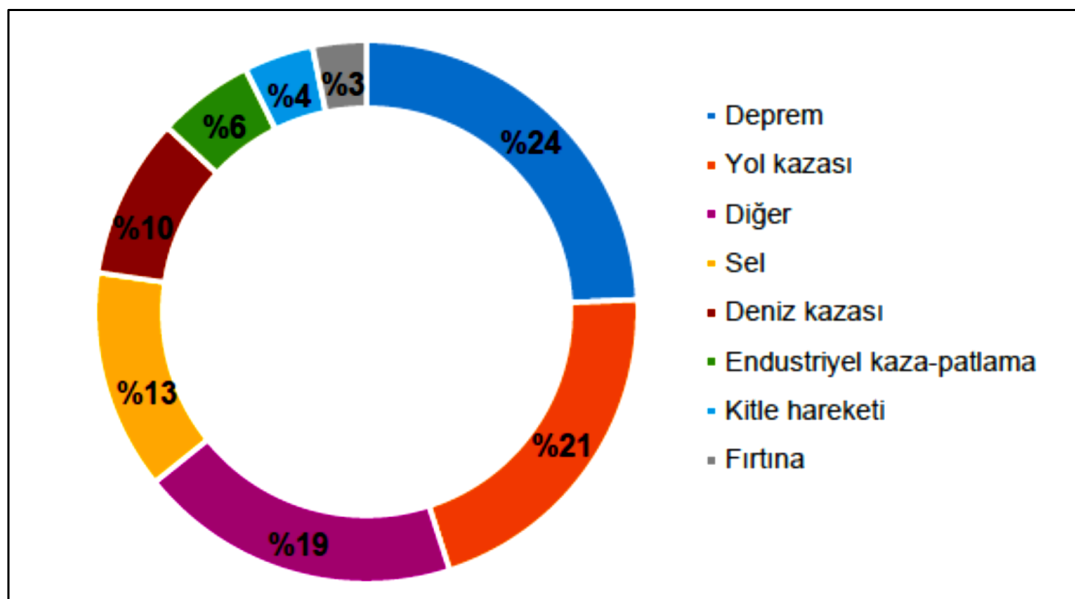
1. Giriş (Introduction)

Bütün dünyada kentler, artan nüfus yoğunluğu ile plansız ve denetimsiz yapılaşma sonucunda özellikle doğal olayların afete dönüşmesi açısından giderek en fazla risk taşıyan alanlar haline gelmiştir. Bu nedenle risk oluşturan tehlikelerin önceden belirlenerek afete duyarlı bir planlama çalışmasının yapılması kentin sadece fiziksel değil; sosyal ve ekonomik risk faktörlerini de azaltacağından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle özellikle kentlerin yapılanma sürecinde bu riskin azaltılmasında afete duyarlı planlama yaklaşımı öne çıkmaktadır.

Doğal afetler açısından değerlendirildiğinde, ülkemizde en çok görülen afet çeşidi depremlerdir. Bahadır ve Uçku (2018), 1923-2016 yılları arasını kapsayan araştırmalarında Şekil 1'de görüldüğü gibi, doğal ve insandan kaynaklanan (teknolojik) afetlerin, oransal olarak yaklaşık eşit olduğunu belirtmektedirler. Depremlerin Türkiye'de gerçekleşen tüm afetlerin yaklaşık %25'ini oluşturmasına rağmen, afetlerde yaşanan can kayıplarının %90'ından fazlasından sorumlu olduğunu vurgulamaktadırlar. Yaptıkları araştırmada doğal afetlerin %95,4'nü ani gelişen, %4,6'sını ise yavaş gelişen tip olarak tanımlamışlardır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, afetlerin %24.3'ü deprem, %20.8'i yol kazası, %13.1'i sel baskını, %9.6'sı deniz kazası, %5.8'i ise patlamadır.



Şekil 1. Afetlerin Gerçekleşme Dağılımı (Solda) ve Afet Gruplarına Göre Can Kaybı Dağılımı (Sağda) (Bahadır ve Uçku, 2018) (Distribution of Disasters (Left) And Loss of Life By Disaster Groups (Right))



Şekil 2. Afetlerin Tipine Göre Sıklık Dağılımı (Bahadır ve Uçku, 2018) (Frequency Distribution by Type of Disasters)

Deprem riskinin yüksekliğinden dolayı özellikle depreme duyarlı planlama çalışmaları büyük önem kazanmaktadır. Olası risklerin önceden belirlenip buna yönelik yapılacak olan zarar azaltıcı planlama çalışması, deprem durumunda hem bu riskleri en aza indirecek hem de deprem sonrası acil müdahaleler konusunda da etkin

bir rol oynayacaktır. Depreme duyarlı planlama yaklaşımı için öncelikle sismolojik verilerin doğru ve yerinde elde edilmesi ve bu verilerin planlamaya doğru bir girdi teşkil etmesi son derece önem kazanmaktadır.

Bu bağlamda, bu çalışma kentsel planlama ve jeofizik mühendisliğinin Türkiye'deki ilk örneklerinden biridir. Bu çalışmada, Edirne ilinin depremselliği göz önüne alınarak KAFZ'a en yakın olan ve en fazla risk altında olan Enez, Keşan ve İpsala İlçeleri merkez yerleşmeleri örnek alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu her üç ilçe merkezine ilişkin imar planları, afete duyarlı zarar azaltıcı planlama çalışması çerçevesinde irdelenmiş ve var olan planların deprem riski açısından yeniden revizyonu için öneriler geliştirilmiştir.

2. Afet Yönetimine Yönelik Dünyada Değişen Politikalar (Changing Policies in The World For Disaster Management)

Geçmişten günümüze doğal afetler insan yaşamının bir parçasıdır ve meydana gelmesini önleme imkanı da bulunamamaktadır. Bununla birlikte insanlık, yüzyıllardır kişisel olarak ya da bölgede yaşayanlar tarafından afetleri en az kayıp ve hasarla atlama konusunda çaba harcamışlardır. Günümüzde ise küçülen dünyada (/global) birçok uluslararası organizasyon doğal afetler konusunda araştırmalar yapıp afetlerin artan etkileri ve bu afetlerin hem doğal hem de yapılı çevre üzerinde oluşturduğu baskı konusunda insanları, yerel, ulusal, uluslararası kurumları uyarmaktadır (Özmen ve Özden, 2013). Birleşmiş Milletler (BM), Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD), BM İnsani Yardım Koordinasyon Ofisi (OCHA), BM Afet Değerlendirme ve Koordinasyon Sistemi (UNDAC), Yerinde Operasyonlar Koordinasyon Merkezi (OSOCC), Sanal OSOCC (Virtual OSOCC), Kuzey Atlantik Paktı (NATO), HABITAT (Birleşmiş Milletler'e Bağlı), Dünya Bankası - Afet Azaltımı ve İyileştirme için Küresel Hizmet Birimi (WB-GFDRR), Uluslararası Kızılhaç ve Kızılay Toplulukları Federasyonu (IFRCRCS), Uluslararası Sivil Savunma Örgütü (ICDO) ve dünyanın önemli reasürans (re-insurance) kurumları olan SwissRe ve MunichRe bu kurumlara verilebilecek örneklerdendir (Özmen ve Özden, 2013). Geleneksel olarak afetlerle mücadele etme biçimi, genellikle, afet sonrası müdahale ve iyileştirmeye yönelik olup söz konusu anlayışların yeterli olmadığı görüldüğünden 1990'lardan sonra afet yönetimi anlayışında önemli değişimler ortaya koyan politikalar benimsenmeye başlanmıştır. Özellikle tehlikelerin birer afete dönüşmesinin engellenmesinin ancak iyi bir risk planlaması ile mümkün olabileceği fark edilmiştir. Eğer bu tehlikelerin varlığı bilinir ve uygun sakınım yaklaşımları gerçekleştirilirse en azından afet riskini en aza indirmek mümkün olabilecektir. Bu politika değişikliği ise "Geleneksel Afet Yönetim Sistemi"nden "Afet Risk Yönetimi Sistemi"ne dönüşümü öngörmektedir (Özmen ve Özden, 2013). Bu yeni afet risk yönetimi sistemi dönüşümünün uygulamalarına ilişkin önemli düzenlemeler şu şekilde sıralanmaktadır:

-Birleşmiş milletler doğal afetlerin nedenlerinin ve etkilerinin doğru olarak açıklanmasında sosyal, ekonomik ve politik analizlerin de zorunlu olduğunu vurgulamak amacıyla, 1989 yılında, 44/236 sayılı Genel Kurul Kararı ile 1990-1999 yılları arasındaki onyıllı "Uluslararası Doğal Afetleri Azaltma Onyıllı" (The International Decade for Natural Disaster Reduction - IDNDR) ilan etmiştir (Demir ve Temelli, t.y.).

-Johannesburg Uygulama Planı (The Johannesburg Plan of Implementation) olarak bilinen ve 1992 yılında Güney Afrika'da düzenlenen uluslararası organizasyonda (The World Summit on Sustainable Development - WSSD) kabul edilen planın yayımlanması. Kabul edilen dokümanda 21. Yüzyıl'da Dünyanın daha güvenli bir yer haline gelebilmesi için bütünleştirilmiş, çoklu tehlikeleri öngören ve kapsamlı bir afet yönetimi yaklaşımına ihtiyaç olduğu belirtilmiştir (Demir ve Temelli, t.y.). Amaç ülkelere -özellikle de afet riski ile karşı karşıya olanlara- insan yerleşimleri, ulusal ekonomiler ve çevre üzerindeki doğal ve insan kaynaklı afetlerin olumsuz etkilerini azaltmak için olanak tanımaktır. Bu program kapsamında üç farklı faaliyet alanı öngörülmektedir. Bunlar; "güvenlik kültürünün" geliştirilmesi, "afet öncesi planlama" ve "afet sonrası yeniden yapılanma"dır (United Nations Digital Library, 1993).

- 1994 yılında düzenlenen Uluslararası Yokohama Konferansı ile "Daha Güvenli Bir Dünya için Yokohama Stratejisi ve Uygulama Planı"nın (The Yokohama Strategy and Plan of Action for a Safer World) hayata geçirilmesi; bu strateji ile afetlerle mücadelede yeni strateji ve prensipler belirlenmiş, risk analizi ve zarar azaltmaya yönelik detaylı kriterler belirlenerek "risk yönetimi" kavramı ele alınmış, afetlerin önlenmesi ve hazırlık faaliyetlerinin öncelikli öneme sahip olduğu vurgulanmıştır (PreventionWeb, 1994; Taş ve Erdal, 2015). Bu plan daha sonraki afet yönetimi ile ilgili politikaların geliştirilmesinde rehber niteliği taşımıştır.

-Yokohama Konferansı'nda alınan kararları uygulamak ve ülkelerce uygulanmasını teşvik ederek gözlemlemek amacıyla Birleşmiş Milletler bünyesinde Afet Azaltımı için Uluslararası Strateji (International Strategy for Disaster Reduction - ISDR) biriminin oluşturulması; 2000 yılında IDNDR'nin halefi olan Uluslararası Afet Azaltma Stratejisi (ISDR), önceki tehlikelere karşı koruma vurgusundan farkındalık, değerlendirme ve risk yönetimini içeren bir sürece geçerek bu ihtiyacı desteklemek ve sosyal kırılabilirliği ve doğal afet risklerini ve ilgili teknolojik ve çevresel afetleri azaltmaya yönelik eylemlerin teşvik edilmesi için oluşturulmuştur (ISDR (a), t.y.). Risk önlemenin

sürdürülebilir kalkınmaya entegrasyonu yoluyla tehlikelere karşı korunmadan ziyade risk yönetimine geçmek ana hedefidir (ISDR (b), t.y.).

-2000 yılında Birleşmiş Milletler'in Sekizinci Genel Kurul Toplantısı'nda Binyıl Kalkınma Hedefleri (Millennium Development Goals - MDGs)'nin ilan edilmesi. Bu hedefler içinde acil olarak doğal ve insandan kaynaklı afetlerin artan sayı ve etkilerinin azaltılması için uluslararası işbirliğinin katlanarak arttırılması yönünde karar alınması (Demir ve Temelli, t.y.),

-2004 yılında OECD'nin Büyük Ölçekli Afetler, Öğrenilen Dersler (Large-Scale Disasters, Lessons Learned) adlı raporunun yayınlanması; gerçekleşmiş afetlerin sonuçları ve bu afetlerden ne tür dersler çıkarıldığına yönelik bir çalışmadır (Özmen ve Özden, 2013; OECD, 2004).

-Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı'nın (United Nations Development Program UNDP) 2004 yılında Afet Riskini Azaltma - Kalkınma için Bir Zorluk (Reducing Disaster Risk – A Challenge for Development) isimli raporunu yayınlaması; raporla risk yönetimi, afet riskini azaltma ve gelişim planlamasının nasıl entegre edileceği vb. hususlarda öneri geliştirmiştir (Özmen ve Özden, 2013; UNDP, 2004)

-2003 ve 2004 yıllarında UN-ISDR Sekreteryası'nın Yokohama Strateji ve Uygulama Planı'nın gözden geçirme ve değerlendirmesini hazırlaması (Özmen ve Özden, 2013),

-2005 yılında Japonya'nın Kobe kentinde düzenlenen 2. Afetlerin Azaltılması Dünya Konferansı'nda 2005-2015 yılları arasında afetlerin neden olduğu zararların azaltılmasını amaçlayan Hyogo Çerçeve Eylem Planı (HÇEP) hazırlanmış ve Birleşmiş Milletlere üye 168 ülke tarafından benimsenmiştir (Wikipedia, 2021). Bu çerçevede 2005-2015 yıllarının yeni "Doğal Afet Risk Azaltımı Onyılı" olarak ilan edilmesi. Afet risklerinin azaltılması için bir eylem planı niteliği taşıyan HÇEP, 3 stratejik hedef ve 5 öncelikli eylem planından oluşmaktadır. Stratejik hedefleri; afet riskiyle ilgili hususların, afet önleme, azaltma, hazırlıklı olma ve savunmasızlığı azaltmaya özel bir vurgu yaparak her düzeyde sürdürülebilir kalkınma politikalarına, planlamasına ve programlamasına daha etkili bir şekilde entegre edilmesi; tehlikelere karşı direnç oluşturmaya sistematik olarak katkıda bulunabilecek kurumların, mekanizmaların ve kapasitelerin her düzeyde, özellikle de topluluk düzeyinde geliştirilmesi ve güçlendirilmesi; etkilenen toplulukların yeniden inşasında acil duruma hazırlık, müdahale ve iyileştirme programlarının tasarımı ve uygulanmasına risk azaltma yaklaşımlarının sistematik olarak dahil edilmesidir (ISDR, 2005). Öncelikli eylem planları ise; afet riskinin azaltılması, uygulanması için güçlü bir kurumsal yapı oluşturmak, afet risklerini tanımlanması, değerlendirilmesi ve izlenmesi erken uyarı sisteminin geliştirilmesi, her seviyede güvenlik ve dayanıklılık kültürü oluşturmak için bilginin, yeniliklerin ve eğitimin kullanılması, risk faktörlerinin azaltılması, her düzeyde etkili müdahale için afete hazırlığın güçlendirilmesi (ISDR, 2005).

-2005 yılında UN-ISDR tarafından Risk ile Yaşamak – Afet Azaltımı Girişimlerinin Küresel bir Gözden Geçirmesi (Living with Risk-A Global Review of Disaster Reduction Initiatives) raporunun yayınlanması, tehlikelere karşı risk ve kırılganlığın nasıl azaltılacağı ve yarının zorluklarıyla nasıl başa çıkılacağı konusunda dersler için bir referans görevi görmektedir. Afet riski yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma ile ilgili bilgilendirmede bulunmaktadır (ISDR, 2004).

-2007 yılında Birleşmiş Milletler Genel Kurulunda Hyogo Çerçeve Eylem Planı'nın uygulanmasının desteklenmesi için Afet Risk Azaltımı Üzerine Küresel Platform Bienali (A biennial 'Global Platform' on disaster risk reduction) gerçekleştirilmesi (Özmen ve Özden, 2013),

-2009 yılında Birleşmiş Milletler tarafından Güney Kore'de Afet Risk Azaltımı için Bir Yerel Yönetim Antlaşması İnşa Etmek (Building a Local Government Alliance for Disaster Risk Reduction) temalı Incheon Konferansı düzenlenmesi. Risk azaltma uygulamalarının genellikle yerel düzeyde gerçekleştirildiği öngörüsü ile yerel yönetimlere (merkezi yönetimlerinden bağımsız) küresel aktörler kimliği vermiş, *risk azaltma giderlerini 'maliyet' değil, 'yatırım' olarak tanımlamıştır* (Demir ve Temelli, t.y.). Ayrıca, 'Güvenli Kentler Kampanyası (Resilient Cities)' (2010-2011) başlatılarak küresel ölçekte yerel yönetimlerin risk azaltma etkinliklerinde nelere özen göstermeleri gerektiğini, yerel birimlerin dayanışması, deneyimlerini birbirlerine aktarmalarını, başarılı örneklerin yaygın tanıtımını ve giderek yerel yönetimler arası bir ağ oluşturulmasını desteklemeye çalışmıştır (Demir ve Temelli, t.y.).

-2010 yılında OECD tarafından Doğal Tehlike Farkındalığı ve Afet Risk Azaltımı Eğitimi Üzerine Politika El Kitabı (OECD Policy Handbook on Natural Hazard Awareness and Disaster Risk Reduction Education) hazırlanması (Özmen ve Özden, 2013); doğal afet bilinci ve afet riskini azaltma eğitimi alanında politika rehberliği sağlar. OECD tarafından gerçekleştirilen ve seçilen OECD ülkelerinin yanı sıra Çin ve Hindistan'ı da kapsayan doğal tehlikeler ve ilgili riskler konusunda risk bilincini ve eğitimi teşvik etmek için ülke girişimlerinin envanterini temel alır.

-27-28 Ekim 2011 tarihinde Çin’de Shangai Oturumu (The Shanghai Forum on ‘Disaster Prevention, Post-Disaster Reconstruction and International Cooperation: Learning from both Japanese and Chinese Experiences) düzenlenmesi: Afet sonrası yeniden yapılanma ve afetlerin önlenmesinde sivil toplumun ve sosyal sermayenin rolü, yapıların deprem hasarını azaltmak için gelişmiş teknolojiler, İnşaat mühendisliği yapılarının deprem hasarı ve karşı önlemleri, sınır boyunca afet yardım ağı, afet önleme, afet sonrası yeniden yapılanma ve uluslararası işbirliği, güvenlik, risk ve insan kaynakları eğitimi gibi hususlar ele alınmıştır (ADRC, 2011).

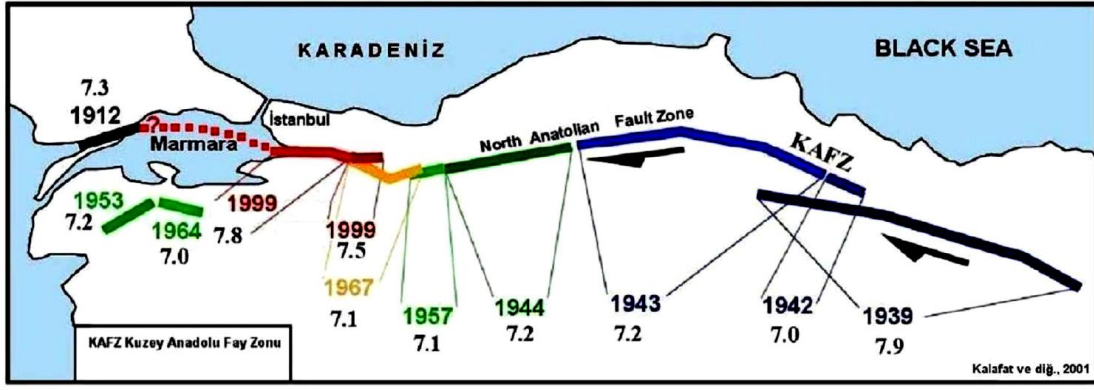
-Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi 2015-2030, 18 Mart 2015 tarihinde, Japonya’nın Sendai kentinde düzenlenen Üçüncü BM Dünya Konferansı’nda kabul edilmiştir. Mart 2015’te, Hyogo Çerçevesi sona ermiş ve Sendai Çerçevesi ile yer değiştirmiştir. Bu çerçevede 4 öncelik öne çıkmıştır: afet riskini anlama, afet riskini yönetmek için afet risk yönetimini güçlendirme, esneklik için afet riskini azaltmada yatırım, etkili bir karşılık için afet hazırlıklarını artırma ve rehabilitasyon, yeniden yapılandırma ve geri kazanımda ise eskiyi daha iyi inşa etme. Sendai Çerçevesinin amacını ve sonucun elde edilmesinde küresel gelişim değerlendirmesini desteklemek için, 7 küresel hedef kabul edilmiştir: 2030’a kadar küresel afet ölümlerini önemli bir şekilde azaltma, 2005-2015’le karşılaştırmak için 2020-2030 arasında 100.000 küresel ölüm başına daha düşük bir yüzdeyi amaçlama, 2030’a kadar küresel gayri safi yurt içi hâsıla ile ilgili afet ekonomik kaybı direkt olarak azaltma, 2030’a kadar, esnekliklerini geliştirmek dâhil, aralarında eğitim ve sağlık kurumlarının da bulunduğu, temel hizmetleri bozan ve önemli alt yapıya zarar veren afetleri önemli bir şekilde azaltma, 2020’ye kadar yerel ve ulusal afet risk azaltma stratejileri ile ülkelerin sayısını önemli bir şekilde artırma, 2030’a kadar ulusal eylemlerin uygulanma çerçevesini tamamlamak için yeterli ve sürdürülebilir destek aracılığı ile gelişen ülkelerle uluslararası işbirliğini önemli bir şekilde geliştirme, 2030’a kadar insanlar tarafından çoklu afet erken uyarı sistemlerine, afet risk bilgilendirme ve değerlendirmeye erişim ve kullanılabilirliği önemli bir şekilde artırma. Sendai Çerçevesi ayrıca şu konudaki ihtiyaçları açıkça ifade etmektedir: afet riskinin maruz kalma, savunmasızlık ve tehlikenin özelliklerine ilişkin afet riskinin tüm yönleriyle daha iyi anlaşılması, ulusal platformlar da dahil olmak üzere afet risk yönetiminin güçlendirilmesi; afet risk yönetiminde şeffaflık; “Yeniden Daha İyi Şekilde İnşa Et” yaklaşımına hazırlık; paydaşların ve bu paydaşların rollerinin tanımlanması; yeni risklerin oluşmasını önlemek için riske duyarlı yatırımların mobilizasyonu; sağlık konusundaki altyapının, kültürel mirasın ve çalışma alanlarının dirençli kılınması; uluslararası iş birliği ve küresel ortaklığın güçlendirilmesi; ve uluslararası finans kurumlarının mali desteği ve kredileri de dahil olmak üzere, risk bilgilendirici bağış politika ve programları (UNISDR, 2015; Wikipedia, 2021).

Görüldüğü üzere uzun yıllar boyunca uluslararası organizasyonlar tarafından birçok protokol imzalanmıştır. İlk zamanlarda yapılan anlaşmalarda afet sonrasına yönelik önlemler ya da yapılacaklara ilişkin tedbirler belirlenmiş olsa da, sonrasında afet öncesine yönelik tedbirler ve neler yapılabileceğine yönelik çalışmalara ağırlık verilerek afet risk yönetimi büyük önem kazanmış bu süreçte de sakinim planlaması kentlerin gelişimi ve planlanmasında önemli bir araç olmuştur.

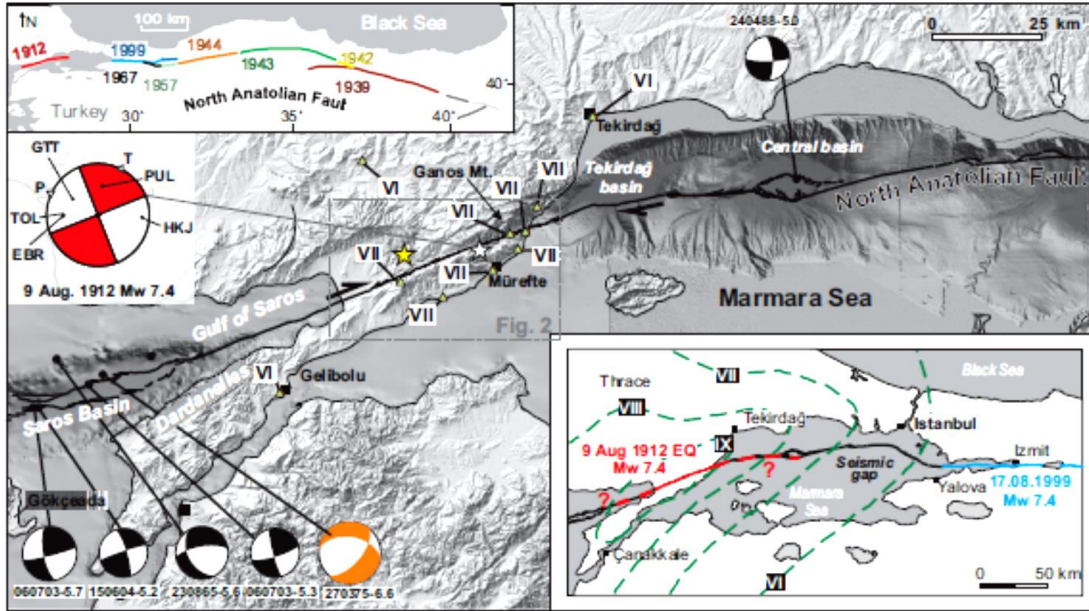
3. Edirne’nin Depremselliği (Seismicity of Edirne)

Türkiye, dünya üzerinde büyük depremlerin meydana geldiği Alp-Himalaya dağ oluşum kuşağında yer almaktadır (Atabey, 2000) ve tarih boyunca birçok yıkıcı depreme maruz kalmıştır.

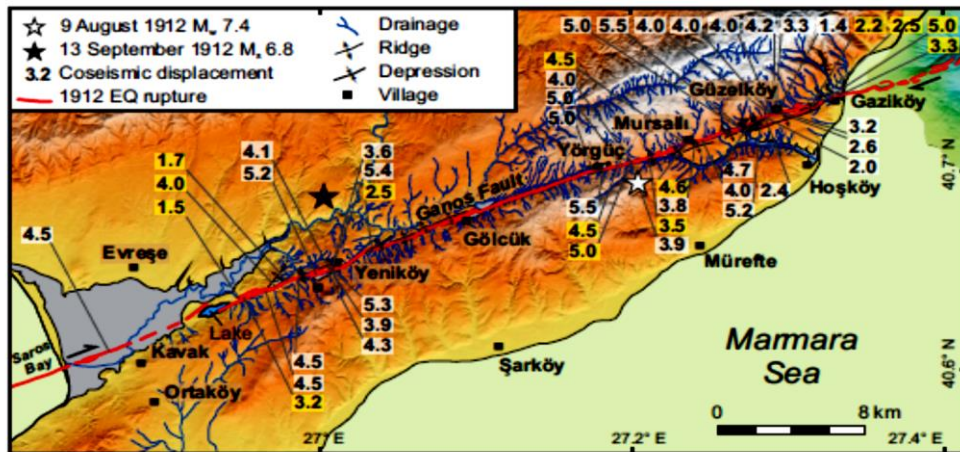
Ülkemizin en önemli fay sistemi Kuzey Anadolu Fayı (KAF) olup büyük depremlere neden olmaktadır (Şekil 3). Bu fay sisteminin kuzey kolunun en batı segmentini oluşturan Ganos Fayı Edirne İl’inin güneyinde yer almaktadır ve Saros Körfezine kadar uzanmaktadır. Trakya bölgesinin özellikle doğu ve güneydoğu kısmının (İstanbul ve Marmara Denizi kıyıları) ve batı ve güneybatı kısmının (Sarov Körfezi ve Ege Denizinin kuzeyi) sismik açıdan aktif olduğu görülmektedir (Şekil 4 ve Şekil 5).



Şekil 3. 1939 Depreminden Sonra Büyük Depremlerin Batıya Göçü (Kalafat vd., 2001) (Westward Migration of Major Earthquakes After The 1939 Earthquake)



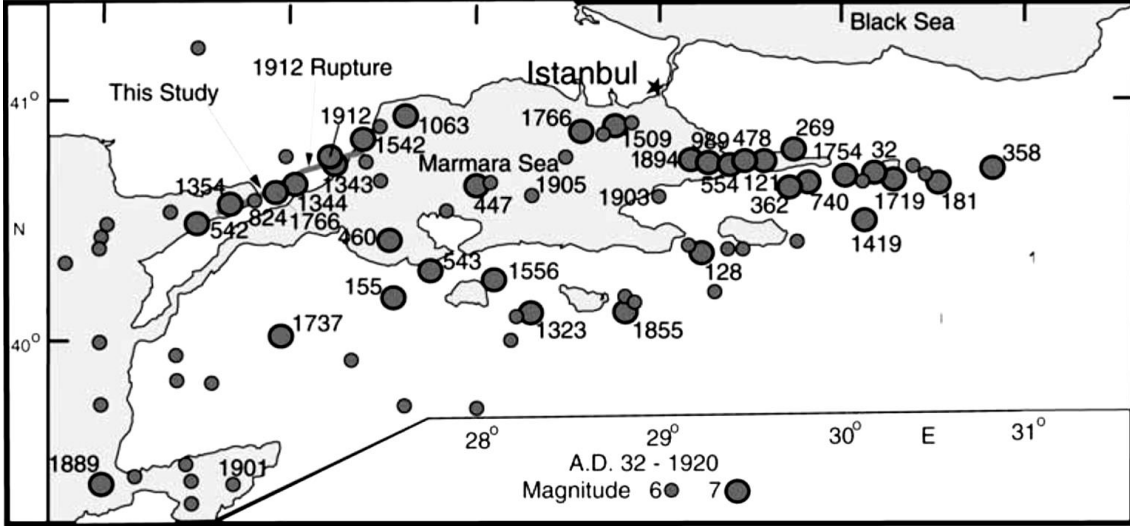
Şekil 4. Batı Marmara'nın Sismotektoniği. Burada beyaz ve sarı yıldız işareti, sırasıyla, 9 Ağustos 1912 ve 13 Eylül 1912 depremlerinin episantrlarıdır. Romen rakamları 13 Eylül depreminin MSK şiddet değerlerini gösterirken sol üstteki şekil, Şekil 3'de verilen deprem kırıklarının ve sağ altta ise 9 ağustos depreminin eş şiddet eğrileri ve sismik boşluklar görülmektedir (Aksoy vd., 2010). (Seismotectonics of the West Marmara. Here, the white and yellow stars are the epicentres of the earthquakes of August 9, 1912 and September 13, 1912, respectively. Roman numerals show the MSK intensity values of the 13 September earthquake, the upper left figure shows the earthquake fractures given in Figure 3, and the isoseismals of the 9 August earthquake and seismic gaps at the lower right.)



Şekil 5. Ganos Fayının Karadaki Devamı ve 1912 Depremindeki Atım Dağılımı (M Cinsinden) Sarı Kutular, Araştırmacıların Ölçümleridir (Aksoy vd., 2010) (The Continuation of The Ganos Fault on Land and The Slip Distribution In The 1912 Earthquake (In M)). (Yellow Boxes Are Researchers' Measurements)

Aletsel dönem öncesi Marmara Denizi ve çevresinde meydana gelen 1509, 1766 tarihli depremler ile 1752'de Havsa'da (Edirne) meydana gelen deprem büyük hasara yol açmıştır. Edirne ili, Enez, Keşan ve İpsala İlçelerini etkileyen en önemli depremin ise aletsel dönemde oluşan ve 7.3 büyüklüğündeki 1912 tarihli Mürefte-Şarköy depremi olduğu bilinmektedir (Çınar, Yıldız vd., 2013). Bu nedenle de geçmişten günümüze var olan depremler incelendiğinde Edirne'nin söz konusu ilçelerinin sürekli olarak deprem tehlikesi ile karşı karşıya olacağı açıktır (Şekil 6).

KAFZ'nın en batı segmentini içeren söz konusu bölge ile ilgili araştırmalar yer bilimcilerce (jeoloji mühendisleri-jeofizik mühendisleri) sürdürülmektedir. Jeoloji ve jeofizik ile ilgili araştırmalar ayrı ayrı olabildiği gibi, her iki bilim dalının ortak araştırmaları da bulunmaktadır. Ek olarak, bölgenin öneminden dolayı sadece Türk bilim insanları değil, konuyla ilgili dünyadan araştırmacılar da araştırmalar yapmışlardır. Ganos fayı – Saros körfezi ile ilgili olarak (Saner, 1985; Çağatay vd., 1996; Yaltrak vd., 1998; Kurt vd., 2000; Yaltrak, 2002; Altınok vd., 2003; Görür ve Elbek, 2013; Öztürk, 2017; Karas vd., 2017; Konca vd., 2018; Uchida vd., 2019; Tary vd., 2019; Gürboğa vd., 2020) birkaç araştırma örneğidir.

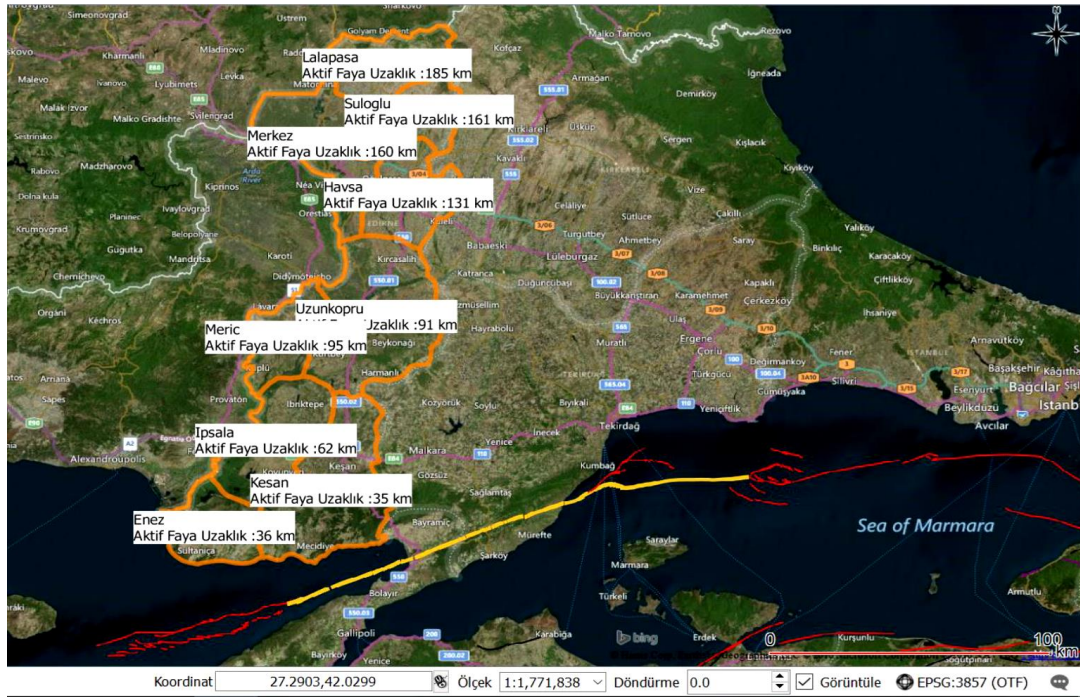


Şekil 6. Marmara Bölgesinde II. Yy - XX. Yy Arasında Meydana Gelen Büyük Depremler. Gelibolu Yarımadasındaki Büyük Depremlere Dikkat Çekilmektedir (Rockwell vd., 2001) (Earthquakes in The Marmara Region in The Last Two Thousand Years. Attention is Drawn to Major Earthquakes in The Gallipoli Peninsula)

Taş (2002), Trakya'nın kuzeyindeki Kırklareli-Vize çizgiselliği ve Sergen fayının karakteristik özelliklerini incelemiş, bölgede meydana gelen depremlerin, KAF üzerinde olduğuna dikkat çekmiştir.

Edirne ilinin güneyinde ve Ganos fayına en yakın ilçe merkezleri Keşan, Enez ve İpsala olup, sırasıyla, yaklaşık olarak, 35 km, 36 km ve 62 km uzaklıktadırlar (Şekil 7) (Yalçın ve Sabah, 2017).

Yalçın ve Sabah (2017), Edirne ilindeki alüvyon ortamlara dikkat çekerken (Şekil 8); Caltılı ve Ger (2017), standart penetrasyon deneyi (SPT) ile Edirne ilinin zemin sıvılaşma potansiyelini araştırmışlardır. Uyanık (2015), depremde ağır hasarlara neden olabilecek alanların önceden belirlenmesi ve şehir planlaması için makro ve mikro bölgelemenin önemini vurguladığı araştırmasında, deprem anında hem zemin sıvılaşması riskine hem de alüvyon kalınlığının deprem büyütmesine dikkat çekmektedir (Şekil 9).

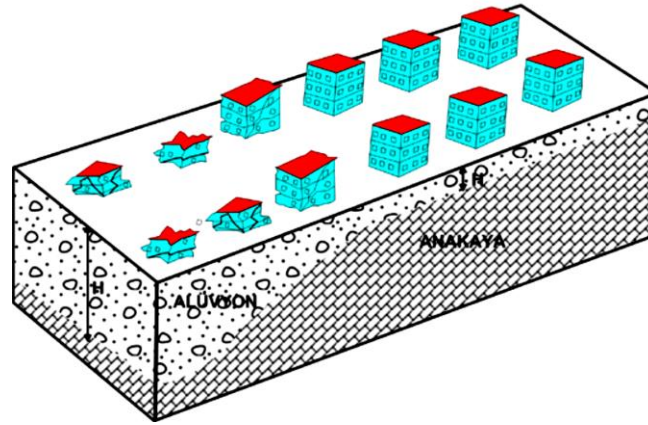


Şekil 7. Edirne ve İlçelerinin KAFZ'na Uzaklıkları (Yalçın ve Sabah, 2017) (Distances of Edirne And Its Districts to NAFZ)

DSİ Raporu (2016), Meriç nehrinin sedimanlarına dair bilgiler vermektedir. Edirne'de geniş bir yayılıma sahip olan kumtaşı ve siltaşından meydana gelen ve menderesli akarsuların kanal çökellerini temsil eden kırıntılı birimler de, genellikle tutturulmamış çakıl, kum ve çamur taşından oluşan alüvyon yelpazesi olarak yorumlanan birimler ile örtülmektedir. DSİ raporuna göre (2016), alüvyon birimin kalınlığı genel olarak 10 – 160 metre arasında olup Meriç Alt Havzası'nın kuzey bölümünde 20 – 68 metre arasında değişirken (DSİ Kuyu No:27003, 56306), Alt havzanın orta bölümünde bulunan alüvyonlar üzerinde açılmış DSİ Kuyularında 120 metreye ulaşmaktadır (DSİ Kuyu No:56626,56937). Alt Havzanın güney bölümünde ise alüvyon kalınlığı 160 metreye kadar ulaşmaktadır (DSİ Kuyu No:41182). Anlaşılacağı gibi, Havzanın kuzeyinden güneyine doğru alüvyon kalınlığı artmaktadır.



Şekil 8. Edirne İl Sınırları İçindeki Alüvyon Alanların Haritası (Yalçın ve Sabah, 2017) (Map of Alluvial Areas Within The Provincial Borders of Edirne)



Şekil 9. Tabaka Kalınlığına Bağlı Binalarda Meydana Gelen Hasar Oranı (Uyanık, 2015). (Damage Rate in Buildings Depending on Layer Thickness)

Edirne ili Keşan, Enez ve İpsala ilçelerinin üzerinde kurulduğu zeminlerin ayrıntılı mikrobölgeleme araştırmasına rastlanmamıştır. Bu nedenle ilçelerin KAF'na çok yakın olması ve deprem riskinin yüksekliğinden dolayı, sadece bu deprem riski dikkate ele alınarak planlama çalışması yapılmıştır.

4. Deprem (Afet) Riskini Azaltma da Planlamanın Rolü (The Role of Planning in Reducing the Risk of Earthquake (Disaster))

Önemli bir deprem bölgesinde imar planları yapılırken afete duyarlı planlama süreci önemli bir yer tutmaktadır. Kuşkusuz, sadece depremsellik açısından değil diğer afet olayları için de bütüncül bir planlama anlayışı gereklidir. İyi bir planlama afet anında mümkün olduğunca zararı en aza indirgeyen planlamadır. Mevcut yerleşimin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi amacına yönelik yapılan planlama çalışmaları afet anında en az zararla kurtulmada önemlidir. Afet öncesinde alınacak tedbirler sadece afet riskini en aza indirmemekte aynı zamanda afet anında ve sonrasında müdahaleyi kolaylaştırmada da önemli bir yer tutmaktadır. Planlama süreci, üst ölçekli planlardan başlanarak alt ölçekli planlara kadar inilmesini gerektirmektedir.

Afetlere ilişkin uygulamalar kapsamında hedefleri, kapsamı ve yöntemleri açısından farklılaşan dört ana planlama biçimi bulunmaktadır (Balamir vd., 2008):

- **Yara Sarma Planı (reconstruction plan):** Afet sonrasında 'zararları gidermek' için yapılan plandır.
- **Acil Durum (7269) Planı (emergency preparedness plan/contingency plan):** Acil duruma hazırlıklı olmak için yapılan plandır.
- **Sakinim Planı (mitigation plan):** Afet öncesinde riskleri azaltmak için yapılan plandır.
- **Dirençli Gelişim Planı (resilience plan):** Toplumsal direnci artırmak, gelişme dinamiklerini yönlendirmek ve sürdürülebilir toplumsal yapılanma için risk azaltma, önleme, paylaşma hedeflerine yönelik planlama çalışmalarını kapsar, çalışma düzeylerine göre farklılık gösterir.

Bu bağlamda özellikle afet öncesi riski azaltmak için sakınım planlaması önem kazanmaktadır. Balamir vd. (2008)'nin yaptığı GSRT ve TÜBİTAK tarafından desteklenen proje sonuç raporunda sakınım planlaması şu şekilde tanımlanmıştır:

"Sakinim Planı: Doğal ya da teknolojik tehlikeler nedeniyle yüksek risklerin yer aldığı bölgeler, alt bölgeler ve yerleşme birimlerinde risk sektörlerini tanımlayarak, sektörel risk yönetim biçimlerini belirleyen, her risk sektöründe veri tabanı geliştirme yöntemini açıklayan, sektörün ilgililerini, yönetim biçim ve zamanlaması ile denetim ve izleme sorumlularını belirleyen, ilgili idareler, özel kuruluşlar, sivil toplum kuruluşları ve yerel topluluk yönetimlerinin işbirliği ile uzun, orta ve kısa dönemlerde topyekun risk yönetimi için hazırlanan, bölge, alt bölge, il çevre düzenleme ve çevre düzenleme planları ile imar planlarına risklere ilişkin mekansal bilgiler aktaran ve ilgili yönetmelikte belirlenen belgelerden oluşan bir plandır."

Sakinim planlaması özellikle zarar azaltma yöntemi olarak fiziksel planlamada önem kazanmaktadır ve faydaları şu şekilde sıralanabilir;

- Potansiyel riski azaltmak
- Afetlerin sonuçlarını hafifletmek ve etkilerini sınırlamak

- İkincil tehlikelerin oluşumunu engellemek
- Müdahaleyi kolaylaştırmak
- Acil yardım aşamasında genel yaşama düzenini örgütlemek
- İyileştirme aşamasında normale dönüşü kolaylaştırmak
- Rasyonel kaynak kullanımını sağlamak

Bu nedenle öncelikle kentleşme sürecinde yasalara, imar faaliyetlerinde yer ve zemin etütlerine uygun planlamaların yapılmasını sağlamak ve uygulamak en önemli önceliklerdir. Zarar azaltma planları mutlaka tehlike ve risk analizine dayandırılmalıdır. Bu nedenle sakinim planlaması deprem riski taşıyan alanlarda daha da önem kazanmaktadır.

Bunun için de planlama sürecinin ilk ve en önemli aşaması doğru veri toplama aşamasıdır. Veri toplama aşaması sürekli ve güncellenerek devamlılığını koruması gerekmektedir. Kadioğlu'na (2008, shf:16) göre afete yönelik veri tabanı elde ediminde özellikle deprenselliğin belirlenmesi açısından, a. Jeolojik Veri Tabanı: Jeolojik haritalama, neotektonik veriler, deprem kaynaklarının belirlenmesi (diri faylar) ve paleosismoloji, şiddet belirlemeye yönelik deprem senaryoları, b. Sismolojik veri tabanı: Ulusal Sismik Ağ, c. Jeodezik veri tabanı: Ulusal GPS Ağı önemlidir. Bu doğrultuda geliştirilecek ulusal ve uluslararası ölçekteki sismik ağ veriye ulaşımı ve kullanımını kolaylaştıracağı gibi süreç içerisinde gerekli güncellemelerin yapılmasında da önemli bir rol oynayacaktır. Planlama süreci de durağan bir süreç olmayıp güncel ve yeni veriler doğrultusunda süreklilik arz eden ve yenilenen bir olgudur. Böylesi bir ağ güncel verilerin ihtiyaç duyulduğu anda elde edilmesinde büyük önem arz etmektedir.

Bunların yanı sıra planlamaya da veri oluşturan;

- Kentsel ulaşım ağı (ana yollar, otoyollar, ulaşım aksları vs.)
- Kentsel alt yapı durumu (su, kanalizasyon, drenaj, doğal gaz, haberleşme, elektrik, yangın suyu, vb.)
- Binaların imar durumu (kat yükseklikleri, yol genişlikleri, yoğunluk bilgileri), bina yoğunlukları (kişi/hektar),
- Yerleşmedeki kritik binalar,
- Binaların tarihsel niteliği,
- Binaların yaşı ve yıpranmışlığı,
- Arazi ve bina mülkiyeti
- Nüfus ve demografik yapı özellikleri,
- Jeolojik veriler

vb. önemli bir veri setini oluşturmada ayrıca önemlidir.

Afete duyarlı bir planlamada elde edilen veri setleri sonucunda kent planlarında öncelikli olarak belirlenmesi gerekli alanlar bulunmaktadır. İyi bir afete duyarlı planlama çalışması bunların doğru ve yerinde yapılması ile mümkün olmaktadır. Bunların yanı sıra Kriz yönetimi ve Acil Müdahale Planları da bu süreçte önem kazanmaktadır.

- 1- Ulaşım sisteminin düzenlenmesi; Kent planlarında özellikle "ulaşım ve erişilebilirlik" öncelikli olarak yer almaktadır. Afetlere karşı risk değerlendirmesinde mevcut yolların kapasitesi, yol kademe bilgileri, akım yönü ve fiziksel niteliği, alternatif ulaşım olanakları vs. gibi bilgileri içermekte olup afetlere karşı "acil ulaşım planlarının" gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Afet anında kullanılacak ana ulaşım aksı ile buna alternatif kademe yol bilgi ve düzenlemelerinin yapılması gerekmektedir.
- 2- Lojistik depo ve dağıtım noktaları; Deprem anında ihtiyaç dahilinde gerekli olan malzemelerin toplanıp en kısa sürede dağıtılabilmesi için doğru noktalarda, eşit uzaklıkta ve ulaşım açısından kolaylıkla erişilebilir mesafede olacak şekilde oluşturulması gerekli alanlardır.
- 3- Acil sağlık bilgileri ve planlamaları; Bu noktada özellikle sağlık kuruluşlarının yeri ve ulaşılabilirliği önemli bir yer tutmakta, bu tarz alanlar belirlenirken afet durumu göz önünde bulundurularak konumun belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca sağlık alanlarının yetersiz kaldığı durumlarda acil sağlık çadırlarının kurulacağı alanlar belirlenmelidir.
- 4- Arama-Kurtarma ekip toplanma bölgeleri; Afet sonrasında yardım ve kurtarma ekiplerinin müdahale öncesi toplanıp bilgilendirildiği, hazırlık çalışmalarının yapıldığı ve süreç içerisinde dinlenip yeniden müdahale için hazırlandığı alanlarında planlama süreci içerisinde belirlenmesi gerekmektedir.
- 5- Afet anında geçici toplanma alanları; Büyük olmamakla birlikte her komşuluk birimi ölçeğinde, bulunduğu alanın nüfusuna yetecek kadar geçici toplanma alanlarının oluşturulması gerekmektedir. Bu alanlar birkaç

- saat veya bir gün boyu kişilerin geçici süre güvenli bir şekilde barınmalarını sağlayacak genellikle açık alanlardır ve yerleşim birimlerine en yakın noktada yer alırlar.
- 6- Su ve gıda temin edilecek yerler; Yine afet sonrası ihtiyaç duyulan ve alana ulaştırılan yiyecek ve su için depolama alanları ile su kaynakları ve yiyecek temin edilen alanların tespiti ve koruyucu önlemlerinin alınması gereklidir.
 - 7- Geçici iskân ve çadır alanları; Afet sonrası barınma ihtiyacı bulunan insanların barınmalarını sağlamak için geçici iskan alanları ve çadır alanlarının ayrılması gereklidir.
 - 8- Enkaz döküm alanları. Afet sonrası kentte meydana gelen yıkım sonucu oluşan enkazların acilen müdahale edilerek toplanıp kent dışına taşınması gereklidir. Enkaz kalıntıları yolları ve acil müdahale alanlarını kapatacağından bir an önce müdahale edilerek hızlı bir şekilde transfer edilmesi gerekmektedir.
 - 9- Helikopter pistleri. En hızlı yardım ulaştırma yönteminin başında hava yolu ulaşımı gelmektedir. Bu nedenle afete duyarlı planlama da helikopter pist alanlarının belirlenmesi ve bu alanların ana depo, çadır ve sağlık alanlarına yakın konumda yer seçmesi gereklidir.
 - 10- Kritik bina ve tesislerin detay bilgileri. Afet anında toplu halde kullanıma uygun bina alanları ile afet yönetim merkezi ve müdahale için önemli binaların tespit ve değerlendirilmesi gerekmektedir.
 - 11- Kriz Yönetimi; Temel amacı afet sonrası krizi engellemek, engellemek mümkün değilse en az hasarla atlatılmasını sağlamak için yapılan hazırlıklardır. İyi bir kriz yönetimi, afet sonrasında oluşabilecek sorunların çözümlenmesinde önemli bir aşamadır.
 - 12- Acil Müdahale Planları; Acil durum gerektiren olaylarda yapılacak, müdahale, koruma, arama-kurtarma ve ilkyardım konularının nasıl ve kimler tarafından yapılacağını gösteren ve acil durum öncesinde hazırlanması gereken planlardır.

Kriz Yönetimi ve Acil Müdahale Planların başarılı olması afet öncesinde yapılması gereken yukarıda da detaylı olarak verilmiş olan ön hazırlıkların başarılı olmasına bağlıdır. Bu bağlamda sakinim planlamasının yapılması büyük önem arz etmektedir. Yukarıda belirtilenlerin yanı sıra (Tezer ve Türkoğlu, 2008, s.69);

- 13- Yeni gelişme alanlarının tehlike alanlarından uzak alanlara yöneltilmesi, altyapı hizmetlerinin de bu yönde geliştirilerek gelişmenin tehlike içermeyen alanlara yönlendirilmesinin teşvik edilmesi,
- 14- Tehlikeli alanlarda bulunan mevcut yerleşmelerin aşamalı olarak boşaltılarak güvenli alanlara taşınması,
- 15- Risk taşıyan alanlarda öncelikli olarak kamusal kullanımda bulunan yapıların ve diğer tüm yapıların dayanıklılığının artırılması,
- 16- Doğal kaynakların korunması (sulak alanlar, içme suyu havzaları, orman alanları, nehir koruma kuşakları vb.nin korunması, rehabilite edilerek artırılması ve gerekli kamulaştırmaların yapılması, kamusal alanlar olarak planlanması
- 17- Doğal önlemlerin yetersiz kaldığı alanlarda gerekli plan ve çalışmalar yapılarak tehlike riskinin önlenmesi veya azaltılması için dere islah çalışmaları, güçlendirilmiş altyapı uygulamaları, heyelan önleme bentleri gibi mühendislik uygulamalarının tercih edilmesi,
- 18- Zarar azaltma ile ilgili yasa ve yönetmeliklerin uyumlu olarak uygulanmasının sağlanması, örneğin şehir planları, imar ve yapı yönetmelikleri ve afet yönetmeliklerinin birbiri ile uyumunun sağlanması,
- 19- Kıyı alanlarının yapılaşmaya açılmaması veya özel yapılanma koşullarının uygulanması,
- 20- Planlama süreci boyunca katılımın sağlanması ve bilgilendirmelerin yapılması, toplumu dirençli kılacak bilinçlendirmenin sağlanması,

gerekmektedir.

Sürecin Mekansal Planlamaya Aktarımı ise aşağıdaki şekilde olmalıdır;

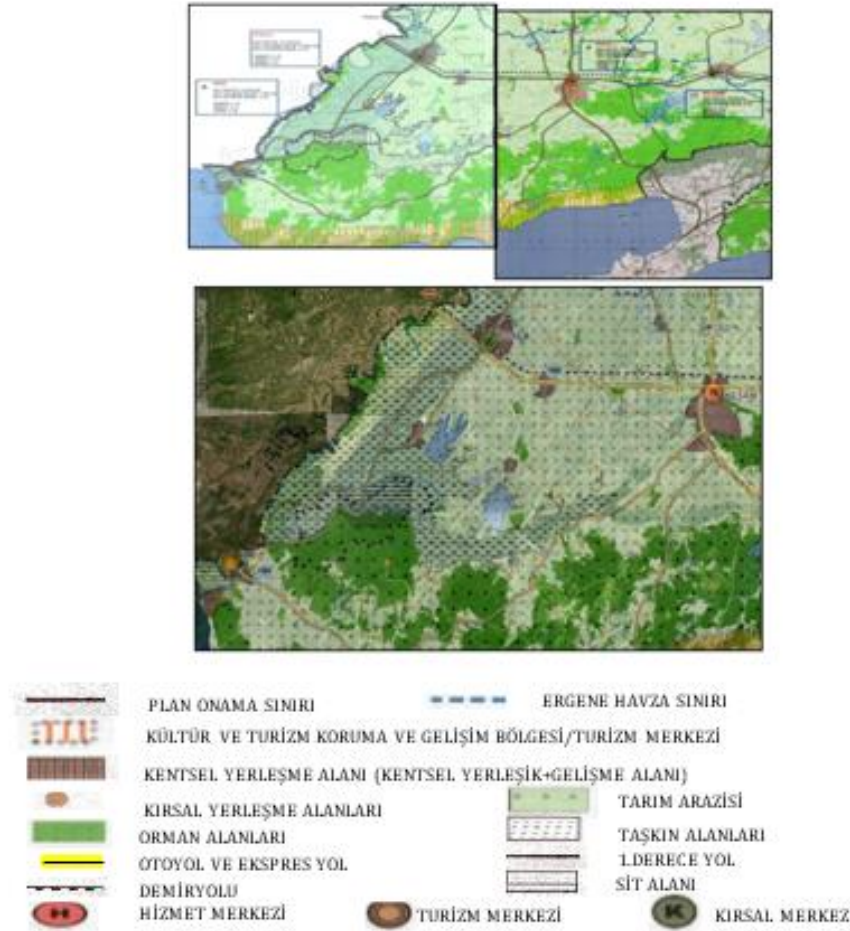
- Ulaşım sistemi yeniden ele alınıp değerlendirilmeli, hasar görme ihtimali olan her türlü otoyol, demiryolu, köprü ve viyadükler daha detaylı analiz edilmeli, gerekli görülenler öncelikle güçlendirilmeli ve alternatif güzergahlar için çalışma yapılmalı,
- Aktif veya muhtemel heyelan, kaya düşmesi, çığ, fay hattı gibi tehlikelere sahip alanlar, mekansal planlamada aktif yeşil alanlar veya rekreasyon alanları olarak planlanmalı,
- Depremselliği yüksek alanlar özellikle açık alanlar ve rekreasyon alanları olarak planlanmalı, eğer yerleşime açılma zorunluluğu varsa özel olarak depreme karşı güçlendirilmiş olmak kaydıyla düşük yoğunluklu, mümkün olduğunca ayırık nizam olarak planlanmalı,
- En güvenli yerler ise, bir depremden sonra hemen kullanılması gereken hastane, afet yönetim merkezleri, itfaiye grupları, büyük okullar ve yurtlar gibi yapılarla yüksek yoğunluklu konut ve ticaret merkezleri olarak kullanılmalı,

- Planlamaya esas olan diğer doğal ve yapay eşiklerle, analitik etüt sonuçları da dikkate alınarak, yeni planlanacak bölgelerde mikro bölgeleme çalışmaları yapılmalı ve bu bölgelemelere uygun olarak planlama koşulları, arazi kullanım deseni, yapı nizamı ve yoğunlukları ile nüfus yoğunlukları belirlenmeli,
- Yeni plan çalışması yapılmıyacaksa mevcut planlar bu doğrultuda yeniden ele alınıp gerekli irdelemeler yapıldıktan sonra revizyonları yapılmalı,
- Kentin ekonomik yapısı ile ilgili olarak ise; sanayi ve ticaret alanları için depreme en dayanıklı alanlarda yer seçimi yapılmalı, daha önceki planlarda riskli alanlarda yer seçen sanayi alanlarının taşınarak organize sanayi bölgeleri oluşturularak bu alanlara taşınmaları teşvik edilmeli, ticaret alanları için de yine kentte depreme dayanıklı alanlarda yer seçimi ve gelişim alanları belirlenmeli, ticari merkezlerin ve alt merkezlerin bu alanlarda oluşumu sağlanmalı, bu konuda meslek kuruluşları ve kurumların uyarılarak sürecin hızlandırılmasında gerekli önlemler alınmalı, deprem riski alanlarda oluşmuş ticaret alanlarında ise yapı ölçeğinde güçlendirme çalışmalarının yapılmalı, zararı azaltacak özel önlemler alınmalı,
- Kültürel miras alanlarının korunması için özel planlama koşulları belirlenerek önlemler alınmalı, gerektiği durumda kazı çalışmalarının hızlandırılarak taşınabilir olanların aktarılabilmesi için açık veya kapalı müze alanları, arkeopark vb. alanların planlarda ayrılması ve böylelikle korunabilirliğinin sağlanması, taşınmaz durumda olan tescilli kültürel varlıklarda ise restorasyon çalışmalarının hızlandırılarak depreme dayanıklı özel yapı önlemlerinin alınması sağlanmalıdır.

5. İpsala, Keşan ve Enez İlçelerinin İmar Planlarının Depreme Duyarlı Planlama Yaklaşımı Açısından Değerlendirilmesi (Evaluation of Development Plans of Ipsala, Keşan and Enez Districts in Terms of Earthquake Sensitive Planning Approach)

İpsala, Keşan ve Enez ilçeleri Edirne ilinin güneyinde, depremselliği en yüksek olan ilçelerdir. İlçe bütününe genel özellikleri açısından incelendiğinde tarımsal karakteristiği yüksek ve birbirine komşu olan ilçelerdir. Bununla birlikte Keşan ve Enez denize kıyısı olması nedeni ile önemli turizm alanlarına da sahiptir. Keşan ilçesi; TÜİK 2020 verilerine göre 83.399 kişilik nüfusa sahip olup ilçe merkezinde nüfus, 63.965 kişidir. Özellikle sahile yakın kesimlerde yaz nüfusunun arttığı oldukça arttığı da gözlenmektedir. Aynı zamanda Edirne ilinin en büyük ilçesidir. İlçe ekonomisinde tarım birinci sektör olarak yer almaktadır. İpsala ise TÜİK 2020 verilerine göre ilçe toplamında 26.796 kişilik nüfusa sahiptir ve ilçe merkezi, 8.524 kişidir. İlçenin ekonomisinde tarım birinci sırada yer almaktadır. İpsala ve Keşan aynı ulaşım ağı üzerinde yer almakta ve tarımsal niteliği ağır basan ilçelerdir. Enez ilçesi ise TÜİK 2020 verilerine göre 10.667 kişilik nüfusa sahiptir ve ilçe merkezinin nüfusu ise 4.181'dir. İlçe ekonomisi tarım ve hayvancılığa ve balıkçılığa dayanmaktadır. Bununla birlikte denize kıyısı olması nedeni ile önemli bir sayfiye merkezi olup ilçenin yazlık nüfusu 100.000'i geçmektedir. Aynı zamanda ilin en güneyinde ve fay hattına 36 km uzaklıktadır.

Her üç ilçe için yapılmış olan üst ölçekli planlama çalışması "Trakya Alt Bölgesi Ergene Havzası 1/100.000 Ölçekli Revizyon Çevre Düzeni Planı"dır. 24/08/2009 tarihinde onaylanmış ve askı sürecinde yapılan itiraz başvurularının incelenmesi sonucunda yapılan değişiklikler sonucunda, 01/07/2010 tarihinde onanmıştır (Şekil 10). Süreç içerisinde farklı tarihlerde revizyon ve değişiklikler yapılmış ve 08/04/2021 tarihinde yapılan değişiklik ile son halini almıştır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (c), 2010).

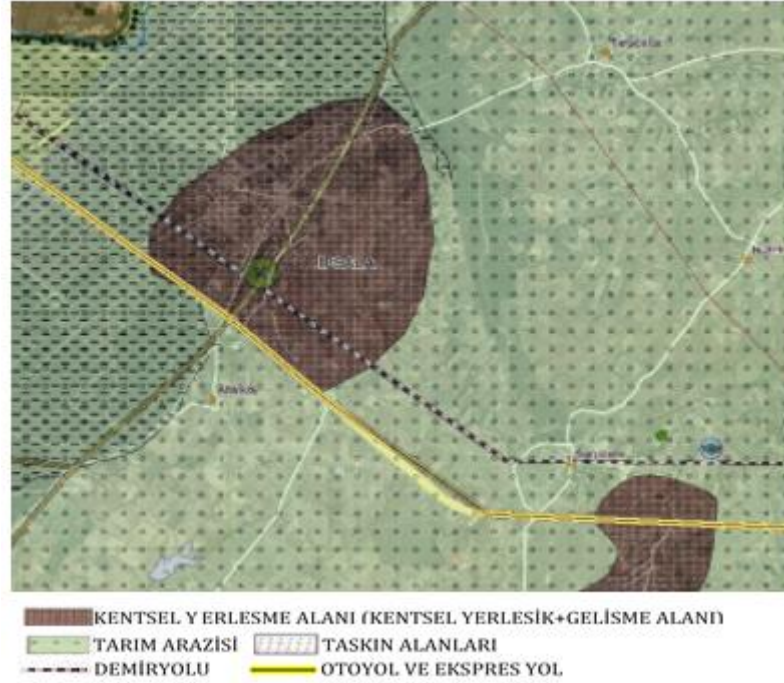


Şekil 10. Trakya Alt Bölgesi Ergene Havzası 1/100 000 Ölçekli Revizyon Çevre Düzeni Planı (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (a-b), 2010; Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri, 2020) (Thrace Sub-Region Ergene Basin 1/100 000 Scale Revision Environmental Plan)

Depreme ilişkin olarak plan raporu incelendiğinde Plan raporunda mutlak korunması gereken alanlar başlığı altında, b. Sakıncalı Alanlar bendinde deprem riski açıkça şu şekilde belirtilmiştir.

“Marmara denizinde ve karada yapılan jeolojik, jeomorfolojik, jeofizik ve sismolojik araştırmalar; Trakya Alt Bölgesi’ni etkileyecek deprem kaynak zonunun, esas olarak kuzey Marmara’da yer alan ve Saros Körfezi’ne uzanan Kuzey Anadolu Fayı’nın Marmara denizi içerisindeki devamı üzerinde olacağına dair genel bir kanaat oluşturmuştur. 7 veya daha büyük şiddetteki bir depremin bu fay zone üzerinde olasılık hesaplama yöntemlerine göre gerçekleşmesi olasılığı, 2004 yılından itibaren gelecek 30 yılda %35 ile %70’dir. Bu durum yerleşim birimleri ve yeni yapılaşmalar bakımından önemsenmelidir.

Kuzey Marmara ile Saros Körfezi arasında uzanan Ganos Fayı ve çevresinde maruz kalınabilecek olası yer ivmelerinin büyüklüğü, yerleşim kararları aşamasında önemle ele alınmalıdır. Bölgedeki jeoloji ve sismoloji konularındaki akademik ve mühendislik çalışmaları artırılmalıdır. Seçilecek belirli noktalarda kuvvetli hareket sismografi çalıştırılmalı ve kayıtları analiz edilmelidir.”



Şekil 11. İpsala İlçesinin 1/100.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planındaki Konumu ve Özellikleri (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (B), 2021) (Location and Characteristics of Ipsala District in The 1/100.000 Scale Environmental Plan)

Bu bilgiler ışığında söz konusu ilçeler üst ölçekli 1/100.000 Çevre Düzeni Planı'nda incelendiğinde İpsala'nın tarımsal niteliği devam ettirilen ilçelerden biri olduğu ve IV. Kademe merkez olarak belirlendiği görülmektedir. Plan raporuna göre (2010) *“Orta merkez” karakteri taşıyan III. ve IV. Kademe Kentsel Merkezler Grubu'nun konumları ve işlevleri önem taşımakta olup, bunlar kısmen sanayi üretimine destek veren merkezler olabildiği gibi tarımsal sanayi türünde faaliyet gösteren merkezler olarak da belirlenmiştir*. Buna paralel olarak yerleşik dokunun dışındaki alan tarım alanı ve tarımsal alt bölge olarak önerilmiştir. İpsala planda “Kırsal Merkez” olarak belirlenmiştir (Şekil 11). İlçenin taşkın alan sınırları içerisinde de yer almasının yerleşmenin kırsal merkez olarak belirlenmesinde rol oynadığı düşünülmektedir. 1/100.000 Çevre Düzeni Planı'na göre 2023 plan nüfusu 32.100'dir. 2007 yılı nüfus verisi baz alınarak (30.240 kişi) yapılan planda toplamda 2000'den az bir nüfus artışına gidildiği görülmektedir. İlçenin 2023 yılı sektörel dağılımı ise şu şekilde belirlenmiştir; sanayi:1.100 kişi, hizmetler:3.700 kişi, tarım:14.000 kişi toplam 18.800 kişidir. Ulaşım özelliklerine bakıldığında demiryolu ve Avrupa E-yolları ağının Türkiye'de bulunan bir parçası olan Avrupa E-yolu E84 veya D110 Karayolu üzerinde yer aldığı görülmektedir. Ayrıca, Yunanistan ile olan bağlantıların güçlenmesi kapsamında, bölgenin güneyinde, İstanbul uzantılı olan yeni bir demiryolu hattı önerilmektedir. Hat Silivri, Marmara Ereğlisi, Tekirdağ, Malkara, Keşan, İpsala güzergâhını izleyerek Yunanistan ile yeni bir bağlantı kurmaktadır.

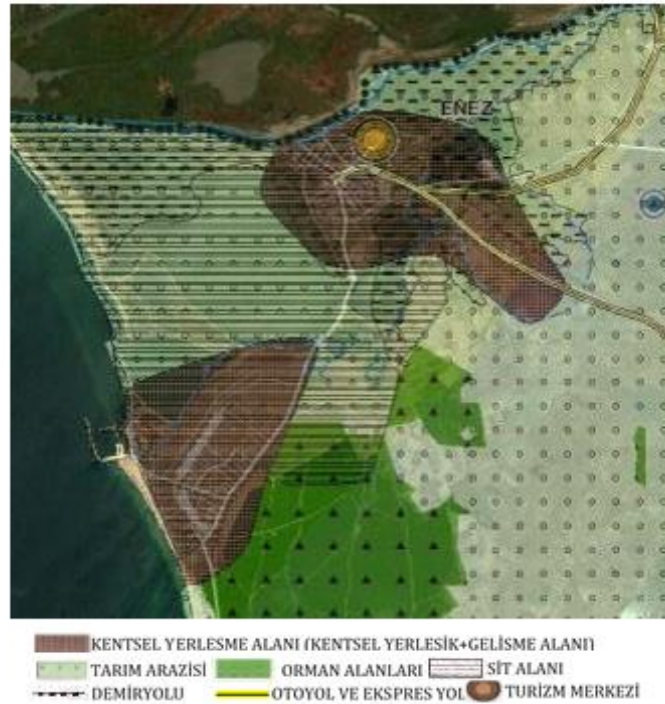
Depremden etkilenmesi açısından değerlendirildiğinde; İpsala ilçesi, aktif faya uzaklığı 65 km. civarında olup Enez ve Keşan kadar yakın olmasa da gene de ciddi deprem kuşağı içerisinde yer almaktadır. Ayrıca taşkın alanlarının yer alması, tarımsal niteliğinin yüksek olması ilçe açısından diğer önemli hususlar olup yapılaşma kararlarının bu doğrultu da gerçekleştirilmesi olumlu görülmektedir. Bunun yanı sıra nüfus artışının da fazla olmaması (2.000'den az) ilçe için avantajlı bir karar oluşturmuştur. Planla tarımsal niteliğinin korunması nüfus artışının fazla olmaması deprem riski açısından önemli bir unsur olmasına rağmen zemin etütleri açısından detaylı bir araştırma sonucunda sivilaşma riskinin de belirlenip plan kararlarına yansıtılması ayrıca önem arz etmektedir. Bu nedenle alt ölçeklere inildiğinde özellikle depremsellik ve jeofizik- jeolojik veriler ışığında değerlendirilmesi gereken verilen arazi kullanım deseni ve yapılaşma koşullarının uygunluğu sonraki bölümlerde daha detaylı olarak irdelenecektir.



Şekil 12. Keşan İlçesinin 1/100.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planındaki Konumu ve Özellikleri (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (B), 2021) (Location And Characteristics of Keşan District in The 1/100.000 Scale Environmental Plan)

Yine üst ölçekli 1/100.000 Çevre Düzeni Planı incelendiğinde Keşan için alınan imar kararları şu şekilde belirlenmiştir. Keşan konumu nedeni ile ana ulaşım aksları üzerinde olması ve eğilimlere paralel olarak 2. Kademe merkez olarak belirlenmiştir (Şekil 12). Plan raporunda ayrıca Keşan ilçe merkezinde önerilen gelişmede, Tekirdağ-İpsala ve Edirne-Çanakale bağlantılarının kesişiminde yer almasının ve önemli tarımsal merkezlerle çevrenin bu süreçte önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Bu bağlamda 2. Kademe merkezler için farklı kriterler baz alınarak hizmet fonksiyonlarında ihtisaslaşmaları ve bölgede öne çıkmaları önerilmiştir. Bu nedenle de Keşan da "hizmet merkezi" olarak belirlenmiştir. Bu merkezlerde hizmet, ticaret, finans, eğitim, fuar ve turizm-kültür aktivitelerinin yoğunluk kazanacak ve desteklenecek şekilde geliştirilmesi önerilmiştir. Keşan'ın ise özellikle çevresindeki kırsal ve turizm merkezlerine hizmet sağlayan merkez olarak geliştirilmesi öngörülmüştür. Planla yerleşik doku dışındaki alan tarım alanı ve orman alanı olarak belirlenmiştir. Ayrıca agro-eko turizmi, doğa ve spor turizmi gibi turizme yönelik kararlarda yer almaktadır. Yine Keşan da İpsala gibi Demiryolu ve Avrupa E-yolu E84 veya D110 Karayolu, (Avrupa E-yolları ağının Türkiye'de bulunan bir parçası) üzerinde yer almaktadır. İpsala ile aynı güzergah üzerinde olması nedeni ile İpsala için önerilen demiryolu hattı güzergahında Keşan'da bulunmaktadır. 1/100.000 Çevre Düzeni Planı'na göre 2023 plan nüfusu 93.000'dir. 2007 yılı nüfus verisi baz alınarak (77.442) yapılan planda toplamda yaklaşık 16.000 kişilik bir artışa gidildiği görülmektedir. Hizmet merkezi önerilmesi nedeni ile nüfusunda önemli bir artış önerisi olduğu gözlenmiştir. 1/100.000 Çevre Düzeni Planı'na göre ilçenin 2023 yılı sektörel dağılımı şu şekilde belirlenmiştir; sanayi: 3.300 kişi, hizmetler: 22.000 kişi, tarım: 19.000 kişi toplam 44.300 kişidir.

Depremden etkilenmesi açısından Keşan ilçesi değerlendirildiğinde; aktif faya uzaklığı 35 km civarında olup aynı zamanda bu faya en yakın ilçe ve bu nedenle de deprem riski açısından en yüksek riske sahip ilçe konumundadır. Ayrıca tarımsal niteliğinin yüksek olması ve orman alanları ile çevrili olması, deniz kenarında olması ilçe de diğer önemli eşiklerdir. Bununla birlikte ilçenin planla 2. Kademe merkez ve buna paralel olarak "hizmet merkezi" olarak belirlenmiş olması ilçeye önerilen plan nüfusunda oldukça büyük bir nüfus eklenmesine (16.000 kişi) neden olmuştur. Aktif faya en yakın ilçe olarak kente ciddi bir nüfus eklenmesi önemli bir handikaptır. Depremsellik bakımından ve diğer zemin etütleri açısından da detaylı bir araştırma yapılarak zemine ait parametrelerin ve sıvılaşma riskinin belirlenmesi plan kararlarının daha sağlıklı geliştirilmesinde önemli bir faktör olacaktır. Bu nedenle alt ölçeklere inildiğinde özellikle depremsellik ve diğer jeofizik-jeolojik veriler ışığında değerlendirilmesi gereken verilen arazi kullanım deseni ve yapılaşma koşullarının uygunluğu Keşan için de sonraki bölümlerde daha detaylı olarak irdelenecektir.



Şekil 13. Enez İlçesinin 1/100000 Ölçekli Çevre Düzeni Planındaki Konumu ve Özellikleri (Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri, 2020) (Location And Characteristics of Enez District in The 1/100.000 Scale Environmental Plan)

Araştırma konusu diğer bir ilçe ise Enez ilçesidir. İlçe V. Kademe merkezdir ve bu grupta yer alan yerleşmeler doğrudan kırsal kesime hitap eden yerleşmelerdir. Her ne kadar tarımsal niteliğini devam ettirmesi nedeni ile planda tarımsal alt bölge olarak belirlenmiş olsa dahi üst ölçekli 1/100.000 Çevre Düzeni Planında ana kullanım kararı Enez ilçesi için “turizm merkezi” olarak planlanmış olmasıdır. Bunda en büyük etken kentin deniz kenarına kıyısı olmasıdır. Bunun yanı sıra aynı zamanda ilçenin büyük bir bölümünün sit sınırları içerisinde kalmasından dolayı önemli bir kültürel miras alanı olmasına ve bunun da turizm açısından potansiyel olarak değerlendirilmesine neden olmaktadır. Yerleşim alanı dışındaki bölge tarım ve orman alanı olarak belirlenmiştir (Şekil 13). İpsala ve Keşan’a doğrudan bağlanan ana karayolu üzerinde yer almaktadır. Aynı zamanda tarımsal alt bölge olarak da belirlenmiştir. 1/100.000 Çevre Düzeni Planı’na göre 2023 plan nüfusu 14.500’dir. 2007 yılı nüfus verisi baz alınarak (10.714) yapılan planda toplamda yaklaşık 3.800 kişilik bir artışa gidildiği görülmektedir. Turizm merkezi önerilmesi nedeni ile nüfusunda İpsala’ya oranla önemli bir artış olduğu gözlenmiştir. 1/100.000 Çevre Düzeni Planı’na göre ilçenin 2023 yılı sektörel dağılımı şu şekilde belirlenmiştir; sanayi: 400 kişi, hizmetler: 1.900 kişi, tarım: 5.000 kişi toplam 7.300 kişidir.

Enez İlçesi’nin depremden etkilenmesi açısından değerlendirildiğinde; aktif faya uzaklığı 36 km civarında olup aynı zamanda Keşan gibi, faya en yakın ilçe konumundadır. Bu nedenle depremsellik açısından en yüksek riske sahip ilçelerden biridir ve üstelik denize kıyısı olan bir yerleşmedir. Ayrıca halen tarımsal niteliğini önemli ölçüde koruyan ilçelerden biridir. Bununla birlikte ilçenin denize kıyısı olması ve önemli bir sit alanı içerisinde yer alması “turizm merkezi” olarak belirlenmesine neden olmuş bu da ilçeye önemli bir nüfus artışı (yaklaşık 4.000 kişi) getirmiştir. Aktif faya en yakın ilçelerden biri olarak önemli oranda bir nüfus eklenmesinin deprem riski açısından ciddi sakıncalar yaratması muhtemeldir. Ek olarak belirtilmelidir ki, Edirne kent merkezinin sayfiye yeri gibi bir niteliği ve İstanbul Üniversitesi ve Trakya Üniversitesinin de yazlık tesisleri bulunmaktadır. Bu durumda Haziran - Eylül ayları arasında İlçe nüfusunun kat kat arttığı bir gerçektir. Bu nedenlerle yine depremsellik bakımından da, mikrobölgeleme açısından da detaylı bir araştırma yapılarak yine sivilaşma riskinin de belirlenmesi plan kararlarının daha sağlıklı geliştirilmesinde önemli bir faktör olacaktır. Bu nedenle alt ölçeklere inildiğinde özellikle depremsellik ve diğer jeofizik-jeolojik veriler ışığında değerlendirilmesi gereken verilen arazi kullanım deseni ve yapılaşma koşullarının uygunluğu sonraki bölümlerde bu ilçe için de daha detaylı olarak irdelenecektir.

6. İpsala, Keşan ve Enez İlçeleri 1/5.000 Ölçekli Nazım İmar Planlarının Depreme Duyarlı Planlama Yaklaşımı Açısından Değerlendirilmesi (Evaluation of Ipsala, Keşan and Enez Districts 1/5.000 Scale Master Development Plans in Terms of Earthquake Sensitive Planning Approach)

Bir yerleşmenin planlanmasında birçok unsur büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle veri toplama ve analiz aşaması planlama sürecinin en önemli ve en uzun süren aşamalarından birisi olup aynı zamanda disiplinler arası bir çalışmayı gerektirmektedir. Yerleşime ilişkin sosyal, ekonomik, fiziksel vb. verilerin toplanıp mesleki

uzmanlıklar çerçevesinde değerlendirilerek planlama sürecine dahil edilmesi önemli ve uzun bir süreçtir. Bu verilerin doğru bir şekilde değerlendirilerek planlamaya girdi teşkil etmesi sağlıklı yerleşim alanlarının oluşumunda oldukça önemlidir. Bu süreçte özellikle deprem gibi afete duyarlı alanların planlanması ayrı bir önem teşkil etmekte ve sürecin bu doğrultu da derinlemesine analiz edilerek gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Planlanacak alanın yer seçimi, planlamaya ilişkin kriterlerin belirlenmesi alanın deprem riskini azaltmada büyük önem taşıyacaktır.

Balyemez (2003), bir depremin etkili olduğu belli başlı parametreleri Celep ve Kumbasar (2000)'dan şu şekilde aktarmıştır; depremin büyüklüğü, bölgenin enerjinin çıktığı kaynağa olan uzaklığı, kaynaktan yayılan deprem dalgasının bölgeye gelinceye kadar geçtiği ara bölgenin jeolojik yapısı, deprem enerjisinin kaynaktan çıkma türü, ara bölgede bulunan faylarda veya serbest yüzeylerde deprem dalgasının kırılması ve yansıması ve bölgenin zemin durumu vb. Bu nedenle özellikle planlama çalışmaları yapılırken planlama yapılacak alanın ve çevresinin zemin etütlerinin ve jeolojik (/jeofizik) yapısının çok iyi bir şekilde analiz edilmesi ve birincil girdi olarak kullanılması gerekmektedir. Bu noktada disiplinlerarası bir çalışmanın yapılması gerekliliği yine önem kazanmaktadır.

Bununla birlikte özellikle yerleşim alanlarında deprem hasarını etkileyen birçok başka etmen de devreye girmektedir. Özellikle zemin yapısına ilişkin olarak sıvılaşma durumu, heyelan bölgesi içerisinde yer alması, çökme vb. etmenler etkilidir. Çünkü zemin, depremi büyütürken deprem hasarını artırma da önemli bir rol oynayabilir. Örneğin dolgu alanı zemin yapılarında deprem etkisi büyümektedir. Dolayısıyla her ne kadar deprem dış merkezine (epicenter) yakınlık önemli ise de zeminin büyütme etkisi de o kadar önemlidir. Bu nedenle bu özellikler doğrultusunda yapıların planlanması, konumlanması, yüksekliği, formu, yapımı, kullanılan malzeme vb. birçok etmen deprem riskini azaltmada önemli faktörler arasındadır. Örneğin, yapı yüksekliği deprem riskini arttıran önemli etmenlerdendir. Bir binanın hakim periyodunu belirleyen en önemli değişkenin yükseklik olduğu ve yapının kat adedi arttıkça salınım periyodunun da büyüyeceği belirlenmiştir (Balyemez; 2003). Özellikle merkez üssüne uzak yerleşmelerde yüksek yapıların daha fazla zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bina periyodu da diğer bir önemli etkidir. Bu nedenle zeminin doğal periyodu ile yapının salınım periyodunun farklı olması, rezonans olayını engelleyeceği için, önerilen diğer bir yapılaşma kararıdır (Balyemez, 2003). Dolayısıyla planlama sürecinde plan şeması oluşturulurken zeminin hakim periyodunun belirlenmesi ve zemin periyoduna uygun ada formlarının oluşturulması önem arz etmektedir. Bina formu yine deprem sürecinde etken olan hususlardan birisidir. Aynı alan üzerinde bina formunda aşırı çeşitlenme, deprem riskini artırıcı bir rol oynayacaktır. Lagorio (1900)'dan aktaran Balyemez'e (2003) göre tavsiye edilen husus plan şemasının her iki ekseninde de simetrik olması düşey düzlemde de bina cephesindeki düzensizliklerin ve veya geri çekilmelerin olmaması gerekliliğidir. Diğer belirlenen husus yumuşak kat[†] özelliğidir. Özellikle zemin kat kullanımı ve üst kat kullanımı farklı olan binalarda bu duruma çokça rastlanılmaktadır. Bu tarz bir yapılaşma da zemin kat rijitliği üst katlara oranla küçük kalmakta ve yumuşak kat oluşumuna neden olmaktadır (Balyemez, 2003). Bunların dışında yapı ölçeğinde düşey kütle merkezi, katlar arasında yükseklik farkı, göreceli rijitlik, kısa kolon, taşıyıcı sistemlerde düşey elemanların süreksizliği, strüktürel yapı özelliği vb. birçok etmenlerin de yapılan çalışmalarla deprem hasarını artırıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle farklı kat yüksekliğine, kullanım desenine, strüktürel yapıya ve bina formuna sahip yapıların bitişik nizam olarak tasarlanması depremin yıkıcı etkisini arttırdığı, yine üst katlar ile zemin kat arasında taban alanı genişliğinin farklılığının da zemin kata ekstra yük bindirmesinden dolayı riski artırıcı bir durum olarak değerlendirilmektedir. Başka bir husus yapıların ve kentsel yapı adalarının deprem kuvvetine paralel olarak geliştirilmesidir (Balyemez, 2003). Aksi bir yapılaşma düzeninde yani paralel değil de dik olduğunda ortaya çıkan etki çok daha yıkıcı olmaktadır. Diğer bir husus yapı nizamıdır. Özellikle blok yapılarda bina uçlarında farklı deprem hareketi oluşması nedeni ile yıkım gücü artabilmektedir (Balyemez, 2003). Ayrık nizam tercih edilmekle birlikte binalar arasında yeterli çekme mesafelerinin de ayrılması önemli bir unsurdur. Her ne kadar ayrık nizam yapılaşma yapılmış olsa da gerekli çekme mesafeleri yapılmadığı takdirde, hasar riski gene yüksek olacaktır. Yapı ölçeğinde bu düzenlemelerin yanı sıra ulaşım sisteminin kurgulanması, özellikle geniş caddeler avantaj sağlamaktadır, kentsel teknik altyapı durumu, önemli yapıların (hastane, eğitim, kamu binaları, açık alanlar, parklar, tehlikeli madde içeren yapılar, sanayi yapıları vb.) konumları da bu süreçte önemlidir. Bu tarz öncelikli yapıların deprem riski en düşük alanlarda ve depreme en dayanıklı şekilde tasarlanması oldukça önemlidir. Bu yapılar kamusal yapılar olması ve birçok insanı aynı anda barındırması açısından da risk teşkil etmektedir. Ayrıca bu binalardan bir kısmı deprem sonrası kullanılacak önemli yapılar olması nedeni ile sadece deprem öncesi ve anında değil deprem sonrasında da önem kazanmaktadır.

Görüldüğü üzere depreme duyarlı bir planlama çalışması yapılırken bina ölçeğinden kent ölçeğine kadar alanın bir bütünlük içerisinde tasarlanması büyük önem arz etmektedir. Her ne kadar planlama sürecinde birçok unsurun detaylı olarak ele alınıp değerlendirilmesi gerekliliği önem kazansa da, yapılan çalışmada, bu detay düzeyine inilme imkanı veri yetersizliği ve birçok veriye ulaşılamamasından dolayı mümkün olamamıştır. Bu nedenle

[†] Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği. Binanın katları arasındaki rijitliğin farklı olması yumuşak kat düzensizliğini oluşturan bir etmendir.

yapılan çalışmada alan bütünü, yüksek deprem riski olan alan olarak kabul edilmiş ve mevcut planlar sakınım planlaması çerçevesinde değerlendirilmiştir. Buna paralel olarak plan bütünü, yapılaşma koşulları, ulaşım durumu, kamusal alanlar, açık alanlar ve parkların dağılımı vb. diğer özellikler değerlendirilerek plana yönelik revize edilmesi gereken alanlar ve yapılaşma koşullarına yönelik genel değerlendirmeler ve öneriler geliştirilmiştir. Her bir yerleşme için (İpsala, Keşan ve Enez) 1/5.000 ölçekli planlar elde edilmiş ve bu planlar özelinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Elbetteki yukarıda bahsedilen hususların bir kısmının değerlendirilmesi için daha derinlemesine bilgilere gereksinim olsa da (özellikle mikrobölgelmeye yönelik) çalışma sadece belirli hususlar konusunda öneri geliştirebilmiştir.

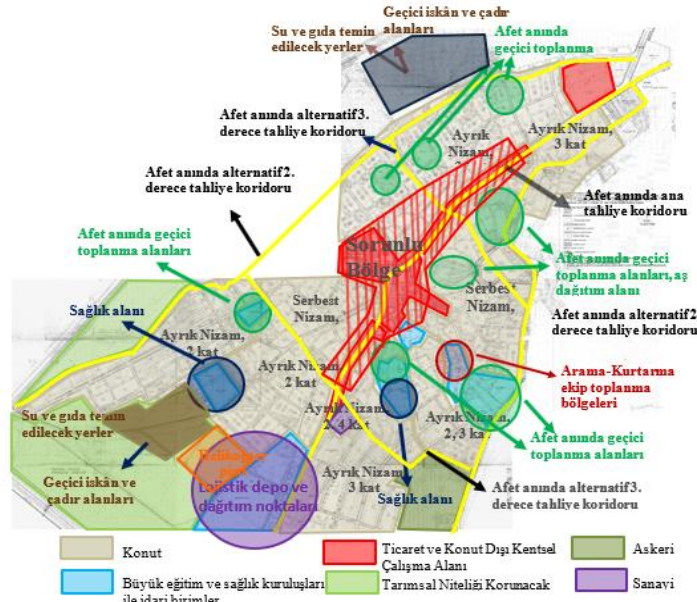
6.1. İpsala İlçesi Kent Merkezinin 1/5.000 ölçekli İmar Planı Kararlarının Depremsellik ve Afete Duyarlı Planlama Yaklaşımı Çerçevesinde Değerlendirilmesi (Evaluation of 1/5.000 scaled Master Plan Decisions of İpsala Urban Center within the Framework of Seismicity and Disaster Sensitive Planning Approach)

İpsala yerleşimi daha önceki bölümlerde de aktarıldığı üzere kırsal nitelik taşıyan bir yerleşmedir ve bu nedenle daha düşük yoğunlukla gelişmiş ve tarımsal niteliği ön planda olan bir ilçedir. Üst ölçekli plan kararı ile de bu özelliği korunmuş, kırsal merkez olma özelliğini devam ettirmesi yönünde karar alınmıştır (Şekil 14-15).



Şekil 14. İpsala İlçesinin Konumu, (Google Earth, 2019) (Location of Ipsala District)

İpsala ilçesi için değerlendirilecek olan nazım imar planı çalışması elde edilen veriler sonucunda kent merkezi ile sınırlandırılmıştır. Bunun nedeni ilçe bütününe ilişkin nazım imar planı çalışmasının olmaması ve nüfus yoğunluğunun kent merkezinde yer alması nedeni ile olası depremde en çok etkilenecek bölge olmasıdır.



Şekil 15. İpsala İlçesi Depreme Duyarlı Öneri Plan Şeması (Earthquake Sensitive Proposal Plan Scheme of Ipsala District)

İpsala kent merkezi için yapılan nazım imar planı incelendiğinde kent için verilmiş yapılaşma kararlarında bina yüksekliklerinin alan genelinde düşük tutulduğu, daha ziyade 1-2 katlı (az katlı) yapılardan oluştuğu tespit edilmiştir. En yüksek yapılaşma kararının 4 katlı olduğu, bunların da merkezde ve Kurtuluş caddesi üzerinde yer aldığı görülmektedir. Her ne kadar alan genelinde az katlı yerleşim dokusu önerisi geliştirilmiş olsa da bu durumun yerleşmenin kırsal alan özelliğini koruması nedeni ile olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte depremsellik açısından düşünüldüğünde de az katlı yerleşim dokusu önerisi ilçe merkezi açısından avantaj olmaktadır. Bunda tarım alanlarının önemli oranda yer alması ve yerleşmenin kısmen taşkın alan sınırları içinde kalması da önemli bir sebep olarak görülmektedir. Özellikle çeperde tarım alanlarına yakın yerler 2 kat olarak belirlenmiş merkeze yakın bölgelerde 3 kat yol boyu ticaret aksı üzerinde ise 4 kata kadar izin verilmiştir. Sadece az katlı olması nedeni ile değil aynı zamanda ayrık nizam yapılaşma koşullu olarak gelişmesinin öngörülmüş olması da bu süreçte önem kazanmaktadır. Bununla birlikte serbest nizam yapılaşma kararı kent içinde oldukça farklı yapılaşma düzeni getireceğinden ve yukarıda daha önce belirttiğimiz üzere depremsellik açısından farklılığın olası riski arttıracığından tercih edilmemesinin daha iyi olacağı görülmektedir.

Depremsellik açısından yapıların düşük katlı ve ayrık nizam olması olumlu olmakla birlikte özellikle merkezde bu yapılaşma kararının devam ettirilmesi ve 3 kat ile sınırlı kalmasının depremsellik açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte plan afete duyarlı planlama açısından değerlendirilirse; Planda eğitim alanları, park ve yeşil alanlar ile açık alanlar geçici toplanma alanları, depolama ve lojistik alan ile yeme içme ve dağıtım alanları olarak tercih edilirken sağlık alanları ve yakın çevresi sağlık ve müdahale merkezleri olarak belirlenmiştir. Alanın güneyi ana depolama ve çadır alanı ve helikopter pistinin bulunacağı merkez alan olarak belirlenmiştir. Ana tahliye koridoru üzerinde olması ve alternatif tahliye koridoruna yakın olması bu alanların seçilmesinde önemli bir etkidir.

İmar planı incelendiğinde (Şekil 15) merkez bölge -özellikle ticaret ve merkezi iş alanı olarak gelişen alan- afet anında problemin yüksek olacağı bölge olarak görülmektedir. Alan içinde müdahale alanı bulunmadığı gibi afet anında toplanılabilecek bir alan da bulunmamaktadır. Üstelik yapılaşma açısından en yoğun bölgedir. Kuzeyde alternatif lojistik, barınma ve depolama alanı ile sağlık alanlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Planın revize edilerek alanın bu açıdan yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.

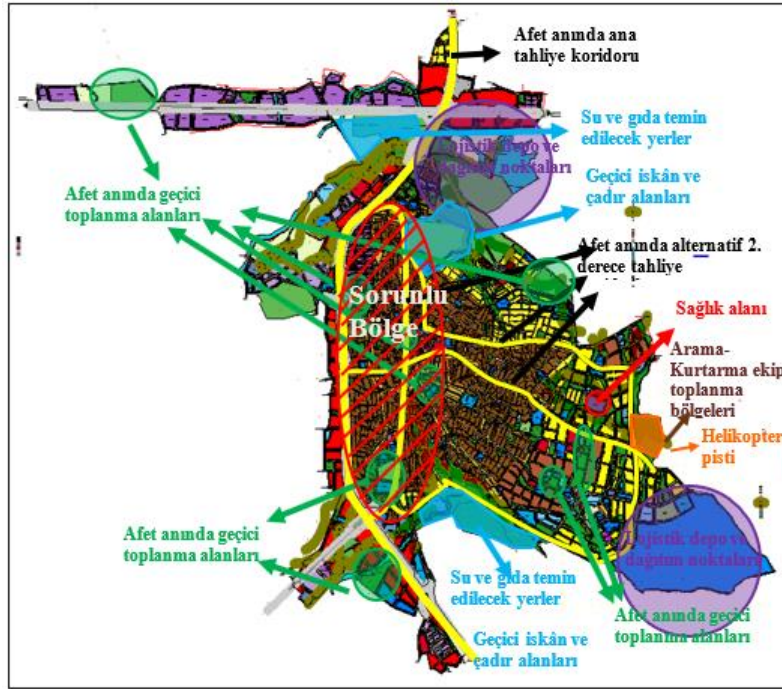
6.2. Keşan İlçesi Kent Merkezinin 1/5.000 ölçekli İmar Planı Kararlarının Depremsellik ve Afete Duyarlı Planlama Yaklaşımı Çerçevesinde Değerlendirilmesi (Evaluation of 1/5.000 scaled Master Plan Decisions of Keşan Urban Center within the Framework of Seismicity and Disaster Sensitive Planning Approach)

Keşan ilçesinin gelişimi İpsala'dan farklı ve daha yoğun bir yerleşme düzeyine sahiptir. Ana ulaşım aksı Çanakale-Edirne yolu olup ticaret alanlarının gelişimi bu yol üzerinde önerilmiştir. Sanayi alanlarının da Tekirdağ-İpsala Yolu üzerinde geliştirilmesi önerilmiştir. Kent doğu aksı boyunca tarım alanları ve orman alanına doğru gelişim göstermektedir. Planda da yeni gelişim alanları bu yönde önerilmiştir. Yoğun ticaret ve sanayi alanına sahip olan yerleşme hizmet merkezi olarak seçilmiştir. İpsala'ya göre daha az kırsal özellik taşımaktadır (Şekil 16-17).



Şekil 16. Keşan ilçesinin konumu, (Google Earth, 2019) (Location of Keşan District)

Keşan İmar Planı 2017 yılında Revizyonu yapılarak onaylanmıştır. Alan çalışması için İpsala'da olduğu üzere Keşan kent merkezi seçilmiştir (Şekil 17).

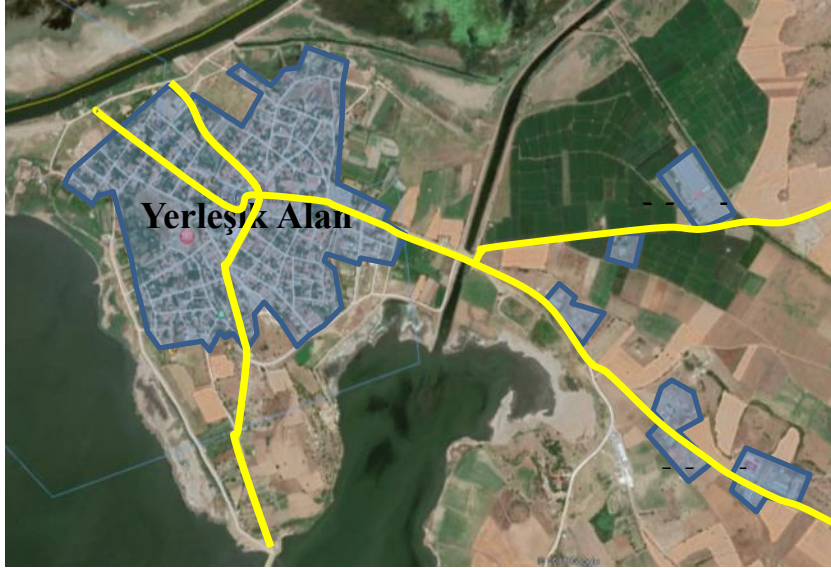


Şekil 17. Keşan İlçesi Depreme Duyarlı Öneri Plan Şeması (Earthquake Sensitive Proposal Plan Scheme of Keşan District)

Depremsellik açısından incelendiğinde, depremden en fazla etkileneceği düşünülen Keşan ilçesi aynı zamanda en fazla nüfusa sahip ilçedir. Konumu ve diğer eğilim özellikleri nedeni ile 100.000 ölçekli Çevre Düzeni Planı ile 2. Kademe merkez olarak belirlenen ilçeye İpsala ve Enez'e oranla daha fazla nüfus eklemesi (16.000kişi) getirilmektedir. Çeperinde yer alan tarımsal alanlar ve orman alanları kentin gelişimini sınırlandırırken merkez alanda öneri ile gelecek olan nüfusun bu sebeple yoğunluğunun arttırıldığı ve gelişiminde doğu aksı yönünde olduğu gözlenmektedir. KAFZ'a yakın konumlanmış ilçe merkezinde yoğunluk artışı kent geneli için olası risk durumunu arttırmaktadır. Bununla birlikte özellikle ulaşım sistemi incelendiğinde ana tahliye koridorunun kentin batısında yer alan Edirne - Çanakkale yolu olduğu görülmektedir. Fakat bu aks kentin dışında yer alması nedeni ile acil müdahale ve yardımda yeterli olamamaktadır. Ana tahliye koridoruna alternatif belirlenen 2. derece tahliye koridorları ise hem dar olması hem de yerleşim içerisinde sürekliliğinin bulunmaması nedeniyle afete duyarlı planlama açısından önemli bir eksikliklerdir. Kentin ulaşım sistemi acil müdahale ve yardımı zorlaştırmaktadır. Öncelikle planlama sürecinde ulaşımaya yönelik depremsellik açısından ciddi revizyonlar gerekmekte ve bu nedenle kentin ana ulaşım akslarının hem kuzey güney, hem de doğu batı aksı üzerinde yeniden güçlendirilmesi gerekmektedir. Plana ilişkin yapılaşma koşulları incelendiğinde alan genelinde ayırık nizam ve 2 ve 3 katlı yapılaşma kararlarının ağırlıklı olduğu görülmekle beraber özellikle merkez alanda yer yer 4 kat ve blok nizam yapılaşma koşullarının da olduğu izlenmektedir. Bununla birlikte yeni gelişme alanlarında özellikle doğu aksında çeperde yer alan ve konut gelişme alanlarında 7 kata kadar yapılaşma hakkı tanınırken Edirne - Çanakkale yolunun batısında kalan ve tarım alanlarına doğru önerilen kentsel çalışma alanlarında da 5 kata kadar yapılaşma hakkı tanınmaktadır. Ayırık nizam ve az katlı yapılaşma kararlarının planla devamlılığının sürdürülebilir olması olumlu bir durumken yeni gelişme alanlarında yoğunluk arttırıcı yapılaşma koşullarının getirilmiş olması risk arttırıcı bir özellik taşımaktadır. Alanda bulunan kamusal alanların toplanma, barınma ve müdahale alanı olarak kullanılması (eğitim, sağlık, resmi kurum, park, yeşil alan vb.) her ne kadar önerilse dahi deprem sonrası için kullanılacak bu alanların bazı bölgelerde son derece yetersiz olduğu görülmektedir. Özellikle alan geneli incelendiğinde nüfus artış önerisinin yüksek olması, buna karşılık yeterli müdahale alanı bulunmadığı gibi afet anında ve sonrasında toplanılabilecek yeterli alanın da bulunmaması ve revizyon yapılırken depremsellik göz önüne alınarak bu tarz alanlar için yeterli alan ayrılmamış olması ciddi bir handikap oluşturmaktadır. Afet anında ve sonrasında ihtiyaç duyulan alanlara yönelik öneriler Şekil 17'te gösterilmiştir. Plandan da görüldüğü üzere merkez bölge depremden en çok etkilenecek ve en sorunlu bölgedir. İhtiyaç duyulan alanların birçoğu çeper bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Plan önerisi ile gelecek nüfusta düşünüldüğünde plan revizyonu ihtiyacının olduğu görülmektedir.

6.3. Enez İlçesi Kent Merkezinin 1/5.000 ölçekli İmar Planı Kararlarının Depremsellik ve Afete Duyarlı Planlama Yaklaşımı Çerçevesinde Değerlendirilmesi (Evaluation of 1/5.000 scaled Master Plan Decisions of Enez Urban Center within the Framework of Seismicity and Disaster Sensitive Planning Approach)

Enez ilçesi Edirne ilinin en güneyinde yer almakta ve fay hattına en yakın ilçe olması nedeni ile deprem riski taşıyan en önemli ilçeler arasında yer almaktadır. İlçenin diğer bir özelliği ise kıyıda bulunması ve sit alanı içerisinde yer almasıdır. Bu nedenle yerleşme üst ölçekli planda turizm merkezi olarak belirlenmiştir. Kent batı da kıyı ile sınırlı olduğundan ve arkeolojik sit alanı içerisinde yer aldığından doğuya doğru gelişim önerilmiştir (Şekil 18-19).



Şekil 18. Enez İlçesinin Konumu, (Google Earth, 2019) (Location of Enez District)

Enez Kent Merkezi İmar Planı İncelendiğinde kentin Meriç nehri ve kurutma kanalı ve Dalyan gölü ile çevrili olduğu ve gelişiminin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle kent merkezinde yeni gelişme alanları kurutma kanalının doğusunda önerilmiş, kanal ve çevresi de önemli tarım arazileri ile çevrilmiştir. Bu nedenle imar planı eski kent merkezi ve yeni gelişme alanı olmak üzere iki parça halinde birbirinden kopuk olarak planlanmıştır (Şekil 19).



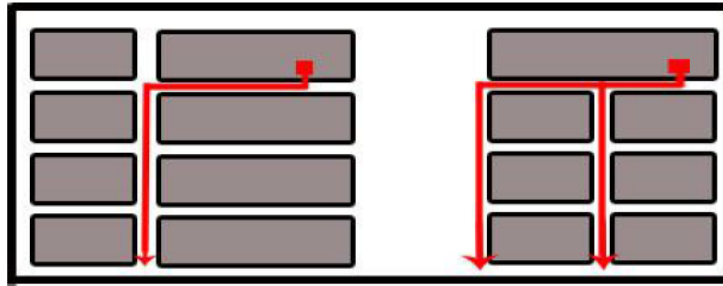
Şekil 19. Enez İlçesi Depreme Duyarlı Öneri Plan Şeması (Earthquake Sensitive Proposal Plan Scheme of Enez District)

Depremsellik açısından incelendiğinde deprem riski en yüksek ikinci ilçedir. Kıyıya yakın olması ve sit alanı içinde olması yapılaşma koşulları açısından daha az yoğunlukta ve ayrıklı nizamda bir yerleşim alanı önerisi getirmiştir. Bu bakımdan avantajlı konumdadır. Yeni gelişme alanları ise ağırlıklı 3 kat ve 4 kat olarak belirlenmiştir. Afet anında ve sonrasında duyulan alansal gereksinimleri karşılayacak yeterli alan bulunmaktadır. Bununla birlikte yeni gelişme alanında (doğu alanı) yoğunluk arttığından bu alan için fazla rezerv alanı ayrılması gerekmektedir.

Henüz yapılaşmamış olması avantajdır. Batı bölgesi yerleşik alan içinde ise merkez alanda her ne kadar sıkıntı olsa dahi yakınında yer alan kale alanı ve diğer kamusal alanlar avantaj sağlamaktadır. Alandaki en büyük problem ana tahliye koridorlarına alternatif olan ikinci kademe tahliye koridorlarının dar ve sürekli olmamasıdır, bu afet anında dezavantaja dönüşebilir. Bu nedenle ulaşım ile ilgili revizyon ihtiyacı doğmaktadır. Diğer öneriler Şekil 19’da detaylı olarak verilmiştir.

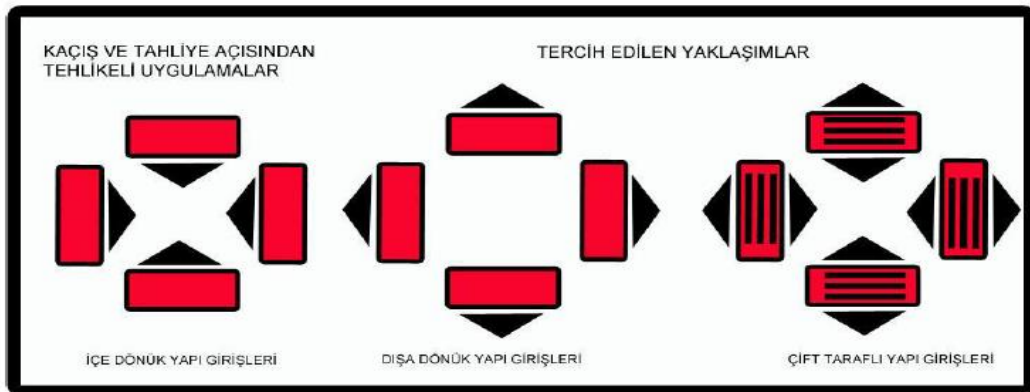
Bunların yanı sıra her üç ilçe içinde uygulama imar planı ölçeğinde dikkat edilmesi gereken başka unsurlarda bulunmaktadır. Bunlar;

- Zemin periyoduna uygun ada formlarının oluşturulması,
- Bina formlarında çeşitliliğinin sınırlandırılması,
- Zemin kat ve üst kat kullanımında çeşitliliğin minimuma indirilmesi ya da tasarlarken en baştan ona göre yapının planlanması,
- Katlar arası yükseklik farklılığının oluşturulmaması, strüktürel yapı özelliklerine dikkat edilmesi ve depreme dayanıklı tekniklerin kullanılması
- İmar adası uzunluklarında erişilebilirlik kriterlerine dikkat edilmesi, tercih edilen maksimum mesafenin 75 m olması (Şekil 20),



Şekil 20. Bloklar Arası Öneri Mesafeler (Yabar, 2013) (Suggested Distances Between Blocks)

- Yüksek riskli alanlarda ayırık yapı nizamının ve katların aynı hizada olmasının tercih edilmesi,
- Yapı cephelerinin ayırık düzende 30 metreyi, blok düzende 45 metreyi, bitişik düzende ise 75 metreyi geçmemesine dikkat edilmesi,
- Yapı girişlerinin dışa doğru ya da çift taraflı olması (Şekil 21),
- Bina çekme mesafelerinin mevzuata uygun ve deprem sırasında binaların birbirine etkisini minimuma indirecek oranda belirlenmesi,



Şekil 21. Öneri Yapı Girişleri (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007) (Suggestion Building Entries)

- Riskli alanlarda kat artışı ve asma kata izin verilmemesi,
- Yeşil alan devamlılığının sağlanması ve açık alanların artırılması,
- Kamusal alanların ve yapıların güçlendirilmesi,

Ulaşım sisteminin deprem anı ve sonrasında kullanılabilirliğini engellemeyecek şekilde genişliğinin ve erişilebilirliğinin sağlanması, alternatif ulaşım akslarının gerçekleştirilmesidir.

6. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Deprem riski taşıyan alanlarda kentlerin planlanmasında ve sürdürülebilirliğinde özellikle jeofizik (uygulamalı jeofizik ve sismolojik) - jeolojik veriler oldukça önemli yer tutmaktadır. Her ne kadar insan yaşamı için yer üstünde varolan arazi kullanım biçimine karar veriliyor olsa dahi temelde bu kararları bağlayıcı olan şey yer altında varolan unsurlardır. Bu nedenle gerçekleştirilecek mikrobölgeleme araştırmaları ile sağlanacak verilerin detaylı ve doğru analizi depreme dayanıklı ve sağlıklı kentlerin oluşumunda önemli rol oynayacaktır. Bu veriler doğrultusunda hazırlanan veya revize edilen planlar afet riskini azaltırken kullanıcıların da daha sağlıklı kent ortamında yaşama şansını arttıracaktır. Yukarıda hazırlanan çalışmada da özellikle deprem riski altında olan İpsala, Keşan ve Enez ilçe merkezlerinin depremselliği incelenmiş ve bu inceleme sonucunda her üç ilçe merkezi planlarının da depreme duyarlı planlama açısından yeniden revize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

İpsala ilçesinin kırsal bir nitelik taşıması ve buna paralel olarak ilçe merkezinin de düşük yoğunlukla gelişmesi bir avantaj olarak karşımıza çıkarken, birçok kentte görüldüğü üzere merkezdeki yoğunluğun artması, yapı yoğunluğu ve yüksekliğinde artışa neden olmakta bu da olası bir deprem anında en çok etkileenecek alan haline gelmesi ile sonuçlanabilme ihtimalini arttırmaktadır. Yoğunluğun artması bu bölgede ihtiyaç duyulacak açık alan ve toplanma alanlarının oluşturulmasında sorun teşkil etmektedir. Plan revizyonu sürecinde merkez bölgenin bu bağlamda ele alınarak çeper alanlarında olduğu gibi düşük yoğunluklu ve açık alanların daha fazla olduğu bir planlama anlayışı ile ele alınması gerekmektedir.

Keşan ilçesi ise daha farklı bir yapıya sahiptir. Çanakale-Edirne ana ulaşım aksı üzerinde konumlanması ve hizmet bölgesi olarak seçilmesi kentin daha yoğun gelişmesine neden olmaktadır. İlçe merkezinde yoğun ticaret ve sanayi alanının da olması kentin gelişim sürecini hızlandırmaktadır. Üstelik en fazla deprem riski taşıyan bölge konumundadır. Kent merkezi, ne ulaşım organizasyonu açısından ne de yoğunluk açısından depreme duyarlı planlanmamıştır. Yoğun bir yapılaşmanın olduğu özellikle batı ve merkez bölgenin bu açıdan en riskli bölge olması ve afet anında müdahaleyi kolaylaştıracak alanların ve açık alanların olmayışı planlama sürecine yönelik ciddi bir revizyon ihtiyacı doğurmaktadır.

Enez ilçesi ise faya en yakın yerleşme birimidir. Kent kıyıda yer alması nedeni ile bir turizm merkezi olarak belirlenmiştir. Deprem riski en yüksek ikinci bölgedir. İlçede arkeolojik sit alanının olması bir avantaj sağlamıştır. Kent merkezi incelendiğinde, bu alanlarda yapılaşmanın olmaması ve düşük yoğunlukla planlanmış olması önemlidir. Fakat bu devamlılık yeni gelişme alanları için öngörülemezdir. Bu alanlarda yoğunluk ve yapı yüksekliği daha fazla olarak planlanmıştır. Fakat henüz yeni gelişiyor olması bir avantaj olmakta ihtiyaç duyulan alanların baştan ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte ulaşım ağı açısından incelendiğinde dar ve sürekliliği olmayan yolların olması afet anında tahliye ve yardım hususunda ciddi bir sorun yaratabileceğinden özellikle ulaşım sisteminde revizyon yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bunların yanı sıra her üç ilçe açısından da ada içi düzenlemeleri ve giriş çıkışları, cephe düzenlemeleri, yeşil alan düzenlemeleri ve sürekliliği, yapı yükseklikleri ve yoğunlukları vb. düzenlemelerinde revizyon plan yapım sürecinde değerlendirilerek ele alınması gerekliliği olan ve daha detaylı olarak incelenmesi gereken hususlardır. Sürecin kısıtlı olması ve veri yetersizliği bu tarz derinlemesine araştırma imkanı ve çözüm önerisi ortaya konmasına imkan vermemiştir. Yeniden yapılacak depreme duyarlı planlama anlayışı ve ayrıntılı mikrobölgeleme araştırmaları ve analiz yöntemleri sayesinde kentlerin nasıl ve ne yönde gelişmesi gerekliliği önerilen diğer hususlar çerçevesinde yeniden ortaya konabilecektir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Teşekkür (Acknowledgement)

DSİ 11. Bölge Müdürlüğünden Meteoroloji Mühendisi Sadettin Malkaralı ve Jeoloji Mühendisi İ.ERCÜMENT İMNET'e ve makalenin incelenmesini gerçekleştiren hakemlere katkılarından ötürü teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

ADRC, (2011). Shanghai Forum on Disaster Prevention, Post-Disaster Reconstruction and International Cooperation: Learning from both Japanese and Chinese Experiences. Erişim Adresi: https://www.adrc.asia/adrcreport_e/archives/2011/10/27140000.html, Erişim Tarihi Ocak, 2021.

- Aksoy, M. E., Meghraoui, M., Vallée, M. and Çakır, Z., (2010). Rupture Characteristics of The A.D. 1912 Mürefte (Ganos) Earthquake Segment of The North Anatolian Fault (Western Turkey). *Geology*, 38 (11), 991-994. <https://doi.org/10.1130/G31447.1>
- Altınok, Y., Alpar, B. and Yalıtırak, C., (2003). Sarköy-Mürefte 1912 Earthquake's Tsunami, Extension of The Associated Faulting in The Marmara Sea, Turkey. *Journal of Seismology* 7, 329-346. DOI: 10.1023/A:1024581022222.
- Atabey, E., (2000). Deprem, MTA Müdürlüğü Yayınları, Yayın no: Eğitim serisi 34, Ankara.
- Bahadır, H. ve Uçku, R., (2018). Uluslararası Acil Durum Veri Tabanına Göre Türkiye Cumhuriyeti Tarihindeki Afetler. *Doğal Afetler Çevre Dergisi*, 4(1), 28-33, DOI: 10.21324/dacd.348117.
- Balamir, M., Ansal, A., Sucuoğlu, H., Gülkan, Karancı, N., Ayata, A., Kasapoğlu, A., Koçyiğit, A., Voulgaris, N., Petropoulos, N., Dandoulaki, M., Carydis, P., Bergianaki-Dermitzaki, J.D., Deladetsimas, P., Zafeiropoulos G., Raftopoulos, D., (2008). Kentlerde Kapsamlı Deprem Sakınımı İçin Karşılaştırmalı Yöntem Geliştirme İstanbul ve Atina Örnekleri. GSRT ve TÜBİTAK tarafından desteklenen proje sonuç raporu. Proje No: İÇTAG - I582/GSRT (102I005), Ankara, Erişim Adresi: <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/49689/T1RZNE56Yz0.pdf>.
- Balamir, M., (2008). Küresel Gelişmeler, Neoliberal Politikalar, Risk Toplumu ve Planlama Alanı. Erişim Adresi: <http://mimdap.org/2008/02/kuresel-gelismeler-neoliberal-politikalar-risk-toplumu-ve-planlama-alany/3/>, Erişim Tarihi: Şubat 2021
- Balyemez, S., (2003). Kentsel Planlama ve Tasarım Değişkenlerinin Deprem Olgusu Açısından İrdelenmesi ve Kentsel Deprem Davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (2007). Afet Riski Olan Alanlarda İmar Planlama ve Kentsel Tasarım Standartları.
- Caltılı, E. ve Ger, M., (2017). Edirne İlindeki Zeminlerin Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) Kullanılarak Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 33, sf. 27-39. <https://doi.org/10.17932/IAU.IAUD.13091352.2017.9/33.27-39>.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Yayınevi, İstanbul. Çağatay, N., Sümengen, M., Görür, N., Akkök, R., Tüysüz, O., Barka, A., Yiğitbaş, E., Sakıncı, M., Yalıtırak, C. ve Sarı, E., (1996). Saros Körfezinin Oluşumunun İncelenmesi. Ulusal Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği Programı, Koord. N. Görür, Workshop - 1, 8-9 Şubat 1996.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (a), (2010). Trakya Alt Bölgesi Ergene Havzası 1/100.000 Ölçekli Revizyon Çevre Düzeni Planı, Erişim Adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/mpgm/editedosya/file/CDP_100000/te/G16.jpg, Erişim Tarihi: Mayıs 2021.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (b), (2010), Trakya Alt Bölgesi Ergene Havzası 1/100.000 Ölçekli Revizyon Çevre Düzeni Planı, Erişim Adresi: [https://webdosya.csb.gov.tr/db/mpgm/editedosya/file/CDP_100000/te/G17\(1\).jpg](https://webdosya.csb.gov.tr/db/mpgm/editedosya/file/CDP_100000/te/G17(1).jpg), Erişim Tarihi: Mayıs 2021.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (c), (2010), Trakya Alt Bölgesi Ergene Havzası. Erişim Adresi: <https://mpgm.csb.gov.tr/trakya-alt-bolgesi-ergene-havzasi-i-82194>, Erişim Tarihi: Mayıs 2021.
- Çınar Yıldız, S., Özden, S., Tutkun, S.Z., Ateş, Ö., Altuncu Poyraz, S., Kapan Yeşilyurt, S., (2013). Ganos Fayı Boyunca Geç Senozoyik Yaşlı Gerilme Durumları, KB Türkiye. *Türkiye, Jeoloji Bülteni*, 56, 1-21. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/285004>.
- Demir, K., Temelli, U.E., (t.y.), Küresel Afet Yönetimi Örgütlenmesi ve Uygulamaları Acil Durum ve Afet Yönetimi Uzaktan Eğitim Önlisans Programı İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi, Erişim Adresi: http://auzeffitap.istanbul.edu.tr/kitap/acildurumveafetyonetimi_ue/kayovu.pdf, Erişim tarihi: Mayıs 2021.
- DSİ Rapor, 2016. Meriç Ergene ve Kuzey Marmara (Trakya Kesimi) Havzaları Master Planı Hidrojeoloji Raporu (Meriç Alt Havzası), T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Enez İlçesi'nin Konumu, (Kasım 2019). Google Earth.
- Enez'den Genel Görünüm, (a), (t.y.). Erişim Adresi: <https://www.edirneolay.com/images/haberler/enez-in-yuksekkul-talebi.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Enez'den Genel Görünüm, (b), (t.y.). Erişim Adresi: https://scontent.fad6-2.fna.fbcdn.net/v/t31.18172-8/13064471_10154131827266649_2800254598055701379_o.jpg?_nc_cat=103&ccb=13&_nc_sid=9267fe&_nc_ohc=n85w4ote2osAX8xXOUD&_nc_ht=scontent.fad6-2.fna&oh=e2b5d7c5d2ffa014a68efc70f6b57b4&oe=60CB742F, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Enez'den Genel Görünüm, (c), (t.y.). Erişim Adresi: <https://lh3.googleusercontent.com/proxy/93s3niN8zh8AjthS9kvqZu8ZT5MBaqSsMeu3cYHFmO1GiFY5EHY0AZqE22nYhulGMlf4ow3Q7TlJtnlKrt0catKaH514PaWZaHLBNQxlmWap-ezVBpDn4whz>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Enez'den Genel Görünüm, (d), (t.y.). Erişim Adresi: <https://www.trakyanet.com/images/bagallery/gallery-26/thumbnail/category-1/enez-106.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Görür, N. and Elbek, Ş. (2013). Tectonic Events Responsible for Shaping The Sea of Marmara and Its Surrounding Region. *Geodinamica Acta*, 26,1-2, 1-11. <https://doi.org/10.1080/09853111.2013.859346>.
- Gürboğa, Ş., Yavuzoğlu, A. Z., Güney, R., Karcı, F. B., Yavuzoğlu, A., Türkmen, Ö., Kartal, P. Ç., Aydemir, B. S., Evren, M., Cenk, M., Şimşek, B., Özbek, E., Yurtsever, T. Ş., Yiğit Fethi, F., Aylan, E. and Kırat, U. Z. (2020). Tectonic Meaning of The Deformation in Shallow Marine Region between Gaziköy-Mürefte (Sea of Marmara) by Using Seismic Reflection Data, NW, *Bull. Min. Res. Exp.*, 163, 13-26. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.784476>.
- ISDR (a), (t.y.). What is The International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)?, Erişim Adresi: https://www.adrc.asia/publications/LWR/LWR_abridged/preface2.pdf, Erişim tarihi: 04.02.2021
- ISDR (b), (t.y.). International Strategy for Disaster Reduction A SAFER WORLD in the 21st CENTURY: Disaster and Risk Reduction, Erişim Adresi: https://www.eird.org/eng/revista/No15_99/pagina2.htm, Erişim tarihi: Ocak 2021.
- ISDR (2004), Living with Risk A Global Review of Disaster Reduction Initiatives 2004 Version - Volume I, United Nations, New York and Geneva, Erişim Adresi: https://www.unisdr.org/files/657_lwr1.pdf, Erişim tarihi: Şubat 2021.
- ISDR International Strategy for Disaster Reduction, (2005). Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters., Extract from The Final Report of the World Conference on Disaster Reduction.

- (A/CONF.206/6); United Nations, Erişim Adresi: https://www.unisdr.org/files/1037_hyogoframeworkforactionenglish.pdf, Erişim tarihi: Şubat 2021.
- İpsala İlçesi'nin Konumu, (Kasım 2019). Google Earth.
- İpsala'dan Genel Görünüm (a), (t.y.). Erişim Adresi: <https://ipsala.bel.tr/FileUpload/AnasayfaGorselImg/963/web031.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- İpsala'dan Genel Görünüm, (b), (t.y.). Erişim Adresi: <https://www.gezi-yorum.net/wp-content/uploads/2020/02/ipsala-genel0.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- İpsala'dan Genel Görünüm, (c), (t.y.). Erişim Adresi: <http://www.ipsalatrakyagazetesi.com/resimler/haber/7-2-ba0zgVO.jpg>, 2020, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- İpsala'dan Genel Görünüm, (d), (t.y.). Erişim Adresi: <http://wikimapia.org/5739838/tr/%C4%B0psala#/photo/1620768>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Kadioğlu, M. (2008). Modern, Bütünleşik Afet Yönetiminin Temel İlkeleri. Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri içerisinde. Ed: Kadioğlu, M, Özdamar, E., JICA Türkiye Ofisi, 2, 1-34.
- Kalafat, D., T. Ö. Tahaoğlu, A. M. Işıkara (2001). 9 Ağustos 1912 Saros-Marmara Depremi, Türkiye 14. Jeofizik Kurultayı ve Sergisi, Genişletilmiş Sunu Özetleri Kitabı (Extended Abstracts Book) s. 103-106, MTA Kültür Merkezi, 8-11 Ekim 2001, Ankara (in Turkish).
- Kalafat, D. (2011). Marmara Bölgesi'nin Depremselliği ve Deprem Ağının Önemi. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011 – ODTÜ, Ankara.
- Karaş, M., Tank, S. B., ve Özaydın, S. (2017). Electrical Conductivity of A Locked Fault: Investigation of The Ganos Segment of The North Anatolian Fault Using Three-Dimensional Magnetotellurics. Planets and Space, 69,107. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0695-2>.
- Keşan İlçesi'nin Konumu, (Kasım 2019). Google Earth.
- Keşan'dan Genel Görünüm, (a), (t.y.). Erişim Adresi: <https://mapio.net/images-p/16539049.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Keşan'dan Genel Görünüm, (b), (t.y.). Erişim Adresi: <http://www.hakanesme.com/wp-content/uploads/2017/01/kesangok2-e1485111842192.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Keşan'dan Genel Görünüm, (c), (t.y.). Erişim Adresi: <https://i2.cnnturk.com/i/cnnturk/75/800x0/5e97185117aca917382f70ad.jpg>, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Keşan'dan Genel Görünüm, (d), (2018). Erişim Adresi: https://foto.haberler.com/haber/2018/11/01/havasi-en-kirli-ilce-kesan-da-hava-kalitesi-11393554_o.jpg, Erişim Tarihi: Mayıs, 2021.
- Konca, A. O., Cetin, S., Karabulut, H., Reilinger, R., Dogan, U., Ergintav, S., Cakir, Z. and Tari, E. (2018). The 2014, MW6.9 North Aegean Earthquake: Seismic and Geodetic Evidence for Coseismic Slip on Persistent Asperities. Geophys. J. Int., 213, 1113–1120. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy049>.
- Kurt, H., Demirbağ, E. and Kuşçu, İ. (2000). Active Submarine Tectonism and Formation of The Gulf of Saros, Northeast Aegean Sea, Inferred From Multi-Channel Seismic Reflection Data. Marine Geology, 165, 13–26. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00005-0).
- Lagorio, H. J., 1990. Earthquakes An Architect's Guide to Nonstructural Seismic Hazards, Wiley Interscience Publications, New York
- OECD, (2004). Large-scale Disasters, Lessons Learned, Erişim Adresi: <https://www.oecd.org/futures/globalprospects/40867519.pdf>, OECD Publications Service, France, Erişim tarihi, 04.02.2021.
- Özmen, B., Özden, A.T. (2013). Türkiye'nin Afet Yönetim Sistemine İlişkin Eleştirel Bir Değerlendirme. İ.Ü. Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi, 49, 1-28. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/5712>.
- Öztürk, S. (2017). Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Civarındaki Güncel Deprem Aktivitesinin Bölgesel ve Zamana Bağlı Analizleri, Yerbilimleri, 38 (2), 193-228. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/539295>
- PreventionWeb The Knowledge Platform for Disaster Risk Reduction, (1994). Yokohama Strategy and Plan of Action for a Safer World: Guidelines for Natural Disaster Prevention, Preparedness and Mitigation, Erişim Adresi: <https://www.preventionweb.net/publications/view/8241>, Erişim tarihi: 02 04.2021.
- Rockwell, T., Barka, A., Dawson, T., Akyuz, S. and Thorup, K. (2001). Paleoseismology of the Gazikoy-Saros Segment of The North Anatolia Fault, Northwestern Turkey: Comparison of The Historical and Paleoseismic Records, Implications of Regional Seismic Hazard, and Models of Earthquake Recurrence. Journal of Seismology 5, 433–448. <https://doi.org/10.1023/A:1011435927983>.
- Saner, S. (1985). Saros Körfezi Dolayının Çökme İstifleri ve Tektonik Yerleşimi, Kuzeydoğu Ege Denizi, Türkiye, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 28, 1 – 10. Erişim Adresi: https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/96472c9542ad4d4_ek.pdf.
- Tary, J. B., G'eli, L., Lomax, A., Batsi, E., Riboulot, V. and Henry, P. (2019). Improved Detection and Coulomb Stress Computations for Gas-related, Shallow Seismicity, in The Western Sea of Marmara. Earth and Planetary Science Letters, 513, 113 – 123. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.02.021>.
- Taş, Ö. K. (2002). Kırklareli-Vize Çizgiselliğinin ve Sergen Fayının Karakteri, İTÜ, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, İstanbul.
- Taş, Ş., Erdal, M. (2015). Afet Yönetiminde Sürdürülebilirlik, 2. International Sustainable Building Symposium, Gazi Üniversitesi, ISBS, Ankara.
- Tezer, A. ve Türkoğlu, H. (2008). Zarar Azaltma ve Şehir Planlama. Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri içinde. Ed:Kadioğlu, M, Özdamar, E., JICA Türkiye Ofisi, Yayın No:2, 59-71
- Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri, Ulusal Coğrafi Bilgi Platformu, (2020). Erişim Adresi: <https://www.atlas.gov.tr/>, <https://tucbs.atlas.gov.tr/starter.aspx#dashboard>, Erişim Tarihi, Kasım 2020.
- Uchida, N., Kalafat, D., Pinar, A. and Yamamoto, Y., (2019). Repeating Earthquakes and Interplate Coupling Along The Western Part of The North Anatolian Fault. Tectonophysics, 769, 228185. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228185>.
- United Nations Digital Library, (1993). Report of The United Nations Conference on Environment and Development Rio de Janeiro, 3-14 June 1992, Volume I Resolutions Adopted by the Conference, United Nations. New York, A/CONF.151/26/Rev.I

- (Vol. I) United Nations publication Sales No. E.93.1.8, ISBN: 92-1-100498-5. Erişim Adresi: <https://digitallibrary.un.org/record/168679?ln=en>.
- UNDP, (2004). A Global Report Reducing Disaster Risk A Challenge for Development, United Nations Development Programme Bureau for Crisis Prevention and Recovery, USA, New York:Printed by John S. Swift Co., ISBN 92-1-126160-0 Erişim Adresi: <https://studylib.net/doc/13645850/reducing-disaster-risk-a-challenge-for-development-united...>
- UNISDR, (2015). Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi (2015-2030), Erişim Adresi: http://uclg-mewa.org/uploads/file/748e86d91ae4409e9188794ddb6c004d/Sendai_TR.pdf, Erişim tarihi: Ocak 2021.
- Uyanık, O. (2015). Deprem Ağır Hasar Alanlarının Önceden Belirlenmesi ve Şehir Planlaması için Makro ve Mikro Bölgelelendirmelerin Önemi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19 (2), 24-38. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/194047>
- Wikipedia, (2021). Afet Riski Azaltma, Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Afet_risk_azaltma. Erişim tarihi: 10.01.2021
- Yabar, F. (2013). Afet Riskini Azaltan Planlama Süreci ve Zarar Azaltan Planlama İlkeleri-Fethiye Örneği; Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Pln 4112 Şehir Planlama Projesi VI Bitirme Ödevi
- Yalçın, C., ve Sabah, L. (2017). Açık Kaynak Kodlu CBS ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Yöntemi Kullanılarak Edirne Sanayi İşletmelerinin Deprem Tehlike Analizi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5, 524-537. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/329692>.
- Yaltrak, C., Alpar, B. and Yüce, H. (1998). Tectonic Elements Controlling The Evolution of The Gulf of Saros (northeastern Aegean Sea, Turkey). Tectonophysics, 300, 227-248. DOI: 10.1016/S0040-1951(98)00242-X.
- Yaltrak, C. (2002). Tectonic Evolution of the Marmara Sea and Its Surroundings. Marine Geology, 190, 493-529. DOI: 10.1016/S0025-3227(02)00360-2.



ANTALYA BÖLGESİNE YAĞAN SIRALI YAĞMUR ÖRNEKLERİNİN KİMYASAL KOMPOZİSYONLARININ VE MORFOLOJİLERİNİN BELİRLENMESİ

Murat KILIÇ^{1*}, Muhammet Yunus PAMUKOĞLU²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Su Bilimleri Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Anyon -Katyon,
Majör ve Eser Element,
HYSPLIT Modelleme,
Partikül Boyut Dağılımı,
Sıralı Yağmur.*

Öz

Bu çalışmada, Antalya ili Akdeniz Üniversitesi Kampüs alanında 2020 yılında toplanan fraksiyonel numunelerdeki suda çözünmeyen partiküllerin morfolojik yapılarının, boyut dağılımlarının ve kimyasal bileşimlerinin karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca her bir yağmur olayının fraksiyonel (sıralı) örneklerinde majör iyonlar ve bu iyonların fraksiyonel dağılımları, nötralizasyon faktörleri belirlenmiş, bulutla taşınan (rainout) ve bulut altı yıkama (washout) mekanizmaları ile hangi oranlarda alıcı ortama geldikleri hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan üç yağmur olayından birisi olan D-serisi, 07.12.2020 tarihinde örneklenmiş ve bu yağmur olayından 4 adet fraksiyonel örnek toplanmıştır. 10.12.2020 tarihli E-serisine karşılık gelen yağmur olayında ise 8 adet ve 12.12.2020 tarihli F-serisi yağmur olayında da 10 adet fraksiyonel yağmur suyu örnekleri toplanmıştır. Elde edilen sonuçlar çeşitli istatistiksel programlar ile değerlendirilerek, çıkan sonuçların veri kaliteleri ve kaynak belirleme çalışmaları yapılmıştır. Örneklerde ortalama pH değerleri 6.06-7.13 aralığında gözlemlenmiş ve herhangi bir şekilde asit yağmuru olasılığına rastlanılmamıştır. Yağmur örneklerinde partikül boyut analiz sonuçlarında D-serisi örneklerde en yüksek ölçülen değer 33.339 µm, E-serisi örneklerde 53.714 µm olarak ölçülmüştür ve F serisi örneklerde ölçüm yapılamamıştır. Örneklenen yağmur olaylarının taşınım bölgelerinin belirlenebilmesi için geri yörünge hesaplamaları yapılmış, kaynak bölgeleri, kaynak türleri ve kirlenici içerikleri tartışılmıştır.

DETERMINATION OF CHEMICAL COMPOSITIONS AND MORPHOLOGIES OF SEQUENTIAL RAIN SAMPLES IN ANTALYA REGION

Keywords

*Anion-Cation,
Major and Trace Element,
HYSPLIT Modelling,
Particle Size Distribution,
Sequential Rain.*

Abstract

In this study, it was aimed to characterize the morphological structures, size distributions and chemical compositions of the water-insoluble particles in the fractional samples by collecting in the year of 2020 in the Akdeniz University Campus area in Antalya province. In addition, the concentrations of major ions, their fractional distributions and, neutralization factors were determined in the fractional (sequential) samples of each rain event. The effectiveness of in-cloud scavenging (rainout) and the below-cloud scavenging (washout) mechanisms were calculated. D-series, one of the three rain events used in this study, was sampled on July 12, 2020 and 4 fractional samples were collected from this rain event. 8 fractional rainwater samples were collected in the rain event corresponding to the E-series dated on October 12,2020 and 10 in the F-series rain event dated on December 12, 2020. The results obtained were evaluated with various statistical programs, and the data quality of the results and source determination studies were carried out. Average pH values in the sequential rain samples were observed in the range of 6.06-7.13 and an acid rain event was not encountered. In the particle size analysis results of rain samples, the highest value measured in D-series samples was 33,339 µm, and 53.714 µm in E-series samples. Particle size distribution in the F-series samples could not be measured. In order to determine the transport

*İlgili yazar / Corresponding author: muratkilic@isparta.edu.tr, +90-246-211-1853

regions of the sampled rain events, backward trajectories were calculated, source regions, source types and pollutant compositions were discussed.

Alıntı / Cite

Kılıç, M., Pamukoğlu, M.Y., (2022). Antalya Bölgesine Yağan Sıralı Yağmur Örneklerinin Kimyasal Kompozisyonlarının ve Morfolojilerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 680-697.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Kılıç, 0000-0003-1174-0197
M.Y. Pamukoğlu, 0000-0003-3337-0860

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 29.12.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 23.02.2022 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 23.02.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Hava kirliliği önemli bir çevresel risk faktörüdür. Düşük, orta ve yüksek gelirli ülkelerdeki herkesi etkilemekte, ülkelerin giderek daha fazla dikkatini çekmekte, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaya ve bunlarla mücadele etmeye çalışılmaktadır. Küresel Hava Durumu raporuna (2019) göre hava kirliliği, yetersiz beslenme, alkol kullanımı ve fiziksel hareketsizlikten daha fazla ölüme neden olarak, dünya çapında ölüm oranı için beşinci önde gelen risk faktörüdür ve ayrıca her yıl daha fazla insan havanın neden olduğu bir hastalıktan ölmektedir. Yağmur suyunun kimyasal bileşiminin değerlendirilmesi, hava kalitesinin bir göstergesi olan farklı atmosferik kirlenme kaynaklarının göreceli katkısını anlamaya yardımcı olur (Bodor vd., 2020; Boga vd., 2019; Keresztesi vd., 2019b). Yağmur suyu kimyası, son otuz yılda yoğun araştırmaların konusu olmuştur, bu nedenle yağmur ve kar dâhil olmak üzere atmosferik yağış, çeşitli kimyasalların taşınması, atmosferik aerosollerin ve gaz fazı kirlenmelerin havadan giderim sürecinde en etkili yoldur. Gaz fazı kirlenmelerin atmosfer kimyasına göreceli katkısını anlamaya yardımcı olmaktadır (Keresztesi vd., 2018, 2019a; Niu vd., 2018, 2020; Szep vd., 2018, 2019). Özellikle yağmur suları, çözünebilir maddelerin temizlenmesinde büyük bir rol oynamaktadır, (Wang ve Han, 2011).

Atmosferde bulunduğu düşünülen kirlenmeler belli oranda yağmur suyu ile çözülebilir (Gromping vd., 1997). Toplam kirlenme miktarının %90'ından fazlası atmosferde yağmur suyuyla çözülebile de, yağmur suyunun kendisi, amonyum, nitritler, nitratlar, sülfatlar ve klorürler gibi diğer katyonlar ve anyonlar arasında yüksek konsantrasyonlarda metal ve metaloid taşıyabilirler (Cerqueira vd., 2011,2012; Arenas-Lago vd., 2013; Hower vd., 2013; Kronbauer vd., 2013; Dias vd., 2014; Garcia vd., 2014; Martinello vd., 2014). Ayrıca yağmur suyu bileşimi ile ilgili temel çevre sorunu yağmur sularının asidik karakterde olmasıdır (H. Morillas vd., 2016). Asit yağmuru genellikle antropojenik kaynaklardan gelen asit aerosollerinin esas olarak SO_x (kükürt oksitler) ve NO_x (azot oksitler) gazlarının çözünmesi nedeniyle oluşmaktadır (RöbertSzép vd., 2020). Bu asit yağmurları, bitki örtüsü ve sulcul ortamlar üzerindeki önemli etkisinden dolayı en büyük küresel çevre sorunlarından biri olduğu varsayılır. Asit yağmurlarının, yapılar üzerindeki aşındırma etkileri nedeni ile yapı malzemelerinin koruma durumunu olumsuz yönde etkilemektedir (Bravo vd., 2006). Hızlı nüfus artışı yaşanan kentler ve kırsal alanlarda artan hava kirliliğinin, yağışlarla alıcı ortamlara çökmesi hava, su ve toprak kalitesinde olumsuzluklara neden olmakla birlikte insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkilere neden olmaktadır. Yağmur suyu kimyası, yağmurun oluşum mekanizması, taşınması ve bulut altında bulunan kirlenmeleri yıkaması süreçleri ve bulut dinamiği gibi mikrofiziksel atmosferik reaksiyonların karmaşık bir etkileşimidir (Al-Khasmann, 2009).

Yağmur suyu içerisinde bulunan kirlenme konsantrasyonları yüksek seviyelerde (kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum iyonları, klorür, sülfat ve nitrat gibi), birçoğunun da (özellikle eser elementler) çok düşük konsantrasyon seviyelerinde olması hassas analitik cihazlar gerektirmektedir. Bu nedenle farklı çalışma grupları yağmur suyunu iyon kromatografisi ve endüktif olarak eşleştirilmiş plazma kütle spektrometrisi kullanılarak analiz etmişlerdir (Ostapczuk vd., 2002; Zhang vd., 2011; Alahmr vd., 2012; Norela vd., 2013). Yaş çökme örneklerindeki asitlik ve iyon konsantrasyonlarının, hidrolojik sistemlerin fiziksel katkısına, bulut oluşumuna ve ayrıca yıkama işlemi sırasındaki kimyasal dönüşümlere bağlı olduğu bilinmektedir. Literatür araştırmalarından görüldüğü üzere yaklaşık son 30 yıldır yağmur sularının kimyası, dünya çapında yağıştaki kirlenmelerin kimyasal bileşimi, atmosferik temizleme süreçleri, kaynakları ve uzun ve kısa vadeli eğilimlerinin araştırıldığı yoğun çalışmalar bulunmaktadır (White vd., 2013; Walna, 2015; Budhavant vd., 2016). Yağmur sularının içerdikleri kirlenmeler nedeni ile alıcı ortamlarda ne denli çevresel ve ekolojik sorunlara sebep olduğunun araştırılması önemli bir konudur.

Yağmur suyu, atmosferik aerosollerin ve kirlenme gazların uzaklaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yağmur olayları önemli iki mekanizma ile bu kirlenmeleri atmosferden uzaklaştırmaktadır. Bunlardan birincisi rainout (damlacık içerisinde var olan kirlenme: bulut oluşumu sırasında ve damlacığın uzun mesafelere taşınımı sırasında içerisinde yeni eklenen kirlenmeler) mekanizması, ikincisi ise washout (bulut altı yıkama) mekanizmasıdır. Dolayısı ile alıcı ortamda toplanan yağmur örnekleri hem bulut içerisindeki kirlenmeleri ve hem

de bulut altında yağmur damlacıklarının yıkayarak çökeltmelerine neden olduğu kirleticiler barındırabilir (Seinfeld ve Pandis, 2016; Keresztesi vd., 2017). Yağmur olayının ilk fraksiyonlarında washout mekanizması, rainout mekanizmasına göre oldukça fazla etkin olmakta ve bu yüzden de ilk fraksiyonlarda kirletici konsantrasyonları çok daha yüksek seviyelerde iken, artan fraksiyon sayısı ile kirletici konsantrasyonları da ciddi düzeylerde düşmektedir. Tam bu noktada artık rainout mekanizması daha etkin olmaktadır ve son fraksiyonel örneklerde ölçülen kirleticiler ağırlıklı olarak rainout ve lokal (yerel) arkaplan (background) kaynaklıdır. Lokal, antropojenik kökenli kirleticiler esas olarak yağışın ilk fraksiyonları ile (washout) uzaklaştırılır (Kajino ve Aikawa, 2015). Bu nedenle yağmur suyunun kimyasal bileşimi yerel kaynaklar hakkında bilgi sağlayabilir, ek olarak, yağmur olayları alıcı ortama çökmeden önce uzun mesafeli taşınımlarla geldiklerinden uzak mesafelerdeki kirletici kaynak tür ve yerleri hakkında da önemli bilgiler (Sahra toz taşınımları, fosil yakıtlar ve biyokütle yanma olayları gibi) sağlayabilmektedir (Alastuey vd.,1999; Knotte vd., 2015; Kopáček vd., 2016). Yağmur örneklerindeki elementlerin tayini, atmosferik çalışmalarda kirletici kaynaklarının belirlenmesinde kullanılmaktadırlar. Özellikle 3. veya 4. fraksiyonlardan sonraki alt örneklerinde elementlerin konsantrasyonlarının belirlenmesi kirlilik taşınımların bölgesel mi yoksa lokal mi olduğu konusunda kesin ve güvenilir sonuçlar sunabilmektedir. Çünkü ilk üç fraksiyondan sonraki örnekler ağırlıklı olarak rainout mekanizmasından kaynaklanan kirleticileri içermektedirler.

Yağmur sularındaki asitlerin öncüleri olan SO_2 ve NO_x , yağmur bulutlarının taşınımları ve alıcı ortamdaki çökeltme süreçlerinde H_2SO_4 ve HNO_3 'e dönüşürler (Hu vd., 2003; Kulshrestha vd., 2003; Khan ve Sarwar, 2014). Güçlü asitler olan H_2SO_4 , HNO_3 ve HCl 'e ek olarak endüstriyel aktivitelerden kaynaklanan organik asitler de yağmur sularının asitlenmesinde büyük önem taşımaktadırlar. Yağmur suyu asitliğinde, doğal kaynaklı organik asitler de önemli katkılarda bulunabilmektedir, örneğin ormanlık alanlarda olduğu gibi tüm bunlara ek olarak, iklim değişikliğinin etkileri ve deniz tuzlarının birikimi de yağmur suyunun asitliğinde rol almaktadır (Herut vd., 2000; Wright ve Jenkins, 2010). Şehirleşmiş bölgelerde hava kirletici konsantrasyonlarının özellikle kış aylarındaki artışları yalnızca kirletici emisyon miktarındaki artış ile açıklanamazlar, çünkü rüzgâr hızı ve yönleri, yağışlar ve sıcaklık gibi meteorolojik olaylar da kirletici konsantrasyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklık ve nem gibi meteorolojik parametreler kirleticilerin dönüşmesinde etkili olan önemli faktörlerdir.

Yağmur suyundaki iyonların konsantrasyonu; meteorolojik parametreler ile ilişkilendirilebilir ayrıca fiziksel ya da kimyasal dönüşümler ile konsantrasyon miktarlarındaki değişim gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenlerden dolayı birçok iyon bir mevsimden diğerine ciddi konsantrasyon artışı veya azalışı gösterebilmektedir. Literatürde taramaları yapıldığında birçok farklı araştırmacı tarafından SO_4^{2-}/K^+ ve NO_3^-/SO_4^{2-} oranları antropojenik kaynakların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eğer NO_3^-/SO_4^{2-} oranı '1' değerinden büyük ise, emisyonların büyük bir çoğunluğu mobil (trafik yoğunluğu gibi) kaynaklıdır; fakat bu oran '1' değerinden küçük ise örnekleme alanı kömür yanması veya endüstriyel aktivitelerin etkisi altında kalmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Çalışma Alanı (Working Area)

Örnekleme alanı Antalya İli'nde bulunan Akdeniz Üniversitesi kampüs alanı içerisindeki Gıda Güvenliği ve Tarımsal Araştırmalar Merkez binasının teras katına kurulmuş otomatik sıralı yağmur toplama cihazı kullanılarak toplanmıştır. Antalya İli'nde yoğun olarak kurulu bir endüstriyel faaliyet alanı bulunmamaktadır. Petrol yakıtları tüketen araçlar özellikle yaz aylarında büyük bir yoğunluk oluşturmaktadır, ayrıca liman bölgesine sahip olması ve bu bölgenin numune topladığımız alana da 5 km uzaklıkta bulunması, serbest bölgede petrol dağıtım şirketlerinin bulunması şehir atmosferinde kirliliğe sebep olmaktadır. Antalya İli merkezinde ve çevre ilçelerinde yıllık tonlarca ürünün üretildiği seracılık gibi tarımsal faaliyetler de bulunmaktadır.

2.2. Numunelerin Toplanması ve Hazırlanması (Collection and Preparation of Samples)

Sıralı yağmur örnekleri 07.12.2020 tarihinde D-serisi sıralı fraksiyonlar olarak 4 adet, 10.12.2020 tarihinde E-serisi olarak sıralı 8 adet ve 12.12.2020 tarihinde F-serisi olarak sıralı 10 adet yağmur suyu örnekleri otomatik sıralı yağmur toplama cihazı ile toplanmıştır. Örneklerin her serisi yağmur olayının başlangıcından bitimine kadar eşit hacimli olarak 300 mL sıralı örnekler halinde toplanmıştır. Gıda Güvenliği ve Tarımsal Araştırmalar Merkezi binasının teras katına kurulan ve teras duvarından dışa doğru 1 metre uzaklıkta sabitlenen yağmur toplama hunileri ile cihaza bağlanmıştır. Tasarlanan ve geliştirilen örnekleme sistemi, toplanan yağmur örneklerinin dış etkenlerden en az etkilenmesi için yer seviyesinden 25 m yüksekliğe monte edilmiştir. Kullanılan numune toplama hortumları tamamen izole odada tutulan otomatik yağmur toplama cihazına bağlanmıştır. Teras katında bulunan yüksek hassasiyetli yağış sensörü, yağış başladığında devreye girerek huniler üzerinde bulunan kapakları açmakta ve örnekler el değmeden toplanabilmektedir. Kapalı ve korumalı odadaki cihazın haznesindeki örnek toplama kaplarına otomatik olarak 300 mL'lik sıralı olarak örnekler

toplanmıştır. Cihazın yazılımı ile 300 mL'lik ilk kap dolduğunda, sensörler devreye girerek numune kaplarının bulunduğu tambur üzerindeki ikinci kap örnekle dolmaya başlamakta ve bu şekilde yağmur süresince sıralı olarak 300 mL'lik örnekler toplanmaktadır. Yağmur suyu örnekleme sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir. Alan blank (kör) örneklerin nasıl alındığı yazılmalıdır.

Cihaz ile yağmur devam ettiği sürece 14 adet fraksiyonel örnek sırası ile otomatik olarak toplanabilmektedir. Sıralı örnek sayısının 14'ü geçmesi durumunda, yedek olarak bekletilen ve önceden temizlenmiş kaplar cihaza yerleştirilmektedir. Toplanan yağmur sularından, örnekler toplanır toplanmaz, 15-20 mL arasında alınarak pH ve iletkenlikleri ölçülmüştür. Diğer analizler için toplanan örnekler buzdolabında muhafaza edilmiştir. Tüm cihaz sistemi her yağmur örneğinden sonra yıkanarak diğer örnekleme için hazır hale getirilmiştir. Örnek toplama şişeleri kullanımdan önce deiyonize su ile yıkanmıştır.

Sıralı yağmur örneklerinin pH ve iletkenliklerinin belirlenmesini takiben, buzdolabında bekletilen fraksiyonel örneklerin her birisinden 100 mL ayrılmış ve partikül boyut dağılımı için saklanmıştır. Toplanan örneklerin 50 mL'si selüloz asetat filtrelerden vakum altında süzülüş, süzüntü sonrası elde edilen filtreler mikro dalga cihazında yakılmış, süzüntü ise yüksek safılıkta nitrik asit, hidroklorik asit ve hidroflorikasit ilave edilerek su banyosunda uçurma işlemi uygulanmıştır. Örneklere ait filtreler ve süzüntü ayrı ayrı element analizi için çözünen ve çözünmeyen elementlerin tespiti için kullanılmıştır. Sıralı yağmur örneklerinden 85 mL alınarak 0,22 µm gözenekli selüloz asetat filtrelerden süzülüş, süzüntü iyon kromatografi analizlerinde anyon ve katyon tayinleri için kullanılmıştır.



Şekil 1. Oto Örneklem Sistemi, Akış Kontrolü ve Sistemin Dış Ünitesi (Auto Sampling System, Flow Control and System Outdoor Unit)

2.3. Element Analizi (Element Analysis)

Örneklere element konsantrasyonlarının belirlenmesi için Spectrometer Elan DRC-e (Perkin Elmer SCIEX, Norwalk ABD) ICPMS cihazı kullanılmıştır. Vakumlu süzme seti kullanılarak selüloz asetat filtrelerden süzülme işlemi yapılan yağmur suyu örneklerinin filtreleri Milestone Ethos ONE marka (İtalya) mikro dalga cihazında yakılmış, süzülen örnekler ise su banyosunda 2 kez tekrarlı olarak HNO₃ (Merck suprapure %65, Almanya), HCl (Merck %38-40 extrapure Almanya), HF (Merck %48, Almanya) ilave edilerek 3-5 ml kalana kadar uçurulmuş ve son uçurmadan sonra hazırlanan yağmur suyu örnekleri ICPMS cihazı ile analiz edilmiştir. Cihaz parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Toplanan 300 mL'lik sıralı örneklerden 50 mL falkon tüplere alınmış, vakumlu süzme aparatı altında 0,45 mikron gözenekli selüloz asetat filtreden süzülümüştür. Süzülen örneklerin üzerine 3 mL HNO₃, 2 mL HCl, ve 0,5 mL HF ilave edilerek 70-80 °C sıcaklıkta, kaynatmadan, su banyosunda çeker ocak içerisinde, numunelerin üzerleri kaba filtre kâğıdı ile örtülerek 5-6 mL kalana kadar uçurulmuştur. Aynı asitlendirme ve uçurma işlemi ikinci kez tekrarlanmış ve yine 5-6 mL kalana kadar uçurulmuştur. Uçurtma işlemi sonrasındaki örnekler, son hacimleri 15 mL olacak şekilde 18,2 mΩ saf su ile tamamlanmıştır. Vakum altında süzülen yağmur suyu örneklerinden süzüntü sonrası elde edilen filtre örnekleri mikro dalga yakma kabına alınıp, üzerine 5 mL HNO₃, 2 mL HCl, ve 0,5 mL HF ilave edilerek yakılmıştır. İlk adımda, 5 dakika içinde oda sıcaklığından 170 °C'ye doğrusal olarak yükseltildi. İkinci adımda, sıcaklık 20 dakikada lineer olarak 200 °C'ye yükseltildi. Son adımda ise sıcaklık 20 dakika içinde 50 °C'ye düşürüldü. Oda sıcaklığına getirilen numuneler falkon tüplere alınarak son hacim 15 mL olacak şekilde 18,2 mΩ saf su ile tamamlanmıştır. Yağmur örneklerine paralel olarak gerekli olan blank (kör) örnekler de hazırlanmış, örneklerle birlikte aynı analiz yöntemi kullanılarak analiz edilmişlerdir.

Tablo 1. ICP-MS Koşulları (ICP-MS Conditions)

| | |
|---------------------------------------|--|
| Spektrometre | Elan DRC-e (Perkin Elmer SCIEX, Norwalk, CT, USA) |
| Örnek girişi | Spray Chamber (Sisleştirici) |
| RF gücü (W) | 1100 |
| Konlar | Nikel |
| Gaz akış oranı (L dak ⁻¹) | Nebulizer gaz akışı: 0.93, Auxiliary gaz akışı:1.21, Plazma gaz akışı:18 |
| Nebulizer (Numune Püskürtücü) | Meinhard TQ plus Quartz Nebulizer |
| Analitik kütleler | Standart mode (Tüm Elementler) |
| Tarama okuma sayısı | 20 |
| Okuma tekrar sayısı | 1 |
| Tekrar sayısı | 3 |
| Oto örnekleyici | CETAX ASX-520 oto örnekleyici |
| Örnek yıkama | Zaman (50), hız (+/- rpm)-48 |
| Erteleme | Zaman (15), hız (+/- rpm)-20 |

2.4. pH ve İletkenlik Ölçümleri (pH and Conductivity Measurements)

pH ve iletkenlik ölçümleri Mettler-Toledo marka Seven Easy model cihaz kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler, toplanan yağmur suyu örneklerinin laboratuvar ortamında olması nedeni ile zaman kaybetmeden karşılaştırmalı olarak iki farklı pH metre ve iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yağmur suyu örneklerinden 15-20 mL alınarak behere konulup ölçümler alındıktan sonra probalar ve behere saf su ile yıkanarak ölçümler yapılmıştır. Ölçümlere başlamadan pH 4 ve 7 kalibrasyon standartları ile pH metre kalibre edilmiştir.

2.5. Partikül Boyut Dağılımları Analizi (Particle Size Distributions Analysis)

Sıralı olarak toplanan 300 mL her bir yağmur örneğinden ayrılan 100 mL örnekler partikül boyut analizi için ayrılmış ve Malvern marka, Mastersizer 2000 cihazında numuneler önışlemsiz analiz edilmiştir. Her numune okunmasından önce cihaz 3 kez saf su ile yıkanarak, 3 tekrarlı ölçüm yapılmıştır.

2.6. HYSPLIT Modelleme (HYSPLIT Modeling)

Yağış olaylarının başlamasından önce hava kütesinin geriye dönük yörünge analizleri ile birlikte aerosol dinamiğinin uydu ölçümlerini kullanarak, hava kütesi göçünün yağmur suyunun kimyasal bileşimi üzerindeki etkisi analiz edilmiş olmakta ve ayrıca yağış olaylarında ölçülen kirleticilerin kaynaklarının tahmin edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA)'nın Hava Kuvvetleri Laboratuvarı tarafından geliştirilmiş olan Hibrid Tek Parçacık Lagrange Entegre Yörünge Modeli (HYSPLIT-Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) kullanılmıştır ([http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_Ulusal_Okyanus_ve_Atmosfer_İdaresi_\(Draxler_ve_Hess,_1998\)\)](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_Ulusal_Okyanus_ve_Atmosfer_İdaresi_(Draxler_ve_Hess,_1998)))).

HYSPLIT hava parseli geri-yörüngelerinin belirlenmesi, yayılması ve çökmesi simülasyonlarını hesaplayan bir modeldir. Hava kirliliğinin taşınım bölge ve yönleri ile kaynaklarını tahmin etmekte ve aynı zamanda bu kirleticilerin lokal, bölgesel ve küresel ölçekteki taşınımını ve dağılımını da modellemektedir. HYSPLIT hava kütlelerinin kökenini belirlemek ve kaynak-alıcı ortam ilişkilerini kurmak için kullanılmakta olan bir geri yörünge analizidir. HYSPLIT kirletici maddelerin ve tehlikeli maddelerin atmosferik taşınmasını, yayılmasını ve birikmesini tanımlayan çeşitli simülasyonlar kullanır. Bu çalışmada, geri yörüngeler toplanan yağmur örneklerinin kaynak bölgelerini belirlemek için kullanılmıştır. HYSPLIT modeli bu çalışmada 72 saatlik geri yörüngeleri hesaplamak için çalıştırılmıştır. HYSPLIT Modeli için kullanılan girdiler, yörünge başlangıç konumları, yörünge türleri, alıcı ortamın koordinatları ve meteorolojik veri kaynağı gibi parametrelerden oluşmaktadır. Geri yörünge başlangıç zamanı olarak yağmur olayının bitiş saati (zamanı) kullanılmıştır. Modelde, model türü (geriye doğru), dikey hareket (izentropik olarak), başlangıç zamanı ve yörüngelerin yüksekliği (100, 1000 ve 1500 m AGL), toplam süre 72 saat ve yörünge sayısı 1 olarak seçilmiştir.

2.7. Metot Validasyonu (Method Validation)

Metot validasyonu, belirlenen hedeflere ulaşılabilirlik için, çalışılan yöntemin test edilerek bulunan sonuçların kanıtlanması işlemi olarak ifade edilmektedir (Araujo, 2009). Metot validasyonu yapılması planlanan çalışmaların analiz metodunun doğru olarak uygulanabilirliğini sağlamak, doğru olarak kullanıldığını göstermek

ve ölçüm sonuçlarının doğruluk ve kesinlik değerlerini ortaya koymak amacıyla yapılmaktadır (Taverniers vd., 2004). Metot validasyonu için sertifikalı referans madde olarak Enviro MAT Drink (As, Cd, Fe, Co, Cr, V, Cu, Mn, Ni, Pb, Al, Ba, Mg, Tl, Se, Be, Li, U ve Zn) kullanılmıştır. Analitleri içeren sertifikalı mix 3 standarttan (Perkin Elmer) hazırlanan ara stok standartlar ile matrikse spike yöntemi ile kalite kontrol çalışmaları yapılmıştır. Toplanan yağmur sularının birleştirilerek hazırlanan matriks örneğinin üzerine standart eklenerek 10 paralel örnek hazırlanmıştır. Bu örnekler geri kazanım çalışmalarında kullanılmıştır. Hazırlanan geri kazanım çalışmaları ICPMS cihazında üç tekrarlı olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan tespit sınırı, tayin sınırı ve %RSD değerleri belirlenmiştir (Kilic ve Kilic, 2019). Örnek hazırlama ve ICPMS cihazında konsantrasyon belirleme metodlarımızın doğruluğunu belirlemek için ayrıca matriks üzerine sertifikalı referans madde (Enviro MAT Drink) kullanılarak geri kazanım çalışmaları yapılmıştır. Reaktif blank ise asitler ve kullanılan saf su ile hazırlanmıştır. Numune ve geri kazanım çalışmaları aynı ön hazırlık işlemlerine maruz bırakılmış, su banyosunda uçurma ve mikro dalgada yakma işlemlerini de içerecek şekilde geri kazanım ve kalite kontrol çalışmaları yapılmıştır.

Matrikse spike yöntemi (Kilic vd., 2015) ile hazırlanan kalite kontrol örneklerinde konsantrasyonlar 2 ppb, 25 ppb ve 50 ppb olarak belirlenmiştir. ICPMS cihazında numunelerde konsantrasyon belirleme çalışmasına başlamadan önce sertifikalı mix 3 standart maddeden hazırlanan 2, 5, 10, 25, 50, 100, ve 200 ppb konsantrasyon noktaları ile kalibrasyon eğrisi çizdirilmiştir. Ayrıca, her 10 numuneden sonra geri kazanım örnekleri ve QC olarak 5 ppb ve 50 ppb standart örnekleri tekrar ölçülerek cihaz performansı takip edilmiştir. ICPMS cihazı ile yağmur suyu örneklerinde 25 adet majör ve eser element (Ag, Tl, Co, As, Cr, Pb, Ga, V, Cd, Se, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Al, Ba, Be, Bi, Cs, In, Li, Mg, Rb, U) tayin edilmiştir. Yağmur suyu örneklerinde Ag, Tl, Se, Be, Bi, Cs, In, Li, Rb, U elementlerine ait konsantrasyonlar tayin limiti seviyelerinde tespit edilmişlerdir.

2.8. Anyon-Kasyon Tayini (Anion-Cation Determination)

İyonların tayinleri için yağmur örneklerinden 85 mL alınarak, 0,22 µm' lik selüloz asetat filtreler kullanılarak 25 ml lik şırınga yardımı ile süzülmüş, majör anyon (F⁻, Br⁻, NO₂⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻², PO₄⁻³) ve kasyon (Ca⁺², Na⁺, Mg⁺², NH₄⁺, K⁺, Li⁺) tayinleri Dionex marka, Dionex ICS 5000 model iyon kromatografisi cihazına oto-örnekleyici aracılığı ile enjekte edilmiştir. Yağmur örneklerinde anyon analizi için kullanılan kolon Analitik, IonPac AS19 (250*2 mm) Guard, IonPac AG19 (50*2 mm), kasyon analizleri için kullanılan kolon Analitik, IonPac CS16 (250*3 mm) Guard, IonPac CG16 (50*3mm) dir. Kullanılan eluentler ise anyon için potasyum hidroksit, kasyon tayininde ise metan sülfonik asit kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Elementler İçin Metot Validasyon Sonuçları (Method Validation Results for Elements)

Sıralı yağmur suyu örneklerinin analizine başlamadan önce numunelere uygulanacak metotların validasyon çalışmaları yapılmıştır. Yağmur sularında bulunan element analizleri için tespit ve tayin sınırı, tekrarlanabilirlik ve geri kazanım çalışmaları yapılmıştır. Geri kazanım çalışmalarından elde edilen sonuçların bağıl standart sapma değeri (%RSD) tekrarlanabilirlik değeri olarak ifade edilmiştir. %RSD değerleri (25 µg L⁻¹ ekleme) geri kazanım çalışmasından hesaplanarak 0,34- 2,22 aralığında hesaplanmıştır. 2 µg L⁻¹, 25 µg L⁻¹ ve 50 µg L⁻¹ geri kazanım sonuçlarından 10 tekrarlı çalışılan % geri kazanım ±standart sapma değerleri 2 µg L⁻¹ için 89,1 ± 0,1- 98,6±0,08 Aralığında, 25 µg L⁻¹ için 93,3±0,5- 99,7±0,3 Aralığında, 50 µg L⁻¹ için (97,9±0,3-103±0,4) Aralığında bulunmuştur. Ayrıca sertifikalı referans madde olan Enviro MAT Drinking water kullanılarak çalışılan % geri kazanım ±standart sapma değerleri (97±7,07-103±1,68) Aralığında bulunmuştur. Bu verilere göre kullanılan yöntemin doğrusalılık, tekrarlanabilirlik, kesinlik bakımından yağmur sularında element tayinlerinde kullanılmaya uygun oldukları gözlemlenmiştir. Kalibrasyon denklemlerine ait korelasyon katsayısı, tespit ve tayin sınırı değerleri Tablo 2' de verilmiştir. Tespit sınırı ve tayin sınırı hesaplamaları Fe ve Al elementleri için 25 µg L⁻¹ diğer elementler için 2 µg L⁻¹ olarak hazırlanan geri kazanım standartları ile 10 tekrarlı çalışmalardan elde edilmiştir (tespit ve tayin sınırlarının reaktif blanklerin 10 tekrar okumasından hesaplanması daha doğrudur).

Tablo 2. Metot Validasyon Sonuçları (Method Validation Results)

| Element | Korelasyon Katsayısı | Tespit Sınırı($\mu\text{g L}^{-1}$) N=10 | Tayin Sınırı ($\mu\text{g L}^{-1}$) N=10 |
|---------|----------------------|--|--|
| Ag | 0,9994 | 0,19 | 0,56 |
| Tl | 0,9997 | 0,18 | 0,59 |
| Co | 0,9993 | 0,13 | 0,57 |
| As | 0,9993 | 0,31 | 0,54 |
| Cr | 0,9996 | 0,13 | 0,44 |
| Pb | 0,9983 | 0,14 | 0,46 |
| Ga | 0,9995 | 0,10 | 0,35 |
| V | 0,9999 | 0,12 | 0,41 |
| Cd | 0,9994 | 0,14 | 0,47 |
| Se | 0,9998 | 0,23 | 0,78 |
| Mn | 0,9996 | 0,20 | 0,66 |
| Fe | 0,9994 | 1,60 | 5,40 |
| Ni | 0,9995 | 0,17 | 0,58 |
| Cu | 0,9995 | 0,12 | 0,41 |
| Zn | 0,9996 | 0,10 | 0,29 |
| Al | 0,9999 | 1,50 | 5,10 |
| Ba | 0,9992 | 0,10 | 0,32 |
| Be | 0,9996 | 0,18 | 0,60 |
| Bi | 0,9997 | 0,19 | 0,65 |
| Cs | 0,9996 | 0,11 | 0,37 |
| In | 0,9996 | 0,16 | 0,54 |
| Li | 0,9996 | 0,12 | 0,40 |
| Mg | 0,9999 | 0,20 | 0,66 |
| Rb | 0,9997 | 0,10 | 0,27 |
| U | 0,9996 | 0,10 | 0,26 |

3.2. Nötralizasyon Faktörü (Neutralization Factor)

Yağmur damlacıklarında ve bulutun altında bulunan alkali ve asidik türler birbirleriyle etkileşerek nötralizasyon reaksiyonlarına girer ve bu süreç nötralizasyon faktörü (NF) ile ifade edilir (Bayramoğlu-Karşı vd., 2018). Amonyak ve sodyum tarafından örneklerin nispi nötralizasyonunu değerlendirmek için, nötralizasyon faktörleri (NF) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır (Possanzini vd., 1988; Kulshrestha vd., 1995; Flues vd., 2002; Singh vd., 2007).

$$NF_{xi} = [X_i] / ([SO_4^{2-}] + [NO_3^-]) \quad (1)$$

Burada: $[X_i]$ alkali bileşenin $\mu\text{eq/L}$ birimindeki konsantrasyonudur (Ca^{+2} , NH_4^+ , Mg^{2+} , Na^+ , K^+). Anyon ve katyon sonuçlarının $\mu\text{eq/L}$ cinsinden sonuçları Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Nötralizasyon Faktörü Değerleri (Neutralization Factor Values)

| NFCa42 | NFK+ | NFNH4+ | NFMg+2 | NFNa+ |
|--------|-------|--------|--------|-------|
| 5,73 | 0,041 | 1,28 | 0,29 | 0,41 |
| 2,46 | 0,036 | 0,77 | 0,32 | 0,46 |
| 3,27 | 0,036 | 0,67 | 0,24 | 0,38 |
| 2,44 | 0,049 | 0,62 | 0,39 | 1,06 |
| 2,00 | 0,058 | 0,25 | 0,39 | 1,19 |
| 6,27 | 0,099 | 0,31 | 0,38 | 1,16 |
| 2,46 | 0,065 | 0,32 | 0,40 | 1,18 |
| 2,44 | 0,048 | 0,23 | 0,36 | 0,88 |
| 1,58 | 0,053 | 0,32 | 0,21 | 0,48 |
| 2,04 | 0,068 | 0,38 | 0,30 | 0,91 |
| 1,96 | 0,046 | 0,43 | 0,23 | 0,56 |
| 1,27 | 0,045 | 0,82 | 0,23 | 0,76 |
| 2,81 | 0,056 | 0,39 | 0,58 | 1,66 |
| 4,26 | 0,122 | 0,37 | 0,63 | 1,39 |
| 4,43 | 0,103 | 0,25 | 0,68 | 1,21 |
| 8,28 | 0,163 | 0,40 | 0,93 | 1,12 |
| 3,42 | 0,049 | 0,23 | 0,42 | 0,76 |
| 3,80 | 0,180 | 0,29 | 0,36 | 0,71 |
| 3,35 | 0,099 | 0,46 | 0,64 | 1,95 |
| 4,05 | 0,123 | 0,35 | 0,47 | 1,09 |
| 4,96 | 0,162 | 0,90 | 0,49 | 1,50 |
| 1,95 | 0,157 | 1,05 | 0,35 | 1,17 |

3.3. İyonların Deniz Kaynaklı (%ss: deniz tuzu) ve Deniz Dışı Kaynaklardan Gelen (% nss: deniz tuzu olmayan) Miktarları (Amounts of Ions from Marine (%ss: sea salt) and Non-Marine Sources (%nss: non-sea salt))

Örneklemler, deniz atmosferinden etkilenen bir alandan yapıldığı için ölçülen iyonlarda denizden gelen konsantrasyon katkıları hesaplanarak, deniz dışı kaynaklardan gelen konsantrasyonların hesaplanması gerekmektedir (Bayramoğlu-Karşı vd., 2018). Bunun için deniz suyundaki metal ve iyonların sodyum veya klorür iyonuna oranları kullanılarak deniz tuzundan kaynaklanan konsantrasyonlar, toplam konsantrasyonlardan çıkartılmalıdır. İyonlar için deniz suyu referans konsantrasyonları Tablo 4' de verilmiştir. Antalya İli'nin deniz seviyesinde olması, örneklemlerin yapıldığı Akdeniz Üniversitesi'nin denize yakınlığı nedeni ile örneklerde bu hesaplamaların yapılması gerekli görülmüştür.

Tablo 4. İyonlar için Deniz Suyu Referans Konsantrasyonları (Seawater Reference Concentrations for Ions)

| İyonlar | Deniz suyu Konsantrasyonu(mg L ⁻¹) | İyon/Na oranı | İyon/Cl oranı |
|-------------------------------|--|---------------|---------------|
| Na ⁺ | 10500 | 1,0 | 0,552 |
| F ⁻ | 1,3 | 0,00012 | 0,0000684 |
| Cl ⁻ | 19000 | 1,81 | 1 |
| NO ₃ ⁻ | 2,21 | 0,00021 | 0,000116 |
| SO ₄ ⁻² | 2655 | 0,25 | 0,14 |
| K ⁺ | 380 | 0,036 | 0,02 |
| NH ₄ ⁺ | 0,643 | 0,000061 | 0,000034 |
| Mg ⁺² | 1350 | 0,13 | 0,07 |
| Ca ⁺² | 400 | 0,038 | 0,021 |

İyon konsantrasyonlarında deniz tuzu kaynaklı olmayan konsantrasyonların (nss) belirlenmesinde aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$X_{nss} = X_t - \left(\frac{X_{sw}}{Cl_{sw}} \right) * Cl_t \quad (2)$$

Burada, X = iyon; X_{nss} = deniz tuzu olmayan konsantrasyon; X_t = ölçülen iyon konsantrasyonu; X_{sw} = iyonun deniz suyundaki konsantrasyonu; Cl_{sw} = klorun deniz suyundaki konsantrasyonu; Cl_t = ölçülen klor konsantrasyonu' nu göstermektedir. Çalışılan tüm sıralı yağmur suyu örneklerinde hesaplamalar yapılarak, denizden kaynaklı ve deniz dışı kaynaklı konsantrasyonlar grafiksel olarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.

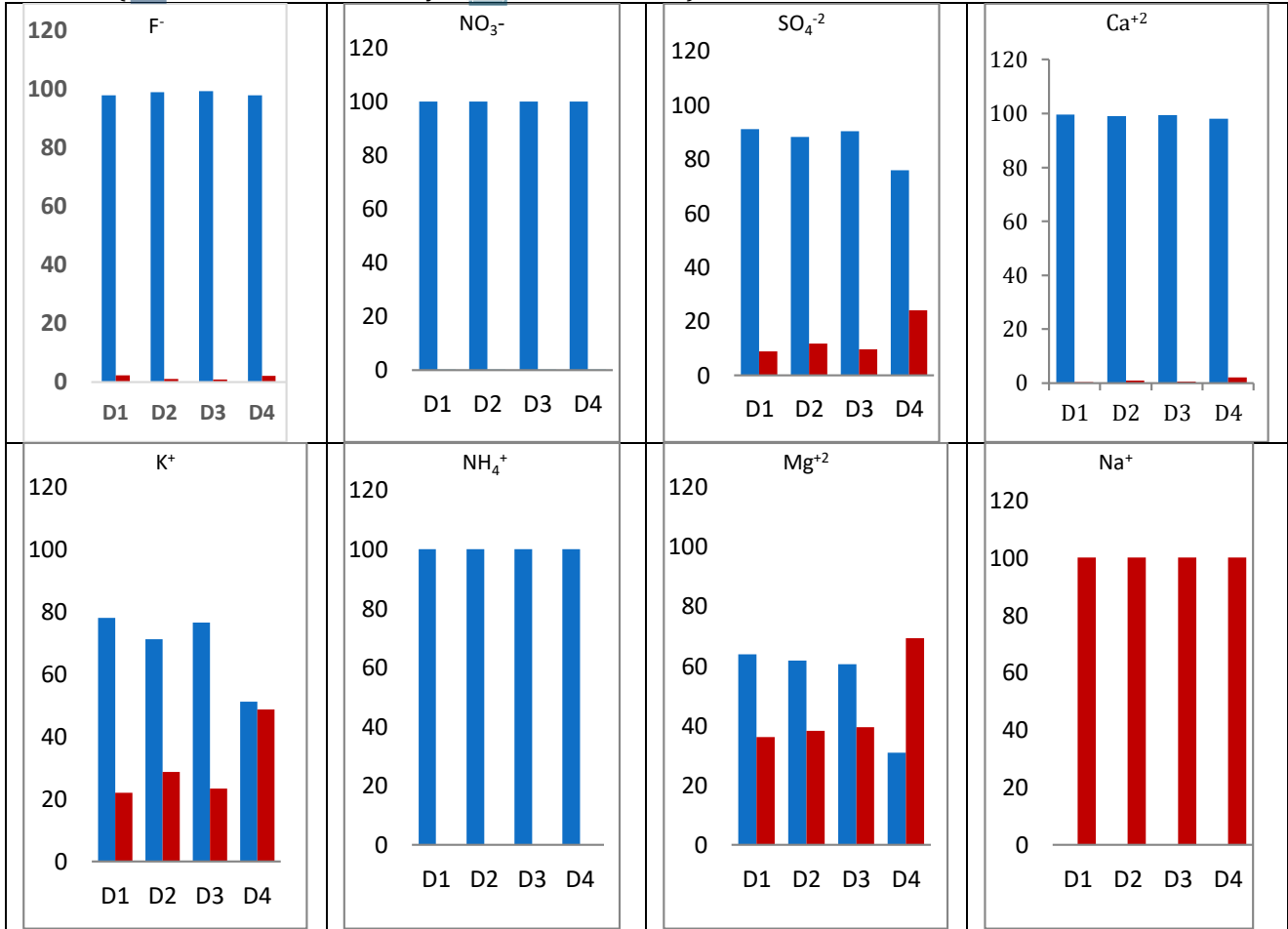
D serisinde Flor konsantrasyonu % 98 deniz dışı bir kaynaktan % 2 kadarı deniz kaynaklıdır, Nitrat konsantrasyonunun nerede ise tamamı deniz dışı kaynak girişimli, sülfat iyonu için %86 kadarı deniz dışı, %14

kadarı ise deniz kaynaklı olarak tespit edilmiştir. Kalsiyum konsantrasyonu için % 98 deniz dışı kaynaklı olduğu, % 2 kadarı ise deniz kaynaklı olduğu söylenebilir. Potasyum konsantrasyonu için ise % 70'i deniz dışı kaynaklı olmasına rağmen yaklaşık % 30 kadarı deniz kaynaklı olduğu, Amonyum konsantrasyonunun tamamı deniz dışı kaynaklı olmasına rağmen, Sodyum konsantrasyonu ise deniz kaynaklı olduğu, Magnezyum konsantrasyonu ise %54 deniz dışı kaynaklı, %46 ise deniz kaynaklıdır.

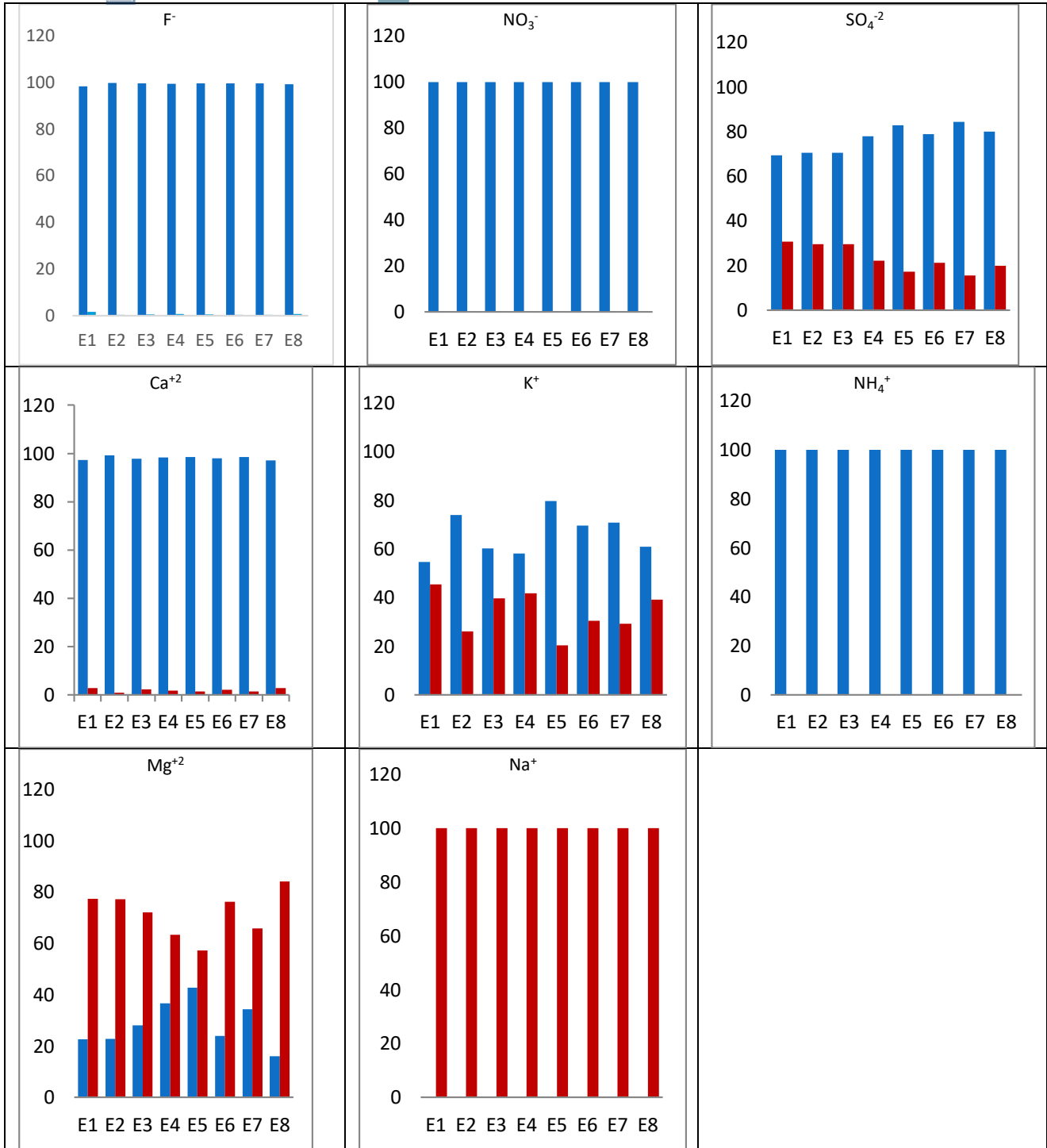
E serisi örneklerde ise flor, nitrat ve amonyum iyonlarının tamamına yakını % 99 oranında deniz dışı kaynaklardan geldiğini, sülfat iyonunun %77 kadarı deniz dışı, %23 kadarı deniz kaynaklı olduğu, kalsiyum konsantrasyonu için %98 kadarı deniz dışı, %2 kadarı deniz kaynaklı olduğu, potasyumun %66 kadarı deniz dışı, %33 kadarı deniz kaynaklı, sodyum iyonu tamamı deniz kaynaklı magnezyum konsantrasyonu ise % 23 kadarı deniz dışı %77 kadarı deniz kaynaklı olduğu gözlemlenmiştir.

F serisi örneklerde ise nitrat ve amonyum iyonlarının tamamı deniz dışı kaynaklardan geldiği, flor ve kalsiyum iyonlarının %98 deniz dışı, kükürt ve potasyum iyonlarının %71 deniz dışı kaynaklardan, %29 kadarı deniz kaynaklı, magnezyum iyonu diğer serilerde olduğu gibi %36 kadarı deniz dışı kaynaklı, %64 kadarı deniz kaynaklı, sodyum iyonu ise tamamı deniz kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

D serisi (■ %nss ; deniz tuzu olmayan ■ % ss: deniz tuzu)



E serisi (■ %nss ; deniz tuzu olmayan ■ % ss: deniz tuzu)





Şekil 2. D,E,F Serileri Sıralı Yağmur Örnekleri Fraksiyonlarındaki Denizden Gelen ve Denizden Gelmeyen Konsantrasyon Miktarları (Seasalt and Non-seasalt Concentrations of Major Ions Corresponding to Sequential Rain Samples of D, E, F Series)

3.4. pH ve İletkenlik Sonuçları (pH and Conductivity Results)

Yayınlanmış olan makaleler incelendiğinde yağmur suyu örneklerinin pH değeri (Lu vd., 2011; Xu vd., 2015; Pu vd., 2017; Tiwari vd., 2016; Xing vd., 2017; Charlson ve Rodhe, 1982; Hu vd., 2003) kirlenmemiş bir ortamda atmosferik CO₂ ile dengedeki bulut suyunda 5,6 civarında olmalıdır. Toplanan sıralı yağmur fraksiyonlarına ait en düşük ve en yüksek ölçülen pH değerleri D serisi yağmur suyu örneklerinde 6,3-6,9 E serisi örneklerinde 6,06-6,62 ve F serisi örneklerinde 5,99-7,13 olarak ölçülmüştür. Üç yağmur olayında da asit yağmuru (pH < 5,6) özelliklerine rastlanılmamıştır. Beklenenin aksine sıralı yağmur örneklerine ait fraksiyonel örneklerde yağışın

başlangıcından bitimine kadar pH değerleri artış göstermemiştir. Yağmurların asidik karakter göstermesinin yapılan araştırmalar sonucuna göre iki nedeninin olabileceği düşünülmektedir. Birinci yaklaşım asidik yağışların uzun mesafeli taşınım (bölgesel) kaynaklı olabileceği ve ikincisinin de lokal olarak örneklerin toplandığı alanın kirlenmiş bir atmosfere sahip olması veya örnekleme alanının yoğun bitki örtüsü ile kaplanmış olması nedeni ile bitkilerden (orman) atmosfere salınan organik asitlerin pH düşüklüklerinden sorumlu olabileceğidir. Sıralı yağmur suyu örneklerinde en düşük ve en yüksek iletkenlik değerleri D serisi için 7,76-14,39 μ S/cm arasında, E serisi için 5,85-9,63 μ S/cm arasında, F serisi için 5,23-13,74 μ S/cm arasında ölçülmüştür. Bulunan iletkenlik sonuçları genel olarak iyon tayinlerinde seyreltme faktörü uygulanmasının gerekli olup olmadığının belirlenmesi amacı ile kullanılmaktadır. İletkenlik sulu bir çözeltinin elektriği iletme kabiliyetinin sayısal bir ifadesidir. Suyun iletkenliği sudaki iyonların toplam ve bağlı konsantrasyonlarına, hareketliliğine, değerliklerine ve ölçüm sıcaklığına bağlıdır. Suyun iletkenliği ölçülerek, sudaki iyon miktarı yaklaşık olarak tayin edilebilir, Suda bulunan safsızlıklar çoğaldıkça suyun iletkenliği artar. Suyun iletkenliği ölçülerek suyun içindeki çözünmüş mineral miktarı konusunda fikir sahibi olabiliriz. Örneklerimizde farklı oranlarda ölçülen iletkenlik değerlerinin nedenleri ise yağmur örneğinin toplandığı andaki hava hareketlerinin yönü, çöl tozu taşınımı, yerel hava kirliliğinin yoğun olduğu bölgeden esen hava hareketine maruz kalması, antropojenik kaynakların etkisi, denizden esen hava hareketi ile tuzluluk oranının etkisi ile beraber yağın yağmurların toplanması iletkenlik değerlerinin farklı sonuçlarda ölçülmesine gerekçe olarak gösterilebilir. D ve F serisindeki anyon ve katyon oranları E serisine göre daha yüksek miktarlarda ölçülmüştür. İletkenlik birimi ise MikroSiemens/cm'dir Bu çalışmada, sıralı yağmur suyu örnekleri için seyreltme faktörü uygulanmamıştır. Sıralı yağmur suyu örneklerinin pH ve İletkenlik değerleri Tablo 5' de verilmiştir.

Tablo 5.pH ve İletkenlik Sonuçları (pH and Conductivity Results)

| NumuneKodu | NumuneTarihi | pH | İletkenlik(μ S cm ⁻¹) |
|------------|--------------|------|--|
| D1 | 07.12.2020 | 6,90 | 11,02 |
| D2 | 07.12.2020 | 6,30 | 7,76 |
| D3 | 07.12.2020 | 6,34 | 10,0 |
| D4 | 07.12.2020 | 6,38 | 14,39 |
| E1 | 10.12.2020 | 6,06 | 8,47 |
| E2 | 10.12.2020 | 6,51 | 8,02 |
| E3 | 10.12.2020 | 6,40 | 5,85 |
| E4 | 10.12.2020 | 6,62 | 9,63 |
| E5 | 10.12.2020 | 6,40 | 7,28 |
| E6 | 10.12.2020 | 6,45 | 5,63 |
| E7 | 10.12.2020 | 6,35 | 7,36 |
| E8 | 10.12.2020 | 6,47 | 8,37 |
| F1 | 12.12.2020 | 6,38 | 12,84 |
| F2 | 12.12.2020 | 6,51 | 5,23 |
| F3 | 12.12.2020 | 6,13 | 3,78 |
| F4 | 12.12.2020 | 6,39 | 6,44 |
| F5 | 12.12.2020 | 6,36 | 5,41 |
| F6 | 12.12.2020 | 6,13 | 3,53 |
| F7 | 12.12.2020 | 5,99 | 5,36 |
| F8 | 12.12.2020 | 6,16 | 3,42 |
| F9 | 12.12.2020 | 7,13 | 13,74 |
| F10 | 12.12.2020 | 6,34 | 7,62 |

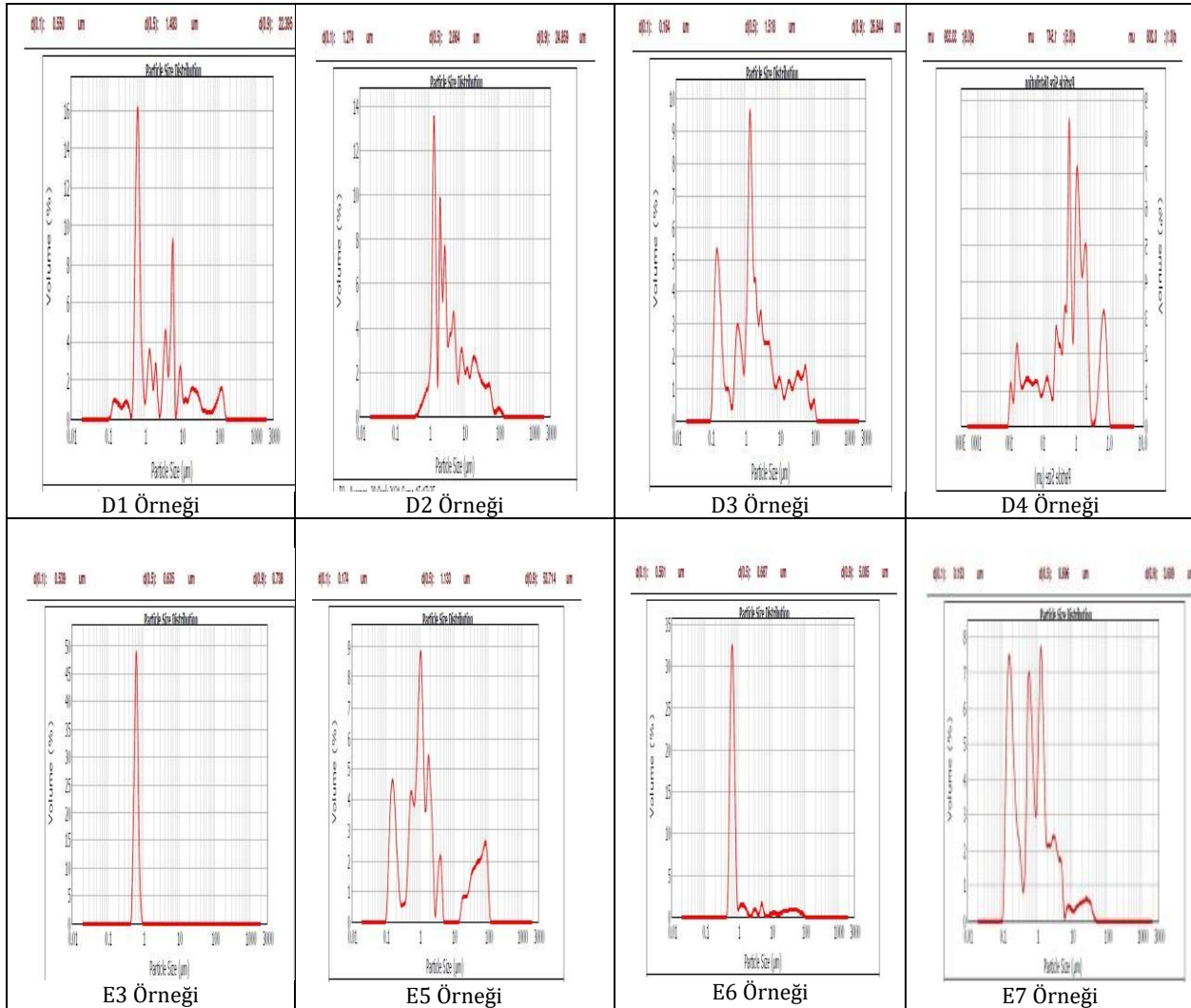
3.5. Partikül Boyut Dağılımları (Particle Size Distributions)

Fraksiyonel numunelerinde, suda çözünmeyen partikül maddelerin karakterizasyonları için partikül boyut dağılımları belirlenmiştir. Partikül boyutu dağılımı ölçümlerinde, medyan değerler, popülasyonun yarısının partikül boyutlarının bu noktanın üzerinde, diğer yarısının bu noktanın altında bulunduğu şekilde tanımlanır. Ortanca, dağılımı bu değer yarısı üstünde ve diğer yarısı bu değer altında olacak şekilde bölen mikron cinsinden boyut olan D50 olarak isimlendirilir. Dağılım genişliğini tanımlamak için başka bir yaygın yaklaşım ise x ekseninde D (0,1), D (0,5) ve D (0,9) olarak üç değer belirtilmesidir. Bazı sıralı yağmur suyu örneklerinde örnekleme alanındaki lokal meteorolojik değişikliklerden kaynaklı partikül boyut dağılımlarında yağış sürerken azalma ve yeniden artma gözlenmiştir ki genel olarak bu sonuçlar lokal rüzgar yönü veya hızında oluşan değişimlerden kaynaklanmaktadır. Bu sonuçların açıklanmasına yardımcı olabilmesi için ise üç boyutlu geri yörünge hesaplamaları yer seviyesinden 500, 1000 ve 1500m yükseklikte çalıştırılarak yörünge takipleri yapılmıştır. Sıralı yağmur örneği fraksiyonlarına göre partikül boyutları ile numunenin içerdiği anyon ve katyon konsantrasyonları kullanılarak rainout (bulutla taşınan kirlilik) ve washout (bulut altında bulunan kirlleticiler) proseslerinin ayrılması sağlanmıştır. D ve E serilerine ait ölçülebilen sıralı yağmur suyu fraksiyonlarına ait partikül boyut analiz d(0.1) μ m, d(0.5) μ m, d(0.9) μ m sonuçları Tablo 6' da verilmiştir. D, E ve F serisi sıralı

yağmur suyu örneklerinde sadece (D2, D3, D4, E3, E5, E6, E7) ait numunelerde ölçüm alınabilmiştir. Diğer örneklerde ise ölçüm limitinin altında kalmıştır. Ölçülebilen örneklerle ait partikül boyut analiz sonuç grafikleri ise Şekil 3 'de verilmiştir.

Tablo 6. Partikül Boyut Analiz Sonuçları (Particle Size Analysis Results)

| Numune Kodu/Tarihi | d(0.1) μm | d(0.5) μm | d(0.9) μm |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| D1 07.12.2020 | 0.550 | 1.483 | 22.395 |
| D2 | 1.274 | 2.864 | 24.859 |
| D3 | 0.164 | 1.518 | 26.844 |
| D4 | 0.208 | 1.547 | 33.339 |
| E3 10.12.2020 | 0.539 | 0.635 | 0.738 |
| E5 | 0.174 | 1.133 | 53.714 |
| E6 | 0.561 | 0.687 | 5.005 |
| E7 | 0.153 | 0.696 | 3.609 |

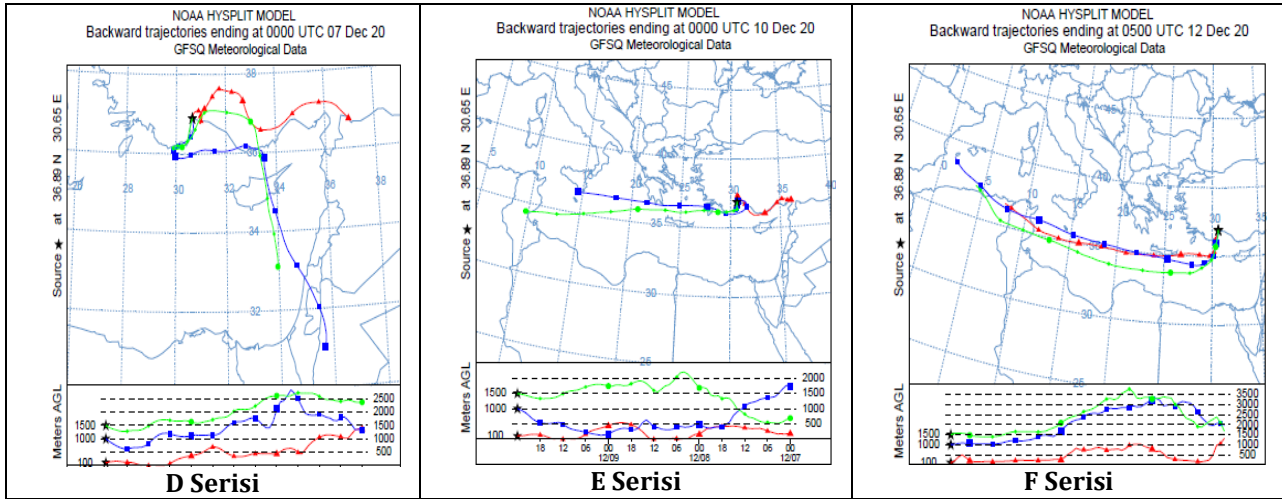


Şekil 3. D ve E Serisi Partikül Analiz Sonuçları (D and E Series Particle Analysis Results)

3.6. HYSPLIT Modelleme Sonuçları (HYSPLIT Modeling Results)

HYSPLIT modelinde bölge koordinatları haritada işaretlenerek geçmiş yörüngeler (backtrajectory), yani yağmuru getiren hava kütesinin takip ettiği yol, oluşturulmuş ve toz taşınımını gösteren haritalar elde edilerek incelenmiştir (Fraile vd., 2020). Geri yörünge hesaplamalarından elde edilen çıktılar, üç yağmur örneği için sırası ile Şekil 4' de verilmiştir. D kodlu yağmur olayına neden olan 100 m'deki hava kütesinin lokal (Antalya şehir atmosferi) ve doğu illerinden kaynaklandığı görülmektedir. Ancak 1000 ve 1500 m hava kütlelerinin Ortadoğu'da (Mısır, Suriye, Ürdün) başladığı ve Akdeniz üzerinden alıcı ortama ulaştığı görülmektedir. Dolayısı ile D serisi örneklerin hem çöl tozları (1000 ve 1500 m hava kütleleri) hem de şehir atmosferinden (100 m) etkilendiği görülmektedir. Eğer yağmur olayları Kuzey Afrika veya Orta Doğu bölgelerinden gelen hava kütleleri

tarafından etkileniyorlarsa kompozisyonlarında yüksek oranlarda kalsiyum karbonat barındırmaktadırlar (Bayramoğlu Karşı vd., 2018) ve bu nedenle de anyon/kasyon oranları genelde 1,0 değerinden çok küçük olmaktadır. Anyon eşdeğerleri toplamının kasyonlardan daha düşük olmasının nedenlerinden bir tanesini bu karbonat ve bikarbonatlar oluştururken, benzer kurak bölgelerden gelen yağmur sularında organik asit anyonlarının katkısı çok etkili olmamaktadır. Sonuç olarak D serisi örneklerin ağırlıklı olarak çöl kökenli tozlardan etkilendiği, lokal kaynakların ve doğu illerden gelen hava kütlelerinin yağmur suyu kompozisyonlarında pek etkin olamadıkları (100 m) anlaşılabilmektedir. E kodlu yağmur olayında, yağmur suyu kompozisyonunda lokal atmosfer ve doğu illerinden gelen hava kütlelerinin (100 m) ve Kuzey Afrika ülkelerinden Cezayir ve Tunus gibi ülkelerin atmosferlerinden kaynaklanan ve çöl tozu içeren hava kütlelerinden (1000 ve 1500 m) etkilendiği görülmektedir. Elbetteki, üç yağmur olayı da (D, E ve F serileri) Akdeniz'den de etkilenmektedirler ancak bu etki daha çok deniz tuzu içerikli olduğundan ve anyon-kasyon konsantrasyonlarında düzeltildiğinden buradaki yorumları etkilemeyecektir. Deniz tuzu katkısı hesaplanıp, toplam konsantrasyonlardan çıkartılmadığı durumlarda, sonuçlarda görülen anyon yetersizliği (deficiency) durumu görülmeyebilir (yüksek klorür nedeni ile) ve sonuçlar yanlış yorumlanabilir. F kodlu yağmur olayına neden olan hava kütlelerinin üçünün de (100, 1000 ve 1500 m) Akdeniz'in İspanya açıklarında başladığı ve yol üzerinde yine Cezayir ve Tunus gibi Kuzey Afrika ülkeleri üzerinden geçtikleri, dolayısı ile çöl tozu ile yüklendikleri ve Akdeniz üzerinden alıcı ortama ulaştıkları görülmektedir (Şekil 4). Zaten anyon ve kasyonların toplam eşdeğerlik oranlarına bakıldığında da kaynakların geri-yörünge ile doğru olarak tahmin edildiğini göstermektedir. D serisi örnekler ağırlıklı olarak Suriye ve Ürdün atmosferlerinden taşınan tozlarla etkilendiğinden ve alıcı ortama olan mesafe daha kısa olduğundan, örneklerde daha yüksek çöl tozu bulunduğu ve bu yüzden de anyon-kasyon oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Diğer iki yağmur olayı da çöl tozları içermektedirler ancak alıcı ortama olan mesafeleri D serisinde görülen mesafeden çok daha uzak olduğundan, çöl tozu yüklü hava kütlesi alıcı ortama gelinceye kadar içerisindeki tozların yerçekimi etkisiyle çökmesi nedeni ile göreceli olarak daha az toz konsantrasyonu taşımış olabileceği tahmin edilmiştir.



Şekil 4. HysplitGerı-yörünge Grafikleri (HysplitBacktrajectoryPlots)

3.7. Anyon/Kasyon Oranları (Anion/Cation Ratios)

Toplamda üç seri ve 25 fraksiyonel sıralı yağmur suyu örneklerinin analiz sonuçlarına göre çözünen element miktarı (süzüntüde ölçülen değerler) ile çözünmeyen (filtrede kalan partiküllerden elde edilen sonuçlar) element miktarları toplanarak, toplam element miktarı hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 7' de verilmiştir. Anyon ve kasyonlar için mikro-eşdeğer konsantrasyonlar hesaplanmış ve toplam anyon ve toplam kasyon eşdeğerlerinin oranları incelenmiştir. Oranları teorik olarak 1 çıkması beklenmektedir. Eğer anyon/kasyon oranı 1'den küçük çıkarsa anyonların ya konsantrasyonlarının analitik olarak yanlış bulunduğu veya analize dahil edilmesi gereken önemli anyonların eksik olduğu anlamına gelmektedir. Bu eksiklik literatür çalışmalarında genellikle ölçülmeyen bikarbonatlar (HCO_3^-) veya yine ölçülmeyen organik asit anyonları ile açıklanmaktadır. Bu çalışmada, H^+ eşdeğer konsantrasyonları ölçülen pH değerlerinden, HCO_3^- eş değer konsantrasyonları da (Nieberding vd., 2018). aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır (Bisht vd., 2017; Rao vd., 2016). Elde edilen sonuçlar Tablo 8' de verilmiştir.

$$\mu\text{Eq-H}^+ \text{ değerleri}; [\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ (eq/l)} \quad (3)$$

$$\mu\text{Eq-HCO}_3^- \text{ değerleri}; [\text{HCO}_3^-] = 10^{11.24 + \text{pH}} \text{ (eq/l)} \quad (4)$$

Tablo 7. Çözünen ve Çözünmeyen Element Sonuçları Toplamı (Sum of Soluble and Insoluble Fractions of Elements)

| TARİH | NUMUNE | As | Cr | Pb | Ga | V | Cd | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | Al | Ba | Mg |
|------------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|-----|------|------|
| 07.12.2020 | D1 | 11,19 | 1,97 | 1,90 | T.E. | 24,8 | T.E. | 2,60 | 128,6 | 9,24 | 6,76 | 59,8 | 459 | 3,84 | 145 |
| 07.12.2020 | D2 | 5,29 | 0,68 | 1,15 | T.E. | 10,2 | T.E. | 1,88 | 65,04 | 52,7 | 141 | 321 | 347 | 1,70 | 105 |
| 07.12.2020 | D3 | 8,01 | 3,75 | 1,08 | T.E. | 16,8 | T.E. | 2,47 | 77,01 | 36,4 | 6,54 | 492 | 492 | 3,40 | 127 |
| 07.12.2020 | D4 | 8,87 | 1,36 | 0,72 | T.E. | 17,7 | T.E. | 4,99 | 500 | 1,94 | T.E. | 13,74 | 386 | 3,53 | 180 |
| 10.12.2020 | E1 | 8,46 | 0,38 | 0,30 | T.E. | 18,2 | T.E. | 2,21 | 47,73 | 6,80 | T.E. | 19,71 | 304 | 3,06 | 190 |
| 10.12.2020 | E2 | 8,40 | 4,50 | 0,43 | T.E. | 17,6 | T.E. | 3,19 | 103,9 | 2,84 | 0,68 | 9,68 | 336 | 2,60 | 122 |
| 10.12.2020 | E3 | 7,57 | 1,17 | 0,68 | T.E. | 16,7 | T.E. | 2,64 | 125,7 | 14,8 | T.E. | 8,47 | 345 | 2,62 | 96,1 |
| 10.12.2020 | E4 | 9,22 | 0,59 | 0,95 | T.E. | 17,7 | T.E. | 1,09 | 46,3 | 2,77 | T.E. | 12,8 | 403 | 2,06 | 113 |
| 10.12.2020 | E5 | 8,40 | 1,67 | 0,83 | T.E. | 16,2 | T.E. | 2,42 | 68,1 | 2,92 | T.E. | 13,3 | 386 | 1,69 | 135 |
| 10.12.2020 | E6 | 6,95 | 1,55 | 0,76 | T.E. | 13,9 | T.E. | 1,64 | 51,0 | 9,06 | T.E. | 11,6 | 318 | 1,64 | 87,4 |
| 10.12.2020 | E7 | 8,25 | T.E. | 0,38 | T.E. | 15,2 | T.E. | 0,66 | 40,5 | 1,54 | T.E. | 13,15 | 222 | 1,49 | 93,3 |
| 10.12.2020 | E8 | 8,33 | T.E. | 2,44 | T.E. | 16,7 | T.E. | 2,76 | T.E. | 2,37 | T.E. | 108 | 265 | 12,9 | 199 |
| 12.12.2020 | F1 | 8,96 | T.E. | 0,25 | T.E. | 17,6 | T.E. | 1,15 | 64,5 | 2,18 | T.E. | 22,4 | 228 | 1,70 | 375 |
| 12.12.2020 | F2 | 9,12 | T.E. | 0,43 | T.E. | 17,8 | T.E. | 1,04 | 50,7 | 3,07 | T.E. | 8,28 | 160 | 1,44 | 104 |
| 12.12.2020 | F3 | 7,17 | T.E. | 0,60 | T.E. | 15,2 | T.E. | 0,47 | 38,6 | 0,82 | T.E. | 5,39 | 140 | 1,23 | 72,9 |
| 12.12.2020 | F4 | 11,13 | T.E. | 0,39 | T.E. | 20,1 | T.E. | 0,73 | 47,7 | 1,83 | T.E. | 12,9 | 188 | 1,61 | 105 |
| 12.12.2020 | F5 | 8,82 | T.E. | 0,76 | T.E. | 18,0 | T.E. | 1,54 | 104,4 | 7,64 | T.E. | 12,3 | 363 | 2,58 | 89,6 |
| 12.12.2020 | F6 | 10,80 | 0,18 | 1,08 | T.E. | 18,9 | T.E. | 1,31 | 49,35 | 15,7 | T.E. | 19,1 | 246 | 2,49 | 71,2 |
| 12.12.2020 | F7 | 10,09 | T.E. | 1,03 | T.E. | 19,9 | T.E. | 0,86 | 51,42 | 4,75 | T.E. | 4,52 | 156 | 3,33 | 112 |
| 12.12.2020 | F8 | 9,11 | T.E. | 0,15 | T.E. | 17,9 | T.E. | 1,10 | 44,61 | 3,01 | T.E. | 6,43 | 250 | 1,83 | 84,8 |
| 12.12.2020 | F9 | 9,61 | 0,82 | 0,61 | T.E. | 17,7 | T.E. | 2,37 | 79,59 | 2,61 | T.E. | 12,7 | 401 | 1,95 | 107 |
| 12.12.2020 | F10 | 10,11 | T.E. | 0,40 | T.E. | 19,1 | T.E. | 6,24 | 114,7 | 5,69 | T.E. | 4,86 | 225 | 5,18 | 103 |

Tablo 8. Anyon/Katyon (H⁺-HCO₃⁻ Ekli) Oranları (Anion/Cation (H⁺-HCO₃⁻ Added) Ratios)

| Numuneler | pH | μEq-H ⁺ | μEq-HCO ₃ ⁻ | Σanyon/Σkatyon |
|------------|------|--------------------|-----------------------------------|----------------|
| D1 | 6,90 | 0,126 | 45,71 | |
| D2 | 6,30 | 0,501 | 11,48 | |
| D3 | 6,34 | 0,457 | 12,59 | |
| D4 | 6,38 | 0,417 | 13,80 | |
| D Ortalama | | | | 0,43 ± 0,10 |
| E1 | 6,06 | 0,871 | 6,61 | |
| E2 | 6,51 | 0,309 | 18,62 | |
| E3 | 6,40 | 0,398 | 14,45 | |
| E4 | 6,62 | 0,240 | 23,99 | |
| E5 | 6,40 | 0,398 | 14,45 | |
| E6 | 6,45 | 0,355 | 16,22 | |
| E7 | 6,35 | 0,447 | 12,88 | |
| E8 | 6,47 | 0,339 | 16,98 | |
| E Ortalama | | | | 0,64 ± 0,11 |
| F1 | 6,38 | 0,417 | 13,80 | |
| F2 | 6,51 | 0,309 | 18,62 | |
| F3 | 6,13 | 0,741 | 7,762 | |
| F4 | 6,39 | 0,407 | 14,12 | |
| F5 | 6,36 | 0,436 | 13,18 | |
| F6 | 6,13 | 0,741 | 7,762 | |
| F7 | 5,99 | 1,023 | 5,623 | |
| F8 | 6,16 | 0,692 | 8,318 | |
| F9 | 7,13 | 0,074 | 77,62 | |
| F10 | 6,34 | 0,457 | 12,59 | |
| F Ortalama | | | | 0,52 ± 0,10 |

Çıkan sonuçlara göre verilen ortalama eşdeğer anyon ve katyon oranları göz önüne alındığında D-serisi örneklerinde 0.43 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin bazı örneklerde düşük çıkmasının sebebi ölçülemeyen organik asit anyonları da bu oranlarda değişimlere neden olabilmektedir. Diğer, E-serisi ve F-serisi örnekler için toplam eşdeğer anyonun toplam eşdeğer katyonlarına oranı ise 0,64 ve 0,52 olarak bulunmuştur. Bu yağmur örneklerinde de yüksek seviyelerde anyon eksikliği tespit edilmiştir. Bu eksiklik, E-serisi örneklerde görülemediğinden, iyon analizlerinde herhangi bir analitik hatanın olmadığı anlaşılmaktadır. Bu anyon eksikliklerinin cevabı Şekil 4'de verilen geri yörünge ile net olarak açıklanabilmektedir. İncelenen yağmur örneklerinden de anlaşılacağı üzere, Ortadoğu ve Kuzey Afrika kökenli hava kütleleri çöl tozu taşıdıklarından yağmur sularında toprak elementlerinin taşınımı olduğu ve anyon eksikliklerine neden olmaktadır. Bu çalışmadaki sonuçlar da aynı durumu destekleyecek şekilde gözlemlenmiştir. Böyle durumlarda anyonlara bikarbonat eşdeğer miktarları da eklenerek toplam eşdeğer anyon, toplam eşdeğer katyon oranlarının 1'e yaklaşması sağlanmaktadır. Bikarbonat eşdeğerliğinin hesaba katılmasına rağmen hala %15-25 kadar anyon eksikliği görülüyorsa, bu durumda eksikliğin organik asitlere ait anyonlardan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Prof. Dr. Muhammet Yunus PAMUKOĞLU danışmanlığında yürütülen ve Murat KILIÇ tarafından hazırlanan "Sıralı yağmur örneklerinde göller bölgesine çökelen partiküllerin boyut dağılımları, morfolojileri ve kompozisyonlarının belirlenmesi" başlıklı Doktora Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen FDK-2020-8277 numaralı proje kapsamında yapılmıştır. Göstermiş oldukları maddi destek için çok teşekkür ederiz. Ayrıca Akdeniz Üniversitesi Gıda Güvenliği ve Tarımsal Araştırmalar Merkezine, yapılan çalışmalara desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız. Yazarlar otomatik yağmur toplama cihazının tasarımını, imalatını ve yazılımı gerçekleştiren Öğr. Gör. Dr. Türkay ÖNOCAK'a teşekkür etmektedir. Yazarlar yağmur toplama cihazının tasarım ve teknik özelliklerine katkıda bulunan ve de hesaplamalarda yardımcı olan Prof. Dr. Duran KARAKAŞ'a teşekkürlerini sunarlar.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

Alahmr, F.O.M., Othman, M., Wahid, N.B.A., Halim, A.A., Latif, M.T., 2012. Compositions of dust fall around semi-urban areas in Malaysia. Aerosol Air Qual Res 12, 629–642

- Alastuey, A., Querol, X., Chaves, A., Ruiz, C.R., Carratala, A., Lopez-Soler, A., 1999. Bulk deposition in a rural area located around a large coal-fired power station, northeast Spain. *Environ Pollut.* 106, 359–367.
- Al-Khashman, O.A., 2009. Chemical characteristics of rainwater collected at a western site of Jordan. *Atmos Res* 91, 53–61.
- Arenas-Lago, D., Veja, F.A., Silva, L.S., Andrade, L., 2013. Soil interaction and fractionation of added cadmium in some Galician soils. *Microchem J* 110, 681–690.
- Bayramoğlu-Karşı, M.B., Yenisoý-Karakaş, S., Karakaş, D., 2018. Investigation of washout and rainout processes in sequential rain samples. *Atmospheric Environment* 190, 53–64.
- Bodor, K., Bodor, Z., Szep, R., 2020. The trend of trace elements (Cd, Ni, Pb) from PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols and its effect on human health in bucharest, Romania. *Rev. Chim* 71, 433–439.
- Boga, R., Bodor, Z., Bodor, K., Tonk, S., Deak, G., Pernyeszi, T., Nita, I.-A., 2019. The influence of evapotranspiration and wet deposition on the variations of PM₁₀ concentration in the ciuc basin. *Present environ. Sustain. Dev.* 13, 33–44.
- Bisht, D.S., Srivastava, A.K., Joshi, H., Ram, K., Singh, N., Naja, M., Srivastava, M.K., Tiwari, S., 2017. Chemical characterization of rainwater at a high-altitude site “Nainital” in the central Himalayas, India. *Environ Sci Pollut Res* 24, 3959–3969.
- Bravo, A.H., Soto, A.R., Sosa, E.R., Sanchez, A.P., Alarcon, J.A.L., Kahl, J., Ruiz, B., 2006. Effect of acid rain on building materials of the El Tajin archaeological zone in Veracruz, Mexico. *Environ Pollut* 144, 655–660.
- Budhavant, K.B., Rao, P.S.P., Safai, P.D., Leck, C., Rodhe, H., 2016. Black carbon in cloudwater and rain water during monsoon season at a high altitude station in India. *Atmos Environ* 129, 256–264.
- Cerqueira, B., Vega, F.A., Silva, L.F.O., Andrade, L., 2012. Effects of vegetation on chemical and mineralogical characteristics of soils developed on a decantation bank from a copper mine. *Sci Total Environ* 421-422, 220–229.
- Charlson, R.J., Rodhe, H., 1982. Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature* 295, 683–685.
- Dias, C.L., Oliveira, M.L.S., Hower, J.C., Taffarel, S.R., Kautzmann, R.M., Silva, L.F.O., 2014. Nanominerals and ultrafine particles from coal fires from Santa Catarina, South Brazil. *Int J Coal Geol* 122: 50–60.
- Flues, M., Hama, P., Lemes, M.J.L., Dantas, E.S.K., Fornaro, A., 2002. Evaluation of the rainwater acidity of a rural region due to a coal-fired power plant in Brazil. *Atmos Environ* 36, 2397–2404.
- Garcia, K.O., Teixeira, E.C., Agudelo-Castaneda, D.M., Braga, M., Alabarse, P.G., Wiegand, F., Kautzmann, R.M., Silva, L.F.O., 2014. Assessment of nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons in PM₁ near an area of heavy-duty traffic. *Sci Total Environ* 479-480, 57–65.
- Gromping, A.H.J., Ostapczuk, P., Emons, H., 1997. Wet deposition in Germany: long-term trends and the contribution of heavy metals. *Chemosphere* 34, 2227–2236.
- Herut, B., Starinsky, A., Katz, A., Rosenfeld, D., 2000. Relationship between the acidity and chemical composition of rainwater and climatological conditions along a transition zone between large deserts and Mediterranean climate, Israel *Atmos Environ* 34, 1281–1292.
- Hower, J.C., O’Keefe, J.M.K., Henke, K.R., Wagner, N.J., Copley, G., Blake, D.R., Garrison, T., Oliveira, M.L.S., Kautzmann, R.M., Silva, L.F.O., 2013. Gaseous emissions and sublimates from the Truman Shepherd coal fire, Floyd County, Kentucky: A re-investigation following attempted mitigation of the fire. *In: J Coal Geol* 116: 63–74.
- Hu, G.P., Balasubramanian, R., Wu, C.D., 2003. Chemical characterization of rainwater at Singapore. *Chemosphere* 51, 747–755.
- Kajino, M., Aikawa, M., 2015. A model validation study of the washout/rainout contribution of sulfate and nitrate in wet deposition compared with precipitation chemistry data in Japan. *Atmos Environ* 117, 124–134.
- Keresztesi, Á., Korodi, A., Boga, R., Petres, S., Ghita, G., Ilie, M., 2017. Chemical characteristics of wet precipitation in the Eastern Carpathians. *Romania Ecoterra* 14, 52–59.
- Keresztesi, Á., Nita, I.A., Marius-Victor, Birsan, R.B., Bodor, Z., Szep, R., 2020. Spatial and long-term analysis of rainwater chemistry over the conterminous United States, *Environ Research* 188, 109872.
- Keresztesi, Á., Birsan, M.-V., Nita, I.-A., Bodor, Z., Szep, R., 2019a. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017. *Environ. Sci. Eur.* 31 (50).
- Keresztesi, Á., Boga, R., Bodor, Z., Bodor, K., Tonk, S., Deak, G., Nita, I.-A., 2019b. The analysis of the chemical composition of precipitation during the driest year from the last decade. *Present environ. Sustain. Dev.* 13, 19–32.
- Khan, M.N., Sarwar, A., 2014. Chemical composition of wet precipitation of air pollutants: a case study in Karachi, Pakistan. *Atmosfera* 27, 35–46.
- Kilic, S., Yenisoý-Karakaş, S., Kilic, M., 2015. Metal Contamination in Fruit Juices in Turkey Method Validation and Uncertainty Budget. *Food Anal Met.* 8(10), 2487–2495.
- Kilic, S., Kilic, M., 2019. Determination of Trace Elements and Human Health Risk Assessment in Bottled Spring Water: Method Validation, *Atomic Spec* 0195, 5373.
- Knote, C., Hodzic, A., Jimenez, J.L., 2015. The effect of dry and wet deposition of condensable vapors on secondary organic aerosols concentrations over the continental US. *Atmos Chem Phys* 15, 1–18.
- Kopáček, J., Hejzlar, J., Krám, P., Oulehle, F., Posch, M., 2016. Effect of industrial dust on precipitation chemistry in the Czech Republic (Central Europe) from 1850 to 2013. *Water Res* 103, 30–37.
- Kronbauer, M.A., Izquierdo, M., Dai, S., Waanders, F.B., Wagner, N.J., Mastalerz, M., Hower, J.C., Oliveira, M.L.S., Taffarel, S.R., Bizani, D., Silva, L.F.O., 2013. Geochemistry of ultra-fine and nano-compounds in coal gasification ashes: a synoptic view. *Sci Total Environ* 456-457, 95–103.
- Kulshrestha, U.C., Kulshrestha, M.J., Sekar, R., Sastry, G.S.R., Vairamani, M., 2003. Chemical characteristics of rainwater at an urban site of south-central India. *Atmos Environ* 37, 3019–3026.
- Lu, X., Li, L.Y., Li, N., Yang, G., Luo, D., Chen, J., 2011. Chemical characteristics of spring rainwater of Xi’an city, NW China. *Atmos Environ Times* 45, 5058–5063.
- Martinello, K., Oliveira, M.L.S., Molossi, F.A., Ramos, C.G., Teixeira, E.C., Kautzmann, R.M., Silva, L.F.O., 2014. Direct identification of hazardous elements in ultra-fine and nanominerals from coal fly ash produced during diesel co-firing. *Sci Total Environ* 470-471, 444–452.

- Morillas, H., Marcaida, I., Magureguib, M., Carrero, J.A., Madariaga, J.M., 2016. The influence of rainwater composition on the conservation state of cementitious building materials, *Sci Total Environ* 542, 716–727
- Nieberding, F., Breuer, B., Braeckvelt, E., Klemm, O., Song, Q., Zhang, Y., 2018. Fog water chemical composition on ailaoshan mountain, Yunnan province, SW China. *Aerosol Air Qual Res* 18, 37–48.
- Niu, H., Kang, S., Wang, H., Du, J., Pu, T., Zhang, G., Lu, X., Yan, X., Wang, S., Shi, X., 2020. Light-absorbing impurities accelerating glacial melting in southeastern Tibetan Plateau. *Environ. Pollut.* 257 (113541)
- Niu, H., Kang, S., Wang, H., Zhang, R., Lu, X., Qian, Y., Paudyal, R., Wang, S., Shi, X., Yan, X., 2018. Seasonal variation and light absorption property of carbonaceous aerosol in a typical glacier region of the southeastern Tibetan Plateau. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 6441–6460.
- Norela, S., Saidah, M.S., Mahmud, M., 2013. Chemical composition of the haze in Malaysia 2005. *Atmos Environ* 77, 1005–1010.
- Oduber, F., Calvo Al Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Barata, J., Nunes, T., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Cerqueira, M., Martín-Villacorta, J., Esteves, V., Fraile, R., 2020. Chemical composition of rainwater under two events of aerosol transport: A Saharan dust outbreak and wildfires. *Sci Total Environment* 734, 139202.
- Ostapczuk, P., Pobozy, E., Baade, A., Emons, H., 2002. Ion-chromatographic monitoring of main components of rain water in industrial and rural sites in Germany. *Fresenius Environ Bull* 11, 326–331.
- Possanzini, M., Buttini, P., Dipalo, V., 1988. Characterization of a rural area in terms of dry and wet deposition. *Sci Total Environ* 74, 111–120.
- Pu, W., Quan, W., Ma, Z., Shi, X., Zhao, X., Zhang, L., Wang, Z., Wang, W., 2017. Long-term trend of chemical composition of atmospheric precipitation at a regional background station in Northern China. *Sci Total Environ* 580, 1340–1350.
- Rao, P.S.P., Tiwari, S., Matwale, J.L., Pervez, S., Tunved, P., Safai, P.D., Srivastava, A.K., Bisht, D.S., Singh, S., Hopke, P.K. 2016. Sources of chemical species in rainwater during monsoon and non-monsoon periods over two mega cities in India and dominant source region of secondary aerosols. *Atmos Environ* 146, 90–99.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Singh, A.K., Mondal, G.C., Kumar, S., Singh, K.K., Kamal, K.P., Sinha, A. 2007. Precipitation chemistry and occurrence of acid rain over Dhnabad, coal city of India. *Environ Monit Assess* 125 (1), 99–110.
- Singh, D.K., Gupta, T., 2017. Role of ammonium ion and transition metals in the formation of secondary organic aerosol and metallo-organic complex within fog processed ambient deliquescent submicron particles collected in central part of Indo-Gangetic Plain. *Chemosphere* 181,725–737.
- Szèp, R., Bodor, Z., Miklossy, I., Nița, I.A., Oprea, O.A., Keresztesi, A., 2019. Influence of peat fires on the rainwater chemistry in intra-mountain basins with specific atmospheric circulations (Eastern Carpathians, Romania). *Sci. Total Environ.* 647, 275–289.
- Szèp, R., Mateescu, E., Nița, I.A., Birsan, M.V., Bodor, Z., Keresztesi, A., 2018. Effects of the Eastern Carpathians on atmospheric circulations and precipitation chemistry from 2006 to 2016 at four monitoring stations (Eastern Carpathians, Romania). *Atmos. Res.* 214, 311–328.
- Taverniers, I., De Loose, M., Bockstaele, E.V., 2004. Trends in quality in the analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance. *Trends Anal Chem* 23(8), 535–552.
- Tiwari, S., Hopke, P.K., Thimmaiah, D., Dumka, U.C., Srivastava, A.K., Bisht, D.S., Rao, P.S.P., Chate, D.M., Srivastava, M.K., Tripathi, S.N., 2016. Nature and sources of ionic species in precipitation across the indo-gangetic plains, India. *Aerosol Air Qual Res* 16, 943–957.
- Walna, B., 2015. Human impact on atmospheric precipitation in a protected area in Western Poland. Results of long-term observations: concentrations, deposition and trends. *Atmos Pollut Res* 6, 778–787.
- Wang, H., Han, G., 2011. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in Chengdu, Southwest China. *Atmos Res* 99, 190–196.
- White, E.M., Matthew, S.L., Gerald, J.K., James, A.B., 2013. Investigation of mercury wet deposition physicochemistry in the Ohio River Valley through automated sequential sampling. *Sci Total Environ* 448, 107–119.
- Wright, R.F., Jenkins, A., 2010. Climate change as a confounding factor in reversibility of acidification: RAIN and CLIMEX projects. *Hydrol Earth Syst Sci* 5, 477–486.
- Xing, J., Song, J., Yuan, H., Li, X., Li, N., Duan, L., Qu, B., Wang, Q., Kang, X., 2017. Chemical characteristics, deposition fluxes and source apportionment of precipitation components in the Jiaozhou Bay, North China. *Atmos Res* 190, 10–20.
- Xu, Z., Wu, Y., Liu, W.J., Liang, C.S., Ji, J., Zhao, T., Zhang, X., 2015. Chemical composition of rainwater and the acid neutralizing effect at Beijing and Chizhou city, China *Atmos Res* 164, 278–285.
- Zhang, Y.L., Lee, X.Q., Cao, F., Huang, D.K., 2011. Seasonal Variation and Sources of Low Molecular Weight Organic Acids in Precipitation in The Rural Area of Anshun. *Chin Sci Bull*, 56, 1005–1010.



CO₂ DERİŞİMİNİN VE AZOT STRESİNİN CHLORELLA VULGARİS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA VERİMİNE ETKİSİ

Gamze AKGÜL, Murat VAROL*, Ayça ERDEM ÜNŞAR

Akdeniz Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 07058, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

CO₂ Tutma,
Mikroalg,
Baca Gazı,
Azot Stresi,
Biyodizel.

Öz

Baca gazındaki CO₂ gazının mikroalglerle tutulması küresel ısınmayla mücadele bakımından önemlidir. Bu çalışmada; farklı CO₂ derişimlerinin (hacimce 400 ppm, %15 ve %90) ve azot stresinin *Chlorella vulgaris* mikroalg kültürünün CO₂ tutma verimine etkisi incelenmiştir. Çalışmada, 5 cm iç çapa sahip, 100 cm yüksekliğinde pleksiglastan yapılmış fotobiyoreaktör kullanılmıştır. CO₂ tutma verimi açısından en iyi sonucu veren CO₂ derişimi belirlenmiş ve bu şartlar altında, mikroalg kültürü azot stresine maruz bırakılarak bünyesindeki lipit oranının nasıl değiştiği incelenmiştir. Mikroalg kültürü için en iyi büyüme değerleri %15 CO₂ içeren gaz karışımı altında elde edilmiştir. Fotobiyoreaktöre verilen gaz karışımındaki CO₂ oranı %90'a çıkarıldığında alg hücrelerinin inhibe olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek CO₂ derişimlerinde ortamın tamponlanması ve ortama verilen CO₂ derişiminin kademeli olarak artırılması gerekmektedir. %15 CO₂ derişiminde %100 azot stresinde fotobiyoreaktörde büyüme gerçekleşmemiştir. Bu nedenle azot stresi (%100 ve %75) deneylerine erlenmeyerde 400 ppm_v CO₂ derişimi altında devam edilmiştir. %75 azotsuz ortamda %100 azotsuz ortama göre 1,3 kat daha iyi büyüme verimi elde edilmiştir. Ayrıca, %75 azotsuz deneyde %100 azotsuz ortama göre 2,5 kat daha yüksek RuBisCO oranı belirlenmiştir. %100 azotsuz deneyde ise %75 azotsuz ortama göre 1,2 kat daha yüksek lipit oranı elde edilmiştir.

EFFECT OF CO₂ CONCENTRATION AND NITROGEN STRESS ON CO₂ CAPTURE EFFICIENCY OF CHLORELLA VULGARIS MICROALGAE CULTURE

Keywords

CO₂ Capture,
Microalgae,
Flue Gas,
Nitrogen Stress,
Biodiesel.

Abstract

CO₂ capture in the flue gas by microalgae is important in terms of global warming. The effect of CO₂ concentration and nitrogen stress on CO₂ capture efficiency of *Chlorella vulgaris* microalgae culture in this study. A photobioreactor with 5 cm inner diameter and 100 cm height was used for the tests. CO₂ concentration that gives the best results in terms of CO₂ capture efficiency was determined and under this condition, microalgae culture was exposed to nitrogen stress and the lipid ratio in its structure was examined. The maximum growth was achieved at 15% CO₂. The growth was hindered when CO₂ was increased to 90%. At high CO₂, the medium should be buffered and CO₂ should be gradually increased. The growth was inhibited at 15% CO₂ under nitrogen stress in the photobioreactor. Therefore, nitrogen stress tests (100% ve 75%) were conducted in an erlenmeyer flask at 400 ppm_v CO₂. It was determined that there was a better growth under 75% nitrogen stress (1.3 times higher) compared to 100% nitrogen stress. Moreover, RuBisCO for 75% nitrogen stress was 2.5 times higher than %100 nitrogen stress. However, lipid content was 1.2 times higher for 100% nitrogen stress compared to the 75% nitrogen stress.

Alıntı / Cite

Akgül, G., Varol, M., Erdem-Ünşar, A. (2022). CO₂ Derişiminin ve Azot Stresinin *Chlorella Vulgaris* Mikroalg Kültürünün CO₂ Tutma Verimine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 698-721.

* İlgili yazar / Corresponding author: mvarol@akdeniz.edu.tr, +90-242-310-6332

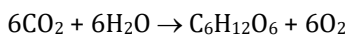
| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| G. Akgül, 0000-0003-0119-6845 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 14.11.2021 |
| M. Varol, 0000-0002-4869-3315 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 09.12.2021 |
| A. Erdem Ünşar, 0000-0003-3296-1247 | Kabul Tarihi / Accepted Date | 17.12.2021 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Dünya enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmı fosil yakıtlardan sağlanmakta ve bunun sonucunda atmosfere başta CO₂ olmak üzere birçok kirlenici gaz salınmaktadır. CO₂ emisyonlarının yaklaşık olarak %85'i fosil yakıtların kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Menteşe ve Çotuker, 2021). Sera gazları arasında CO₂, atmosferdeki derişimi insan faaliyetleri sonucu en çok artan gazdır. 1980 yılında 340 ppm düzeyinde olan atmosferdeki küresel CO₂ derişimi, Haziran 2021 itibarıyla 419,05 ppm seviyelerine çıkmıştır (NOAA 2021). Dünya genelinde fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları 1973 yılında 15,5 Giga ton (Gt) iken 46 yıllık bir zaman diliminde %100'ün üzerinde bir artışla 2018 yılında 35 Gt'a ulaşmıştır (IEA 2017). Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonları (CO₂ eşdeğeri-2019 yılı) 506,1 Milyon ton'dur (TÜİK 2021). Bu emisyonların %72'si enerji sektöründen kaynaklanmakta, CO₂ ise toplam sera gazı emisyonlarının %78,9'unu oluşturmaktadır (TÜİK 2021). Ülke özelinde olmakla birlikte küresel anlamda da, gelecek nesillere sağlıklı ve yaşanabilir bir dünya bırakmak adına içinde yaşadığımız yüzyılın en önemli konusu atmosfere verilen başta CO₂ olmak üzere küresel ısınmaya neden olan sera gazlarıdır. Gerek nüfus artışı gerekse refah düzeyindeki artış özellikle ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacını arttırmaktadır. Enerji talebindeki artışa rağmen sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik stratejilerin ve teknolojilerin geliştirilmesi küresel ısınma ile mücadelede hayati bir önem taşımaktadır. CO₂ emisyonlarının azaltılması küresel ısınmanın etkilerinin asgari düzeyde tutulması için oldukça önemlidir. Bu durum, mevcut tesislerden kaynaklanan ya da yeni kurulacak tesislerden kaynaklanacak olan CO₂ emisyonlarını azaltmak için gelecek vadeden teknolojilerin kullanılmasını zaruri kılmaktadır.

Atmofere verilen CO₂ emisyonlarının azaltılması için 3 temel seçenek mevcuttur. Bunlardan ilki enerjinin verimli kullanılması, ikincisi enerji üretiminde fosil yakıtlar yerine alternatif ve yenilenebilir kaynakların tercih edilmesi, üçüncü seçenek ise baca gazında CO₂ gazını tutacak ve ayrıştırarak teknolojilerin geliştirilmesidir. Baca gazındaki CO₂ emisyonlarının azaltılmasını amaçlayan stratejilerden birisi Karbon Tutma ve Depolama (KTD) teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasıdır (Míguez vd. 2018). KTD teknolojileri, güç santralleri ve endüstriyel tesisler gibi noktasal kaynaklardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynayabilir. CO₂ gazının baca gazından ayrıştırılması; soğurma (absorption), bir yüzey üzerinde tutma (adsorption), membrane filtre ile ayırma (membrane separation), kriyojenik damıtma (cryogenic distillation) ve biyolojik olarak tutma (mikroalglerin kullanımı) gibi uygulamaları içermektedir (Míguez vd. 2018).

Biyolojik olarak baca gazındaki CO₂ gazını tutma uygulamalarında mikroalglerin kullanılması biyoyakıt üretimi yönünden yeni bir yöntemdir. Özellikle biyodizel ve biyoetanol gibi biyoyakıtların üretiminde, diğer kaynaklara kıyasla mikroalgler daha dikkat çekici bir konumdadır. Günümüzde kullanılan biyoyakıt üretim yöntemlerinin, yüksek miktarda arazi alanlarına ihtiyaç duymasının yanısıra tarımsal yönden kullanılmayan arazilerde bile alg üretim tesislerinin kurulma imkanının olması ve tarımsal üretimin engellenmemesi mikroalgleri bu konuda benzersiz bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır (Ullah vd. 2014). Mikroalgler, doğal su kaynaklarında ya da tuzlu sularda yaşayabilen tek hücreli ve klorofil içeren canlılardır. Kökleri, gövdeleri ve yaprakları yoktur. Mikroalgler, fotoototrof beslenme yoluyla atmosferdeki CO₂ gazını enerji kaynağı olarak kullanırlar. Fotosentez, klorofil içeren organizmaların besin ihtiyaçlarını karşılamak için güneş ışığını kullanarak CO₂ ve H₂O gibi inorganik bileşiklerden organik bileşiklerin üretilmesi olayıdır (Tepkime 1). Fotosentez yoluyla organizmalar güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürürken, CO₂ gazını da bünyelerine dahil ederek atmosferden uzaklaştırırlar. Bu prensipten yola çıkarak, baca gazının doğrudan klorofil içeren organizmalara verilmesiyle baca gazındaki CO₂ gazının uzaklaştırılması mümkündür. Fakat karasal bitkiler tarafından gerçekleştirilen fotosentez yoluyla CO₂ gazının bacadan uzaklaştırılması işlemi oldukça yavaştır, çünkü karasal bitkilerin fotosentez için güneş enerjisini kullanabilme verimliliği sadece %0,2 civarındadır (Nakamura vd. 2003). Mikroalgler ve fotosentez yapabilen bakteriler (cyanobacteria) yüksek büyüme hızları nedeniyle karasal bitkilere oranla atmosferdeki karbonu bünyelerine daha hızlı alabilmektedirler (Goli vd. 2016). Birçok mikroalg bünyesinde karbonik anhidraz enzimi barındırır. Bu enzim, yavaş bir tepkime olan CO₂ gazının bikarbonata (HCO₃⁻) dönüşümü tepkimesini hızlandırır (Míguez vd. 2018). Bu sayede, güneş enerjisini kullanabilme verimliliği dış ortamda bulunan bazı mikroalgler için %5'lere kadar çıkabilmektedir (Nakamura vd. 2003).



(Tepkime 1)

Besin ihtiyacının ve ışık gereksiniminin kapalı sistemlerde sağlandığı kontrollü şartlarda (fotobiyoreaktörlerde) mikroalglerin CO₂ gazını tutma oranının bir ağaca göre 10 kat daha fazla olduğu belirtilmektedir (Usui ve

Ikenouchi 1997). Mikroalg kütlelerinin yaklaşık olarak %50'si (kuru bazda) karbondur. Mikroalg kütleindeki karbonun tamamı atmosfer kaynaklı olmak üzere CO₂ gazından gelmektedir. 100 kg mikroalg üretimi esnasında atmosferden yaklaşık 183 kg CO₂ gazı uzaklaştırılabilmektedir (Chisti 2007).

2. Kaynak araştırması (Literature survey)

Literatürde farklı CO₂ derişimine sahip gaz karışımlarının kullanıldığı mikroalg kültürleri kullanılarak gerçekleştirilen CO₂ giderimi çalışmaları mevcuttur. Morais ve Costa (2007) bir güç santralinin atık havuzundan izole ettikleri iki mikroalg türünün (*Scenedesmus obliquus* ve *C. vulgaris* kessleri) farklı CO₂ derişimindeki (%6, 12 ve 18) büyüme davranışlarını araştırmışlardır. Chiu vd. (2011) bir çelik fabrikasının baca gazı (%25 CO₂ içeren) ile yüksek sıcaklığa ve yüksek CO₂ gazına toleransı fazla olan bir *C. vulgaris* türü (*C. vulgaris* sp. MTF-7) yetiştirmişler, türün CO₂, SO₂ ve NO giderimini incelemişlerdir. Taştan vd. (2013) çalışmalarında bir siyanobakteri (*Phormidium* sp.) ve bir mikroalg (*C. vulgaris* sp.) kültürlerinin egzoz emisyonuna maruz bırakıldığında, TRIA ve salisilik asit kimyasallarının kültürlerin büyüme oranlarına nasıl etki ettiğini incelenmiştir. Taştan vd. (2016) *C. vulgaris* sp. kültürünün TRIA ve NaHCO₃ kullanılarak büyüme veriminin iyileştirilmesi üzerine bir inceleme yapmışlardır. Aslam vd. (2017) kömür yakan bir termik santralin %11 CO₂ içeren baca gazını doğrudan karışık bir mikroalg kültürüne vererek, kültürün adaptasyonunu incelemişlerdir. Sadeghizadeh vd. (2017) bir fotobiyoreaktörde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalg kültürünün farklı gaz hızlarında havadan CO₂ tutması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Dukarte vd. (2017), mikroalg *Chlorella fusca* LEB 111'i %10-12 CO₂ derişimi altında yetiştirmişlerdir. Sistemde gaz akış hızı 0,05 vvm (vvm: sisteme verilen toplam gaz debisinin çözelti hacmine oranı) olarak ayarlanmıştır. Kömür baca gazı biyofiksasyonundan elde edilen maksimum günlük CO₂ tutma verimi ve spesifik büyüme oranı, sırasıyla, 360,12±0,27 mg L⁻¹ gün⁻¹ ve 0,17 ±0,01 gün⁻¹ olarak rapor edilmiştir. García-Cubero vd. (2017), çalışmalarında *C. vulgaris* UAM 9-88 suşunu %1, 3, 6, 8, 10 ve 12 CO₂ içeren baa gazında yetiştirmişlerdir. Fotobiyoreaktör yüzeyindeki aydınlatma şiddeti maksimum 3000 µmol m⁻² s⁻¹ (222 000 lux) olarak ölçülmüş ve 12 saat aydınlık/12 saat karanlık aydınlatma süresinde deneyler gerçekleştirilmiştir. pH'ın sabitlenmediği %1 ile %10 CO₂ derişimlerinin tümünde kararlı bir duruma ulaşılmış ve kültürlerden 0,4-0,5 g L⁻¹ gün⁻¹ aralığında biyokütle değerleri elde edilmiştir. CO₂ tutma veriminin 0,8-1 g L⁻¹ gün⁻¹ olduğu belirlenmiştir. %12 CO₂ derişimlerinde yapılan deneylerde büyüme inhibe olmuştur. %1 ile %10 CO₂ derişimlerinde elde edilen biyokütleden ≥%40 oranlarında protein ve ≥%25 oranında lipit bileşimleri elde edilmiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda ortam havası (400 ppm_v CO₂) ya da geleneksel baca gazı (%10-15 CO₂ içeren baca gazı) başta olmak üzere %0,04-25 aralığında CO₂ içeren gaz karışımlarının araştırıldığı görülmüştür. Ancak, yüksek oranda CO₂ içeren Oksi-Yanma şartlarının (%90 CO₂ içeren baca gazı) denendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Mikroalglerin fotosentez verimleri, dolayısıyla büyüme hızları yüksektir. Ayrıca ürettiği lipit miktarı nedeniyle de biyodizel eldesi için alternatif bir yakıt olarak görülmektedir (Ahmad vd. 2011; Chen vd. 2011, Mata vd. 2010). Mikroalglerin ürettikleri lipitlerin kimyasal yapıları bitkisel yağların kimyasal yapılarına benzemektedir. Bu benzerlik biyodizel yönünden alternatif bir kaynak olarak görülmektedir. Biyodizelin yanması sonucunda meydana gelen CO₂ yine biyodizelin elde edildiği mikroalgler tarafından tekrar kullanılma avantajına sahiptir. Bu önemli avantajın etkisiyle, atık oluşumunda ciddi oranda azalma olmakta ve üretilen biyodizelin sürdürülebilir enerji kaynağı yönünden çevre dostu ve alternatif bir enerji kaynağı olduğu ortaya çıkmaktadır (Öğüt ve Oğuz 2006). Mikroalg kaynaklı lipitlerden biyodizel üretimi, gelecekte petrol kaynaklı yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif oluşturduğu için enerji üretiminde önemli bir yer tutma potansiyeline sahiptir. Biyodizel, dizel bir yakıtı göre, yandığında %78 daha az CO₂, %98 daha az SO₂ ve %50 daha az parçacık madde emisyonları oluşmaktadır (Brown ve Zeiler 1993). Düşük emisyonları nedeniyle biyodizel kullanımı sürdürülebilir çevre bakımından önemli bir seçenek olarak görülmektedir (Yıldız ve Çalışkan, 2020). Lipit ihtivası mikroalg türüne göre çeşitlilik göstermekle birlikte, stres şartlarında belirli türlerde lipit değeri %90 seviyesine çıkabilmektedir (Amaro vd. 2011).

Mikroalg gelişimi açısından azot, karbondan sonra biyokütle üretimini artırma yönünden en önemli ikinci besin kaynağı olarak görülmektedir. Biyokütlenin yaklaşık olarak %10'undan fazlası azottan oluşabilmektedir. Mikroalglerde lipit birikimi genellikle mikroalgler stres koşulları altında (örneğin azot sınırlaması/azot açlığı/azot azlığı (azot stresi), besin eksikliği, pH varyasyonları, vb.) yetiştirildiğinde meydana gelir. Bu stres koşulları arasında azot stresi, mikroalglerde lipit birikimini arttırmak için en etkili ve yaygın olarak kullanılan bir stratejidir. Kültür ortamında oluşturulan azot stresi nedeniyle biyokütle üretiminde azalma olurken, lipit üretiminde artış gerçekleşmektedir (Yaakob vd. 2021). Stres ortamında bu artışın temel sebebi; çoğunlukla mikroalg hücrelerinde depolama molekülleri olarak görev yapan triasilgliserol (TAG) birikiminin gerçekleşmesidir (Miranda vd. 2015).

C. vulgaris mikroalgi oldukça yüksek oranda klorofil pigmenti içermektedir. Her bir klorofil molekülünün yapısında 4 azot atomu içeren, azot yönünden zengin bir bileşik bulunmaktadır. Kültür ortamında azot tükendiğinde ya da alg yetiştirme öncesinde besiyerindeki azot kaynağı azaltıldığında, alg kültüründe azot stresi meydana gelir. Alg hücreleri, hücre bölünmelerini sağlayabilmeleri için azota ihtiyaç duyarlar. Azot stresi yaşanan

ortamda büyüyebilmek için, mikroalgler yapılarında bulunan azot havuzunu (klorofil molekülündeki azotları) tüketmeye başlarlar. Yapılarındaki azotu kullandıkça, fotosentez sonucunda protein yerine lipid üretimi gerçekleşir. Bu strese uyum gösterme özellikleri, lipid üretiminin temel işlevini oluşturmaktadır (Li vd. 2008).

Baca gazından CO₂ gazının mikroalg kullanılarak, biyolojik olarak uzaklaştırılmasında elde edilecek verim; kullanılan mikroalg kültürü, reaktör tipi (açık havuz, fotobiyoreaktör), CO₂ gazı derişimi, gaz akış hızı, aydınlatma şiddeti, pH, sıcaklık, besiyeri gibi farklı parametrelere bağlıdır (Sadeghizadeh vd. 2017). Baca gazından CO₂ gazının uzaklaştırılması için farklı alg türleri kullanılmıştır. Alg türleri arasında *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) yüksek CO₂ derişimlerini tolere edebilme ve yüksek büyüme hızı gibi özellikleri nedeniyle CO₂ tutmak için kullanılabilir iyi bir tür olarak görülmektedir (Sadeghizadeh vd. 2017). *C. vulgaris*, *Chlorella* türleri (*C. vulgaris* sp. H84, *C. vulgaris* sp. A2, *C. vulgaris* sorokiniana UTEX 1230, *C. vulgaris* ve *Pyrenoidosa*) arasında en yüksek büyüme oranı göstermiştir (Jeong vd. 2003). *C. vulgaris* mikroalginin sadece klorofil-a ve klorofil-b içermesi, fotosentez sonucunda yapısında çoklu doymuş lipid asitlerini biriktirmesini sağlamaktadır. Biyodizel üretiminde doymamış yağlar, yağlanma ortamına ilave edilerek ortamın polimerizasyonu arttırdığı için motoru tahrip edip, viskoziteyi arttırıcı etki yaratmaktadır (Yusuf vd. 2011). Bu durumun önlenmesi açısından ise doymamış yağların doymun hale getirilmesi gerekir, ki bu da oldukça maliyetli bir işlemdir. Bu nedenlerden dolayı *C. vulgaris*'ten elde edilen doymuş lipid asitleri hem maliyet hem de verim açısından avantajlı bir biyodizel kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, çalışmada mikroalg olarak *C. vulgaris* kullanılmasına karar verilmiştir.

Çalışmada dikey bir fotobiyoreaktörde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalg kültürünün CO₂ tutma veriminin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında CO₂ gazı derişiminin (hacimce 400 ppm, %15 ve %90) *C. vulgaris* mikroalg kültürünün büyüme verimine etkisinin incelenmesi ve kültürün büyüme verimi bakımından en iyi değerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Büyüme verimi bakımından en iyi sonuçları veren değışken parametre şartlarında *C. vulgaris* mikroalg kültürü azot stresine maruz bırakılarak azot stresinin lipid üretimine etkisinin incelenmesi de çalışmanın bir diğere hedefidir. Bu kapsamda, her bir deney için fotobiyoreaktörden 24 saatte bir numune alınmıştır. Alınan numunelerde pH, sıcaklık, optik yoğunluk, kuru ağırlık (g/L), klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid ölçümleri yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde her bir deney için mikroalg üreme verimliliği (P_t, g (kuru ağırlık)/L/gün), maksimum spesifik büyüme oranı, (μ_{max} , 1/gün) ve CO₂ tutma verimi (R_{CO2}, g CO₂/L/gün) hesaplanmıştır.

3. Materyal ve metot (Material and method)

3.1. Mikroalg Kültürü ve Yetiştirme Koşulları (Microalgae Culture and Growth Conditions)

Çalışmada kullanılan *C. vulgaris* alg kültürleri, Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden temin edilmiştir. Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü alg kültürünü, Texas Üniversitesi Alg Kültür Koleksiyonundan (UTEX 2019) satın almaktadır.

3.1.1. Besiyeri (Growth medium)

Mikroalg kültürünü yetiştirmek için içeriği Tablo 1'de verilen besiyeri kullanılmıştır (Bogless 2014). Bu besiyeri, Bold's Basal Medium (BBM) olarak adlandırılmaktadır ve ilk olarak 1963 yılında Bischoff ve Bold (Bischoff ve Bold 1963) tarafından oluşturulmuştur. BBM besiyeri hazırlamak için 1 nolu stok çözeltisinden 10 mL; 2, 3, 4 ve 5 nolu stok çözeltilerinin her birinden 1 mL alınır ve toplam hacim 1 L'ye distile su ile tamamlanır (Bogless 2014). Besiyeri bu oranlarda hazırlandığında alg büyümesinin yavaş olduğu görülmüştür. Bu nedenle, 1 L besiyeri hazırlamak için stok çözeltilerden alınan miktarlar 2 katına çıkarılmıştır. 1 nolu stok çözeltisinden 20 ml, 2, 3, 4 ve 5 nolu stok çözeltilerinin her birinden 2 mL alınmış ve toplam hacim 1 L'ye distile su ile tamamlanarak besiyeri hazırlanmıştır. İyi netice alındığı görülmüş ve bu oranlarla alg üretimine devam edilmiştir. Hazırlanan sıvı besiyeri, 1 L'lik şişelerin yarısı kadar (yaklaşık 500 mL) doldurularak, ağızları kapakla kapatılmadan sadece alüminyum folyo ile kapatılıp, 1 atmosfer basınçta, 121 °C'de sterilizasyon işlemi için otoklava (Hirayama Hv50-L) konur. Otoklavlama sonrasında 1 gün boyunca besiyeri soğumaya bırakılıp, sterilizasyonu tamamlanan besiyeri kullanım için karanlık ortamda oda sıcaklığında muhafaza edilmek üzere, kapalı bir dolap içerisine ağzına otoklavlanmış kapak kapatılarak kullanıma hazır halde bekletilir.

Tablo 1. Alg kültürü için hazırlanan Bolds Basal Besiyeri (1 L) içeriği (Bogless 2014) (Bolds Basal Medium (1 L) for the algal culture (Bogless 2014))

| Stok 1: (20 mL) | Stok 2: (2 mL) | Stok 3: (2 mL) | Stok 4: (2 mL) | Stok 5: (2 mL) |
|--|---------------------|---|--|---|
| 25 g/L NaNO ₃ | 50 g/L EDTA anhidro | 4,98 g/L FeSO ₄ .7H ₂ O | 11,42 g/L H ₃ BO ₃ | 8,82 g/L ZnSO ₄ .H ₂ O |
| 2,5 g/L CaCl ₂ .2H ₂ O | 31 g/L KOH | 1,0 mL H ₂ SO ₄ | | 1,44 g/L MnCl ₂ .4H ₂ O |
| 7,5 g/L MgSO ₄ .7H ₂ O | | | | 0,71 g/L MoO ₃ |
| 7,5 g/L K ₂ HPO ₄ | | | | 1,57 g/L CuSO ₄ .5H ₂ O |
| 17,5 g/L KH ₂ PO ₄ | | | | 0,49 g/L Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O |
| 2,5 g/L NaCl | | | | |

3.1.2. *C. vulgaris* Mikroalg Kültürünün Çoğaltılması (Growth of *C. vulgaris* Microalgae Culture)

C. vulgaris alg kültürleri 1 000 mL'lik erlenmayerlere son hacimleri, büyümelerinde en önemli parametre olan hava almalarını sağlamak amacıyla, 500 mL olacak şekilde (50 mL alg kültürü ve 450 mL besiyeri) aktarılıp, 24 saat aydınlık (aydınlık şiddeti: yaklaşık 7 500 lux, ışık rengi: 4 300 K) ortamda erlenmayerlerin ağzı daha önceden otoklavda sterilizasyonu yapılan pamuk tıkaçlarla kapatılarak, 27±1 °C sıcaklıkta orbital çalkalayıcı üzerinde sürekli olarak 80 rpm'de karıştırılarak inkübe edilmiştir. Gün içerisinde orbital çalkalayıcı haricinde 2-3 defa elle çalkalama yapılması alg üretimini hızlandırmada etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, gün içinde 2-3 defa pamuk tıkaçlar açılıp kapatılarak alglerin hava alması sağlanmıştır. Ortalama 4 gün sonunda istenilen popülasyon yoğunluğuna (yaklaşık 10⁴ hücre/mL) ulaşıldıktan sonra fotobiyoreaktöre aktarılmış ve CO₂ gazı tutma çalışmaları başlatılmıştır. Alg üretiminin sürekliliği, 2 günde bir spektrofotometrede (HACH Lange DR 6000 UV-Vis Spectrophotometer) yapılan optik yoğunluk (OD) okumalarına göre 684 nm (Rodrigues vd. 2011) ve 750 nm (Griffiths vd. 2011) dalga boyunda elde edilen veriler ile takip edilmiş, ölüm fazına geçişin başladığı OD değeri tespit edildiğinde erlenmayer içerisindeki hava payı azaltılmayacak şekilde besiyeri eklenip, tazeleme yapılarak büyüme fazında alg yetiştirmeye devam edilmiştir. Belli bir noktadan sonra besiyeri eklendikçe erlenmayer içerisinde hacim daraldığı için önce 2 L'lik (max. 1 L alg kültürü) daha sonra 4 L'lik şişelere (max. 2 L alg kültürü) alg kültürleri alınarak alg üretiminin sürdürülebilirliği sağlanmıştır. Yoğun alg üretimi olduğunda hacmi daha fazla büyütmemek adına fazla alg kültürü dökülerek, dökülen miktar kadar besiyeri eklenmiş ve alglerin ölüm fazından tekrar büyüme fazına geçişi sağlanıp, alg üretimi sürekliliği korunarak devam ettirilmiştir.

3.2. Laboratuvar-ölçekli fotobiyoreaktör (Lab-FBR) sistemi (Laboratory-scaled photobioreactor (Lab-FBR) system)

Proje kapsamında yapılan deneyler laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktör (Lab-FBR) sisteminde gerçekleştirilmiştir. Lab-FBR sistemi, iç hacmi 2 L olan 3 adet fotobiyoreaktörden oluşmaktadır. 2 L'lik hacmin 1,5 L'sinde mikroalg kültürünün olacağı sulu çözelti bulunmaktadır (çalışma hacmi 1,5 L). Bu tasarım için, 5 cm iç çapa sahip 101,9 cm yüksekliğinde pleksiglastan yapılmış fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Lab-FBR sisteminin genel görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Lab-FBR sisteminde gaz karışımını sağlamak için kullanılan 4 adet rotametre, sıcaklık kontrol sistemi ve ışık akısı ayarlama ünitesi bulunmaktadır. Sıcaklık kontrol sistemi, sıcaklık kontrol paneli, ısı kabloları ve sıcaklık ölçerlerden oluşmaktadır. Sıcaklık ölçer kolonun üst tarafına monte edilmiştir. Sıcaklık ölçer kolonun üstünden sarkıtılarak deney esnasında her zaman mikroalg kültürünün olduğu besiyeri içinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Kolon içindeki sulu çözeltiyi istenilen sıcaklıkta tutmak için kolonun dışına ısı kabloları sarılmıştır. Önce kolonun, ardından kolon içindeki sulu çözeltinin ısıtılması, mikroalglerin doğrudan ısı kaynağına maruz kalmaması için yapılmıştır. Sıcaklık ölçer, sulu çözelti sıcaklığını ölçmektedir. Sulu çözelti istenilen sıcaklığa gelene kadar ısı kabloları sistemi ısıtmaktadır. İstenilen sıcaklığa gelindiğinde ısı kablolarına verilen güç kesilmektedir. Bu işlemi yapan sıcaklık kontrol devreleri de kontrol panelinin içinde bulunmaktadır.



Şekil 1. Lab-FBR sisteminin genel görünümü (Pictures of the Lab-FBR system)

Lab-FBR sisteminin yanında CO₂, O₂, N₂ ve 400 ppm_v CO₂ içeren kuru hava tüpleri sisteme bağlı bir şekilde yer almaktadır. Sistemin sağ alt kısmında bulunan rotametreler aracılığıyla sisteme verilen gaz karışımı ve gaz debisi ayarlanabilmektedir. Sistemin sağ üst kısmında ışık akısını istenilen yoğunlukta ayarlamaya yarayan bölüm bulunmaktadır. Her bir fotobiyoreaktörün her iki yanında toplam ışık akısı 5 800 lm olan iki adet LED lamba kullanılmıştır. Lab-FBR sistemi otomatik aydınlatma sistemine sahiptir. Işık akısı istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Lab-FBR sistemindeki mikroalg kültürü günün farklı zaman dilimlerinde aydınlık ve karanlık evrelerde olmaktadır. Bunu sağlamak için sisteme aydınlatmayı otomatik açıp kapayabilen zaman ayarlı mekanik bir ekipman temin edilmiştir. Doğrudan prize takılabilen bu ekipman ile sistemin kaç saat ışığa maruz kalacağı ve kaç saat karanlıkta kalacağı otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Aydınlık/karanlık döngülerinde aydınlatma süreleri bu ekipman mekanik zaman saati ile ayarlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde farklı aydınlatma süreleri denenmektedir. Bazı durumlarda gündüz vaktinde mikroalglerin karanlık bir ortamda olmaları gerekmektedir. Bu karanlık ortamı sağlamak için Lab-FBR sistemi etrafına siyah, kalın kumaştan bir perde temin edilmiştir. Perde kapandığında sistem ortam ışığından tamamen arındırılmış olmaktadır.

Alg kültürü, büyüme için ihtiyaç duyduğu karbonu fotobiyoreaktöre verilen CO₂ gazından temin etmektedir. CO₂ gazının algler tarafından kullanılabilmesi için öncelikle CO₂ gazının suda çözünmesi gerekmektedir. CO₂ gazının gaz fazından sıvı faza transferinde gaz debisi, gazın fotobiyoreaktörde geçirdiği süre, gaz karışımındaki CO₂ derişimi ve sulu çözelti sıcaklığı gibi parametrelerin oldukça önemi vardır. Transferi mümkün kılabilmek adına gazın fotobiyoreaktörde geçirdiği süreyi uzun tutmak için gaz debisi 100 mL/dak olarak belirlenmiştir. Daha yüksek bir gaz debisi, gaz moleküllerinin fotobiyoreaktördeki alıkonma sürelerini kısaltacak, bu da gazdan sıvaya transferi azaltacaktır. Gazdan sıvıya transferi etkileyen bir diğer parametre de sıcaklıktır. *C. vulgaris* mikroalg kültürü ile ilgili laboratuvarında edinilen tecrübe bu alg kültürünün en iyi büyümeyi ortalama 28 °C sıcaklıkta sağladığını göstermektedir. Her ne kadar daha soğuk çözeltilerde gazdan sıvıya geçiş daha kolay olsa da alglerin büyüme şartlarının optimum düzeyde tutulması için fotobiyoreaktör içindeki sulu çözelti sıcaklığı kablolu ısıtıcı vasıtasıyla sürekli 28 °C sıcaklıkta tutulmuştur.

Çalışma hacmi için belirlenen mikroalg aşılama derişimi minimum 0,16 g (kuru ağırlık)/L'dir. Mikroalglerin CO₂ gazı tutma verimlerini belirlemek amacıyla fotobiyoreaktörlere üç farklı derişimde CO₂ gaz karışımı (400 ppm_v CO₂, %15 CO₂ gazı içeren CO₂+N₂+O₂ gaz karışımı ve %90 CO₂ gazı içeren CO₂+O₂ gaz karışımı) verilmiştir. 400 ppm_v CO₂ içeren gaz karışımı havayı temsil etmektedir. Bu gaz karışımı ile yapılacak olan deneyler (havadan CO₂ tutma/air capture) referans deneyler olarak değerlendirilecektir. Hacimce %15 CO₂ gazı içeren CO₂+N₂+O₂ gaz karışımı kömürle çalışan termik santrallerinden kaynaklanan baca gazı kompozisyonunu temsil etmektedir, karışımındaki O₂ gazı yüzdesi hacimce %3 olacaktır. Hacimce %90 CO₂ gazı içeren CO₂+O₂ gaz karışımı Oksi-Yanma teknolojisi kullanan ve kömürle çalışan termik santrallerinden kaynaklanan baca gazı kompozisyonunu temsil etmektedir. Gaz karışımı fotobiyoreaktörlerin alt kısmından verilmektedir. Her bir fotobiyoreaktöre verilecek gazı debisi 100 mL/dk olarak belirlenmiştir. Bu debi miktarı fotobiyoreaktör içinde hem karışımı sağlayacak hem de mikroalglerin fotobiyoreaktör tabanına çökmesini engelleyecektir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek deneyler, istatistiki olarak değerlendirilebilmesi adına, üç paralel olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla; proje kapsamındaki deneylere 3 reaktör kullanarak başlangıç yapılmıştır. Fakat sisteme verilen toplam 300 mL/dk'lık

debinin 3 reaktöre de eşit dağılmadığı gözlemlenmiştir. Deney başlangıcından itibaren gaz akışı her saat başı kontrol edilmiş fakat sadece ortadaki fotobiyoreaktöre gaz girdisinin olduğu, diğer iki tarafta yer alan fotobiyoreaktörlerde gazın tamamen kesildiği ve bu nedenle alglerin ilk iki gün içerisinde inhibe olup, yaşayamadıkları gözlemlenmiştir. Bu yüzden 300 mL/dk'lık toplam debinin 3 reaktöre dağıtılması yerine 100 mL/dk'lık debiyi tek bir reaktöre besleyerek deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Tek bir fotobiyoreaktörde yapılan deneylerin istatistiki olarak değerlendirilebilmesi açısından, fotobiyoreaktörden 5'er dakika arayla alınan 2 ayrı alg numunesinin sonuçlarının ortalaması alınarak deney parametreleri hesaplanmıştır. Bir önceki deneyde kullanılan hava taşının gözeneklerinde oluşabilecek tıkanmaların sisteme verilen gaz debilerini olumsuz etkilememesi adına her deney başlangıcında, yeni bir hava taşı kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir. Yapılan düzenlemeler doğrultusunda, fotobiyoreaktör sisteminde gerçekleştirilen deneylere düzenli bir şekilde, sorun olmadan devam edilebilmiştir.

3.3. Deney parametreleri ve deney listesi (Test parameters and test list)

3.3.1. Aydınlatma şiddeti (Illumination intensity)

C. vulgaris mikroalginin gelişiminde en iyi verim sağlayan aydınlatma şiddetinin tespiti açısından üç farklı aydınlatma şiddetinde altında (7 000 lux, 11 000 lux ve 15 000 lux) deneyler gerçekleştirilmiştir (SET-I). Deneylerde fotobiyoreaktöre %15 CO₂ içeren gaz karışımı (%15 CO₂+ %3 O₂+ %82 N₂) verilmiştir. Gaz debisi 100 mL/dk olarak belirlenmiştir. SET-I kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deney listesi (Set-I) (Test list (Set-I))

| SET-I | Aydınlatma Şiddeti (lux) | Aydınlatma Süresi (saat) | % CO ₂ |
|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1.1 | 7 000 | 24 | 15 |
| 1.2 | 11 000 | 24 | 15 |
| 1.3 | 15 000 | 24 | 15 |

3.3.2. Aydınlatma süresi (Illumination duration)

SET-I sonunda, en iyi CO₂ giderim verimine sahip aydınlatma şiddeti belirlenmiş, SET-II deneyleri bu aydınlatma şiddetinde gerçekleştirilmiştir. SET-II deneylerinde aydınlatma süresinin mikroalg kültürünün büyümesi üzerine etkisi incelenmiştir. Deneylerde %15 CO₂ içeren gaz karışımı (%15 CO₂+ %3 O₂+ %82 N₂) 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında fotobiyoreaktöre verilmiştir. Gaz debisi 100 mL/dk olarak belirlenmiş olup, SET-II kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Deney listesi (Set-II) (Test list (Set-II))

| SET-II | Aydınlatma Şiddeti (lux) | Aydınlatma Süresi (saat) | % CO ₂ |
|--------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 2.1 | 7 000 | 12 | 15 |
| 2.2 | 7 000 | 16 | 15 |
| 2.3 | 7 000 | 24 | 15 |

3.3.3. CO₂ derişimi (CO₂ concentration)

SET-II sonunda, en iyi CO₂ giderim verimine sahip aydınlatma süresi belirlenmiştir. SET-III deneyleri bu aydınlatma süresinde gerçekleştirilmiştir. SET-III deneyleri süresince fotobiyoreaktöre 100 mL/dk debide gaz karışımı verilmiştir. Deneyler 7 000 lux aydınlatma şiddetinde, 24 saatlik aydınlatma süresinde yapılmıştır. SET-III kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Deney listesi (Set-III) (Test list (Set-III))

| SET-III | Aydınlatma Şiddeti (lux) | Aydınlatma Süresi (saat) | % CO ₂ |
|---------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 3.1 | 7 000 | 24 | 0,04* |
| 3.2 | 7 000 | 24 | 15 |
| 3.3 | 7 000 | 24 | 90 |

* 400 ppm_v

3.3.4. Azot stresi (Nitrogen stress)

SET-IV deneyleri, fotobiyoreaktör sisteminde en iyi CO₂ giderim veriminin elde edildiği %15 CO₂ derişimi, 7 000 lux aydınlatma şiddeti ve 24 saat aydınlatma süresi altında hem azot stresi olmayan koşulda hem de %100 azot stresi olan koşulda gerçekleştirilmiştir. %100 azot stresi koşulunda mikroalgler inhibe olup büyüyemedikleri için 2. günde deney sonlandırılmıştır. Bunun üzerine %100 azot stresi deneyi 400 ppm_v CO₂ derişiminde tekrarlanmıştır. Bu deneyin sonunda da mikroalgler inhibe olmuş ve 2. günde deney sonlandırılmıştır. Azot stresi olmayan koşullarda yapılan deneylerde iyi bir büyüme sağlayan mikroalglerin, aynı koşullarla azot stresi altında büyüyememelerinin temel sebebinin; sistemdeki gaz akışının fazla olması ve büyümeyi olumsuz etkilemesi düşünülmüştür. Bu görüşün doğruluğunu teyit etmek amacıyla, fotobiyoreaktör sisteminin dışında deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, kıyas yapabilmek adına, %75 azot stresi deneyi de yapılacak deneyler arasına dahil edilmiş ve toplamda üç deney gerçekleştirilmiştir. 28 °C sabit sıcaklığın olduğu steril bir odada, 400 ppm_v CO₂ derişiminde ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde sürekli aydınlatma şiddetinde azot stresi olmayan, %75 azot stresi ve %100 azot stresi içeren koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir deney ortamında, mikroalgler yaklaşık olarak 12 gün iyi bir büyüme sergilemişlerdir. %100 azot stresi için besiyerinden azot içeren tüm bileşenler (NaNO₃, EDTA ve Co(NO₃)₂.6H₂O) çıkarılmıştır. Üçüncü deney de ise %75 azot stresi uygulanmıştır. Bunun için besiyerinden EDTA ve Co(NO₃)₂.6H₂O bileşenleri çıkarılmış, azot kaynağı olarak besiyerinde sadece NaNO₃ kullanılmıştır. Mikroalg kültüründe %75 azot stresi oluşturacak besiyerinin hazırlanmasında NaNO₃'ün Stok 1 çözeltisindeki derişimi 4,505 g/L olarak belirlenmiştir. SET-IV kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Tablo 5'te gösterilmiştir. Deneyler sonunda toplanan/hasat edilen mikroalg biyokütlesinde RuBisCO ve lipid analizleri yapılmıştır.

Tablo 5. Deney listesi (Set-IV) (Test list (Set-IV))

| SET-IV | Aydınlatma Şiddeti (lux) | Aydınlatma Süresi (saat) | % CO ₂ | Azot Stresi |
|--------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-------------|
| 4.1 | 7 000 | 24 | 0,04* | - |
| 4.2 | 7 000 | 24 | 15 | %100 |
| 4.3 | 7 000 | 24 | 90 | %75 |

* Deneyler erlenmayerde hava atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Havadaki CO₂ derişiminin kuru bazda 400 ppm_v olduğu kabul edilmiştir.

3.4. Analizler ve hesaplamalar (Analyses and calculations)

Her bir deney için fotobiyoreaktörden 24 saatte bir numune alınmıştır. Alınan numunelerde pH, sıcaklık, optik yoğunluk, kuru ağırlık (g/L), klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid ölçümleri yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde her bir deney için mikroalg üreme verimliliği (P_t, g (kuru ağırlık)/L/gün), maksimum spesifik büyüme oranı, (μ_{max}, 1/gün) ve CO₂ tutma verimi (R_{CO2}, g CO₂/L/gün) hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan *C. vulgaris* mikroalginin optimum büyüme sıcaklığı 28 °C olarak belirlenmiştir. Deneyler esnasında fotobiyoreaktörün iç sıcaklığı 28 °C'de sabit olacak şekilde ayarlanmıştır. Her deneyde, fotobiyoreaktörden 24 saatte bir alınan numunelerde sıcaklık ve pH ölçümü Hanna Instruments HI 2210 pH metre kullanılarak yapılmıştır. pH ölçüm değerlerine göre, mikroalg büyümesi üzerinde olumlu ve olumsuz yönde etkileyen parametrelerin ve optimum pH değerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Kültürün hücre yoğunluğunun arttığına bir delil olması bakımından alg kültüründen alınan numunede ışık soğurma (**optik yoğunluk**) ölçümü yapılmıştır. Optik yoğunluk, soğurmaya ilave olarak ışığın dağılması ya da yansımaları da kapsar. Her ne kadar soğurma, ışığın dağılması ve yansımaları olaylarını dikkate almıyor olsa da optik yoğunluk hakkında fikir verir. Bu nedenle, bu noktadan itibaren soğurma, "optik yoğunluk" terimi ile ifade edilecektir. Mikroalg gibi renk veren hücrelere sahip biyokütlelerin bir sulu çözeltideki derişimi dolaylı olarak optik yoğunluk tespiti ile yapılmaktadır. Fakat mikroalg kültürün yaşına ve büyüme şartlarına göre renk veren/boyar madde içeriği değişiklik gösterdiği için optik yoğunluk ölçümleri ciddi hatalara neden olabilmektedir. Hatayı en düşük seviyede tutabilmek için optik yoğunluk ölçümü renk veren/boyar maddenin soğurabileceği dalga boyu aralığının dışındaki bir dalga boyunda yapılmalıdır. Rodrigues vd. (2011) yaptıkları çalışmada *C. vulgaris* mikroalg kültürü için optik yoğunluk ölçümünün 684 nm dalga boyunda, Griffiths vd. (2011) 750 nm dalga boyunda yapılmasını önermektedirler. Buradan hareketle, deneyler süresince mikroalg kültürü numunesinin hem 684 nm hem de 750 nm dalga boylarındaki optik yoğunluğu spektrofotometre (Hach Lange DR 6000) kullanılarak belirlenmiştir. Her iki dalga boyundaki ölçümler birbiriyle uyumlu olduğu için burada sadece 684 nm dalga boylarındaki optik yoğunluk değerleri paylaşılmıştır.

Kuru ağırlık (X) için; filtre kağıdı (selüloz asetat membran filtre 0,45 μm) 105 °C'de 2 saat boyunca fırınında bekletip kurutulur. Kurutulan filtre kağıdı desikatörde soğutulduktan sonra hassas terazi (Pioneer Ohaus PA214C;

Okunabilirlik: 0,0001g) ile darası (m_1) alınır. Mikroalg kültüründen alınan 10 mL örnek, filtre kağıdından geçirilerek süzülür. Örneğin süzüldüğü filtre kağıdı 3 saat boyunca etüvde 105 °C'de kurutulur. Kurutulan filtre kağıdı desikatörde ortam sıcaklığına getirildikten sonra yapılan tartım sonuçlarıyla (m_2) litredeki kuru ağırlık gram cinsinden tespit edilir (1).

$$X = \frac{\Delta m}{V} \quad (1)$$

X; g (kuru ağırlık)/L cinsinden mikroalg derişimini vermektedir. Δm , $m_2 - m_1$ kuru ağırlığını g cinsinden, V ise toplam numune hacmini mL cinsinden ifade etmektedir.

Klorofil fotosentez sürecinin bir göstergesi olduğundan dolayı, mikroalg kültüründe fotosentezin gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek ve biyokütle artışını tayin etmek için kültürden alınan numunelerde **klorofil-a**, **klorofil-b** ve **karotenoid** tayini yapılmıştır. Fotobiyoreaktörden alınan 10 mL alg numunesi 0,45 µm gözenek çaplı selüloz asetat filtre kağıdından süzümüştür. Süzülme işleminin son aşamasında ortamının pH'sının asidik koşullara gelmemesi (ortam pH'sının 7-7,5 civarında tutulması), klorofil pigmentlerinin zarar görmemesi için filtre kağıdına son aşamada 200 µL MgCO₃ ilave edilerek beraber süzdürümüştür. Filtre kağıdı santrifüj tüpüne yerleştirilerek, üzerine 5 mL %90'lık aseton eklenmiştir. Filtre kağıdı çözünene kadar yaklaşık bir dakika boyunca vortekslenmiş ve 4 °C'de 24 saat süreyle buzdolabında alüminyum folyoya sarılarak, karanlık ortamda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda örnekler daha konsantre bir numune eldesi için 6 000 rpm'de 15 dakika süreyle santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonunda elde edilen üst sıvının 480, 630, 645 ve 665 nm dalga boylarında OD ölçümleri yapılmış ve (2), (3) ve (4) eşitlikleri kullanılarak örneklerin klorofil ve karotenoid içerikleri tespit edilmiştir (Parsons ve Strickland 1972). 480 nm dalga boyunda karoten, 645 nm'de klorofil-b ve 665 nm'de ise klorofil-a pigmenti ışığı en yüksek seviyede soğurabilmektedir. Hem klorofil-a hem de klorofil-b 630 nm dalga boyundaki ışığı düşük bir seviyede soğurabildikleri için 630 nm'deki ölçümler, hesaplamalarda düzeltme faktörü olarak kullanılmaktadır.

$$\text{Klorofil-a } (\mu\text{g}/10 \text{ mL}) = (11,6 * E_{665} - 1,31 * E_{645} - 0,14 * E_{630}) * \left(\frac{V}{L}\right) \quad (2)$$

$$\text{Klorofil-b } (\mu\text{g}/10 \text{ mL}) = (20,7 * E_{645} - 4,34 * E_{665} - 4,42 * E_{630}) * \left(\frac{V}{L}\right) \quad (3)$$

$$\text{Karotenoid } (\mu\text{g}/10 \text{ mL}) = 4,0 * E_{480} \quad (4)$$

E: Her bir dalga boyunda okunan OD değeri

V: Kullanılan aseton miktarı, mL

L: Işığın aldığı yolu (küvet genişliği), cm

Mikroalg numunelerinin **RuBisCO** analizine başlamadan önce, RuBisCO test kitinde bulunan standart çözeltiler kullanılarak bir kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Kullanılan kitin içeriğinde yer alan kalibrasyon eğrisi verileri ile ölçülen veriler arasındaki hata payının çok düşük olduğu görülmüş ve güvenli bir şekilde temel deneylere başlanılmıştır. Mikroalg kültürünün RuBisCO oranını belirlemek ve deneyler sonrasındaki RuBisCO oranı ile kıyas yapabilmek adına deney setlerine başlamadan önce kültürde RuBisCO analizi yapılmıştır. Daha sonra Set-IV kapsamındaki deneyler sonrasında hasat edilen mikroalg kültüründe RuBisCO analizi yapılmış ve RuBisCO enzim aktivitesinin azot stresi koşullarına göre nasıl değiştiği ve mikroalg kültürünün CO₂ tutma verimini nasıl etkilediği tespit edilmiştir. RuBisCO analizi aşağıda belirtilen yöntemle gerçekleştirilmiştir:

- Deney sonunda fotobiyoreaktördeki sulu çözelti (mikroalg kültürünün de içinde olduğu) toplanmış ve 5 dk boyunca 5 000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonrası üstte kalan sıvı faz (süpernant) alındıktan sonra kalan mikroalg biyokütlesinin (alg keki) yaklaşık 1 mL'si pastör pipeti ile alınmış ve RuBisCO analizi için ayrılmıştır. Geriye kalan alg kekinin tümü lipid analizi için muhafaza edilmiştir.
- 1 L saf suda ham enzim ekstraksiyon çözeltisi (50 mM Tris-HCl (pH 8,0), 1 mM EDTA, 50 mM NaHCO₃, 2 mM DTT ve 10 mM MgCl₂) hazırlanmıştır. RuBisCO analizi için ayrılan 1 mL alg keki üzerine ham enzim ekstraksiyon çözeltisinden 1 mL eklenmiş ve alg keki 3 dakika boyunca 160 W'lık ultrasonik prob altında parçalanmıştır.
- Parçalanmış hücre süspansiyonu tekrar 5 dakika boyunca 3 000 rpm'de santrifüj edilmiş ve süpernant RuBisCO aktivitesinin belirlenmesi için toplanmıştır (Huang vd. 2016).

RuBisCO aktivitesi, RuBisCO test kiti kullanılarak mikropilaka absorban okuyucuda 450 nm'de yapılan okuma ile belirlenmiştir. Analiz, RuBisCO seviyesini belirlemek için çift antikorlu sandviç yöntemine dayanmaktadır (Huang vd. 2016). RuBisCO test kitinde bulunan mikrotitre plakası RuBisCO antijeni ile önceden kaplanmıştır.

Standart/numune RuBisCO'ya özgü antikor ile birlikte uygun mikrotitre plaka oyuklarına eklenmiş, 37 °C'de 60 dakika boyunca inkübe edilmiştir. Yıkama çözeltisi ile 5 kez yıkandıktan sonra, antikor-antijen etiketli enzim kompleksi oluşturmak için HRP (Horseradish peroksidaz) etiketli RuBisCO antikor çözeltisi standarda/numuneye ilave edilmiş, standart/numune 37 °C'de 60 dakika boyunca tekrar inkübe edilmiştir. Standart/numune yıkama çözeltisi ile 5 kez daha yıkanmıştır. Ardından standarda/numuneye tetrametil benzidin (TMB) ilavesi yapılmıştır. TMB enzimatik bir tepkimenin gerçekleşmesini sağlar. Böylece mavi renkli bir ürün elde edilir. HRP tarafından katalize edilen raportör substrat tetrametil benzidin (TMB) ilavesiyle bir enzimatik reaksiyon gerçekleşmiştir. TMB eklendiğinde, analiz aşamaları hassas bir şekilde uygulanmışsa eğer, nihai rengin maviye dönüşümü gerçekleşir. Yeşil bir renk elde edilirse, analiz aşamalarının uygulanmasında sorun var anlamına gelmektedir. TMB ilavesinin ardından standart/numune 37 °C'de 20 dakika boyunca inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda çözelti mavi renk almıştır. Enzimatik aktiviteyi etkisiz hale getirmek için 50 µL durdurma tamponu ilave edilmiş, mavi rengin sarıya dönmesi gözlenmiştir. Sarı renklenme yoğunluğu, 5 dakika içinde mikropilaka absorban okuyucusu tarafından 450 nm'de absorban okunarak ölçülmüştür. Ölçüm değeri, numunede tutulan HRP-Konjuge RuBisCO miktarı ile nicel olarak doğru, numune veya standart içinde bulunan RuBisCO miktarı ile ise ters orantılı olmaktadır (Aviva Systems Biology 2005).

Mikroalg numunelerinde **lipit** ekstraksiyonu, kloroform/metanol (CHCl₃/CH₃OH) kullanımı içeren ve gravimetrik tanımlamaya dayanan Bligh ve Dyer metoduna (Bligh ve Dyer 1959) göre yapılmıştır. Bu metod ile %80 sıvı içeriğine sahip biyolojik materyallerden, CHCl₃/ CH₃OH/su (1:1:0,5 v/v) içeren ekstraksiyon çözeltisi (çözücü) kullanılarak lipit ekstraksiyonu sağlanmaktadır. Set-IV kapsamındaki deneyler sonrasında hasat edilen ve kurutulan (40 °C etüvde 2 gün süre ile) mikroalg biyokütlesinde lipit eldesi aşağıdaki yöntem (Bligh ve Dyer (1959)) kullanılarak sağlanmıştır.

"25 mg kuru biyokütle 50 mL'lik falkon tüpüne alınmış ve üzerine CHCl₃/CH₃OH/su (1:1:0,5 v/v) çözücülerini toplam hacim 25 mL olacak şekilde birkaç adımda eklenmiştir. Her çözücü ilavesinden sonra biyokütle-çözücü karışımı 1 dk hızlıca vorteks cihazında karıştırılmış ve ardından su banyosunda 75 °C sıcaklıkta 5 dk bekletilmiştir. Biyokütle-çözücü karışımı 6 000 rpm'de 10 dk santrifüj edilerek faz ayrımı sağlanmıştır. Altındaki faz (kloroform-lipit karışımı) pastör pipeti ile dikkatlice çekilmiş ve darası alınan numune şişesine konulmuştur. 80 °C'de çözücüsü uçurulan numunenin son tartımı alınmıştır. İlk ve son tartım arasındaki fark, kuru ağırlık bazında % lipit içeriğini vermiştir." (Gürol vd. 2014)

Mikroalg üreme verimliliği (P_t) (5) eşitliğine göre hesaplanmıştır (Aslam vd. 2017).

$$P_t = \frac{(X_t - X_0)}{(t_t - t_0)} \quad (5)$$

P_t, deneyin başlamasıyla t süresi arasında mikroalg üreme verimliliğini g (kuru ağırlık)/L/gün cinsinden vermektedir. X_t ve X₀ sırasıyla t_t ve t₀ zamanlarındaki fotobiyoreaktördeki mikroalg derişimlerini (g (kuru ağırlık)/L cinsinden) ifade etmektedir. t₀ aşılamanın yapıldığı ilk günü, t_t ise aşılama sonrası herhangi bir zamanı temsil etmektedir.

Maksimum spesifik büyüme oranı (µ_{max}) 1/gün cinsinden (6) eşitliğine göre hesaplanmıştır (Taştan vd. 2016).

$$\mu_{max} = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

X₂ ve X₁ sırasıyla t₂ ve t₁ zamanlarındaki fotobiyoreaktördeki mikroalg derişimlerini (g (kuru ağırlık)/L cinsinden) ifade etmektedir. t₁ mikroalg kültüründe görülen büyümenin en fazla olduğu zaman diliminin başlangıcını, t₂ ise bu zaman diliminin sonunu temsil etmektedir.

CO₂ tutma verimi (R_{CO2}) (7) eşitliğine göre hesaplanmıştır (Tang vd. 2011).

$$R_{CO_2} = C_c * P_{max} * \frac{(MA_{CO_2})}{(MA_C)} \quad (7)$$

Formüldeki R_{CO2}, CO₂ tutma verimini g CO₂/L/gün cinsinden vermektedir. C_c mikroalg kuru ağırlığının C içeriğini (kütlece %; g C/ g (kuru ağırlık)), P_{max} maksimum mikroalg üreme verimliliğini (g (kuru ağırlık)/L/gün) temsil etmektedir. MA_{CO2} (g/mol) ve MA_C (g/mol), sırasıyla, CO₂ gazının ve C elementinin moleküler ağırlıklarını göstermektedir. C_c, her numunenin değil sadece hasat sonrası toplanan mikroalg kültüründen alınan numunenin kuru ağırlığının C içeriğidir. Bu çalışmada C_c 0,5 olarak kabul edilmiştir (Pegallapati ve Nirmalakhandan 2013).

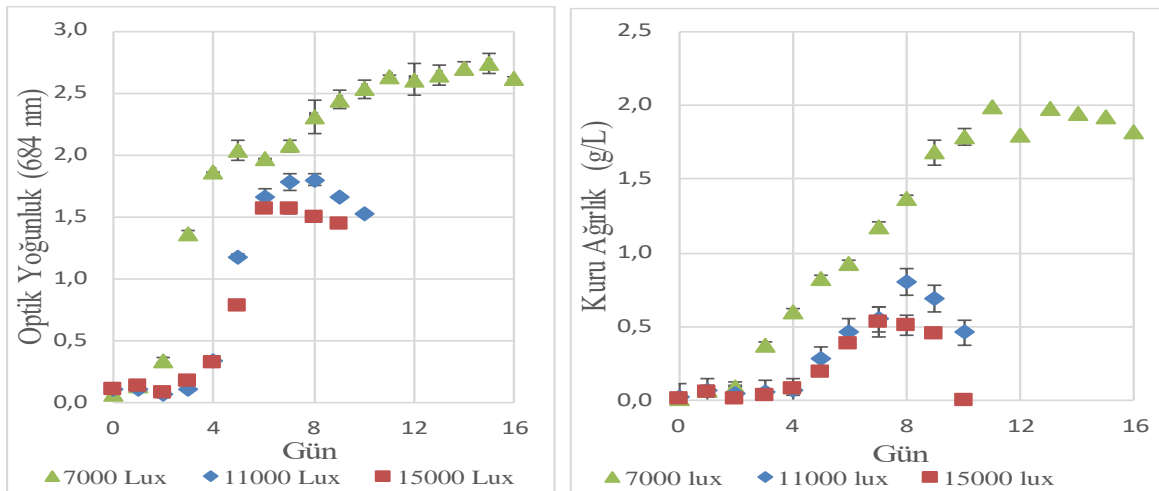
4. Bulgular ve tartışma (Results and discussion)

4.1. Aydınlatma şiddetinin mikroalgal biyokütle büyüme verimine etkisi (Effect of illumination intensity on microalgal growth)

C. vulgaris mikroalg kültürünün büyümesine aydınlatma şiddetinin etkisini belirlemek için mikroalg kültürü 7 000, 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetinde Lab-FBR sisteminde 24 saat boyunca sürekli ışık altında yetiştirilmiştir. Mikroalg kültürüne deney süresince %15 CO₂ içeren gaz karışımı verilmiştir. Deneyler süresince fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin (24 saatte bir, 5 dakika arayla iki numune) optik yoğunluk (OD) değerleri ölçülmüş ve kültürün büyümesi takip edilmiştir. Mikroalg numunelerinin OD ve kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere 7 000 lux (94,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 11 000 lux (148,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ve 15 000 lux (202,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aydınlatma şiddetlerinde yapılan deneyler sonucunda 684 nm dalga boyunda ölçülen en yüksek OD değerleri sırasıyla 2 738, 1 794 ve 1 566 olmuştur. Deney sonuçlarına göre 24 saat sürekli aydınlatma ile en iyi büyümenin 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında olduğu tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç Han vd. (2015) tarafından %0,04 CO₂ derişiminde yapılan bir çalışmada elde edilmiş, 2 000, 4 000, 6 000, 8 000 ve 10 000 lux aydınlatma şiddetlerinde gerçekleştirilen deneylerde 6 000 ve 8 000 lux değerlerinde daha yüksek büyüme oranının elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Wahidin vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada göre 6 000 lux aydınlatma şiddetinin 10 000 lux aydınlatma şiddetine kıyasla, biyokütlenin keskin bir şekilde azalmasına neden olan fotosentetik reseptör sistemine zarar verebilecek yüksek aydınlatma kaynaklı fotoinhibisyon riskini azaltabileceği belirtmişlerdir. Bu çalışmada 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen yüksek büyüme verimi bu bilgiyi desteklemektedir.

Sutherland vd. (2012) aydınlatma şiddetinin 8 880 lux'ten (120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) az olduğu yetiştirme koşullarında mikroalglerin kendi kendilerine gölgeleme etkisi yaratarak ışık sınırlaması etkisi yaratabilecekleri ve bu nedenle klorofilin elektron transferi yapmasının sınırlanması ile mikroalglerin CO₂ tutabilme özelliklerinin azalabileceği belirtilmiştir. Aşırı ışık altında mikroalg yetiştirme durumunda ise, fotonların fotosistem I'e (PS I) girişinde engel oluşabileceği ve mikroalg hücreleri içindeki PS I'den PS II tepkime merkezlerine elektron transfer verimliliğinin azalmasına söz konusu olabileceği belirtilmiştir (Sutherland vd. 2013).

Chávez-Fuentes vd. (2018) çalışmalarında azot sınırlaması olan kültürlerde 70 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (5 180 lux) ile 140 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (10 360 lux) aydınlatma şiddeti ve farklı ışık kalitesi (beyaz, mavi, sarı ve mor) altında *C. vulgaris* mikroalginin yağ asidi profilini ve mikroalgden elde edilen biyodizelin kalitesini incelemişlerdir. Mor ve sarı ışık kaynaklarına kıyasla beyaz (0,69 g/L) ve mavi ışık (0,65 g/L) altında 10 360 lux aydınlatma şiddetinde maksimum hücre ve biyokütle derişimi gözlemlenmiştir. Fakat elde ettikleri biyokütle derişimi (0,69 g/L) bu çalışma sonucunda elde edilen biyokütle oranına (1,99 g/L) göre yaklaşık 2,5 kat daha azdır. Bu sonuç, en iyi büyüme verimi elde edilen 7 000 lux aydınlatma şiddetinin daha iyi verim sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD ve kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24 saat aydınlık) (Change of OD and dry weight values of microalgae samples taken from photobioreactor at different illumination intensities (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24-hour illumination))

7 000, 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetleri için en yüksek kuru ağırlık değerleri sırasıyla 1,99 g/L, 1,61 g/L ve 0,45 g/L olarak hesaplanmıştır. Mikroalg kültürü 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında daha iyi bir büyüme göstermiştir. 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetleri altında *C. vulgaris* mikroalginde hızlı bir büyüme ve ölüm fazına daha kısa sürede geçiş olmuştur. Bu kısa süreden dolayı biyokütle oluşumundaki artış durmuştur. 7 000 lux

aydınlatma şiddetinde yavaş bir büyüme gerçekleşmiş ve daha uzun sürede büyüme devam ettiği için biyokütle oranında artış olmuştur. Montoya vd. (2014), *C. vulgaris* kültürünü %8 CO₂ derişiminde ototrofik tübüler bir fotobiyoreaktörde yetiştirerek maksimum mikroalg derişimini 6,8 g/L olarak elde etmişlerdir. %8 CO₂ derişiminde 6,8 g/L olarak elde ettikleri maksimum kuru ağırlık değerinin, bu çalışmada %15 CO₂ derişiminde elde edilen 1,99 g/L oranına göre oldukça yüksek olması, yüksek CO₂ derişiminin büyüme oranını azaltıcı etki yaratması ile açıklanabilir. Farklı bir çalışma (Khoeyi vd. 2012) kapsamında; farklı aydınlatma şiddetlerinde (37,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (2 775 lux), 62,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (4 625 lux) ve 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (7 400 lux)) ve farklı aydınlatma sürelerinde (8:16 saat, 12:12 saat ve 16:8 saat aydınlık: karanlık) yetiştirilen *C. vulgaris*'in 2 775 lux ve 4 625 lux aydınlatma şiddetlerinde biyokütlede artış olduğu, ancak 7 400 lux aydınlatma şiddetinde yetiştirildiğinde biyokütlesinde azalma olduğu belirlenmiştir. Maksimum biyokütlenin 4 625 lux ve 16:8 aydınlatma süresinde 2,05 \pm 0,1 g/L ve minimum biyokütlenin 2 775 lux'te ve 8:16 aydınlatma süresinde 0,6 \pm 0,07 g/L olduğu belirtilmiştir (Khoeyi vd. 2012). 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen 1,99 g/L biyokütle oranının Khoeyi vd. (2012) çalışma sonuçlarına göre daha az elde edilmesinin, aydınlatma sürelerindeki farklılıktan ve düşük (<7 000 lux) aydınlatma şiddetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü 8 saatlik karanlık döngüde mikroalgler solunum reaksiyonları için fazla fotonlarını enerji kaynağı olarak kullanmaktadırlar. Bunun sonucunda 16 saat aydınlatma şiddetinde yeni baştan foton soğurmaları büyümeyi olumlu yönde etkilemekte ve büyümede artış gerçekleştirebilmektedir.

%15 CO₂ derişiminde ve 24 saat aydınlatma süresi boyunca; 7 000 lux aydınlatma şiddetinde ölçülen pH değerleri 4,38-6,04 aralığında, 11 000 lux aydınlatma şiddeti altında ölçülen pH değerleri 6,16-6,86 aralığında ve 15 000 lux aydınlatma şiddeti altında ölçülen pH değerleri ise 5,28-6,90 aralığında değişim göstermiştir. Farklı CO₂ derişimleri altında yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalg kültürü için pH değerleri yaklaşık olarak %12 CO₂ için 5,7-7 arası, %4 CO₂ için 5,8-7,5 arası ve %0,04 CO₂ için 6,4-10,5 arasında olduğu belirtilmiştir (Hulatt ve Thomas 2011). Çalışmanın sonuçları ile kıyaslandığında, *C. vulgaris* mikroalginin Hulatt ve Thomas (2011)'in %12 CO₂ derişiminde belirledikleri pH (5,7-7) aralığında, 11 000 lux aydınlatma şiddetindeki verilerin %15 CO₂ derişiminde belirlenen pH (6,16 - 6,86) değerleri ile yakın oldukları görülmektedir. Her iki veride yüksek CO₂ derişimlerinden dolayı pH'nın 5-7 aralığında olduğu görülmektedir. Yeh vd. (2010) tarafından *C. vulgaris* ESP-31 suşu ile farklı karbon kaynağı derişimlerinde (NaHCO₃: 100- 1 600 mg/L) ve farklı aydınlatma şiddetleri altında (370 lux-2 960 lux) 5-10 pH aralığında türün önemli ölçüde inhibe olmadığı ve geniş pH tolerans aralığının (özellikle alkali pH toleransı için), *C. vulgaris* ESP-31 yetiştiriciliğinde iyi bir durum olduğu belirlenmiştir. Fakat çalıştıkları aydınlatma şiddetleri 7 000 lux aydınlatma şiddetine göre oldukça düşük seviyede kalmaktadır. Kong vd. (2010) genel olarak mikroalglerin yetiştirilme koşullarını inceledikleri çalışmada, sürekli olarak kültür ortamına yüksek derişimde CO₂ verildiğinde, mikroalg büyümesinin olumsuz etkilenmesi durumunda pH'nın büyük ölçüde düşebileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada %15CO₂ derişiminde en iyi verimin elde edildiği 7 000 lux aydınlatma şiddeti için belirlenen 4,38- 6,04 pH aralığı bu bilgiyi doğrular niteliktedir. Fakat bu çalışmada pH aralığının büyüme üzerinde olumsuz bir etki yarattığı gözlemlenmemiştir.

24 saatlik aydınlatma süresinde 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalgine ait maksimum spesifik büyüme oranı (μ_{max}); maksimum mikroalg derişimi (X_{max}) ve maksimum mikroalg üreme verimliliği (P_{max}) olarak hesaplanan büyüme parametreleri Tablo 6'da verilmiştir. Morais ve Costa (2007) farklı fotobiyoreaktörlerde, 12 saat aydınlatma süresinde ve 3 200 lux aydınlatma şiddetinde, %0,038, %6, %12 ve %18 CO₂ derişimlerinde *Chlorella kessleri* ile deneyler yapmışlardır. Çalışmada *Chlorella kessleri* için en iyi büyüme parametreleri %6 CO₂ derişiminde elde edilmiştir. Bu derişimde elde edilen maksimum spesifik büyüme oranı 0,267 gün⁻¹ ve maksimum biyokütle derişimi 0,087 g/L olarak belirlenmiştir. SET-I deneyleri sonucunda 24 saat aydınlatma süresi ve 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında maksimum spesifik büyüme oranı 0,33 gün⁻¹ ve maksimum mikroalg derişimi 3,98 g/L olarak belirlenmiştir. Belirlenen değerler, Morais ve Costa (2007)'in çalışmalarında %6 CO₂ derişimde elde edilen değerlere kıyasla daha yüksektir. Morais ve Costa (2007)'in çalışmalarında 12 saatlik aydınlatma süresine göre kullanılan yüksek CO₂ derişimi (%6) büyümeyi azaltıcı etki yaratmış olabilir.

Tablo 6. Farklı aydınlatma şiddetlerinde *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24 saat aydınlık) (Kinetic parameters for *C. vulgaris* microalgae culture at different illumination intensities (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24-hour illumination))

| Aydınlatma Şiddeti, lux | μ_{max} , 1/gün | X_{max} *, g/L | P_{max} , g/L/gün | R_{CO_2} , g/L/gün |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 7 000 | 0,33 | 3,98 | 0,37 | 11,96 |
| 11 000 | 0,36 | 1,61 | 0,19 | 5,57 |
| 15 000 | 0,45 | 1,06 | 0,15 | 4,84 |

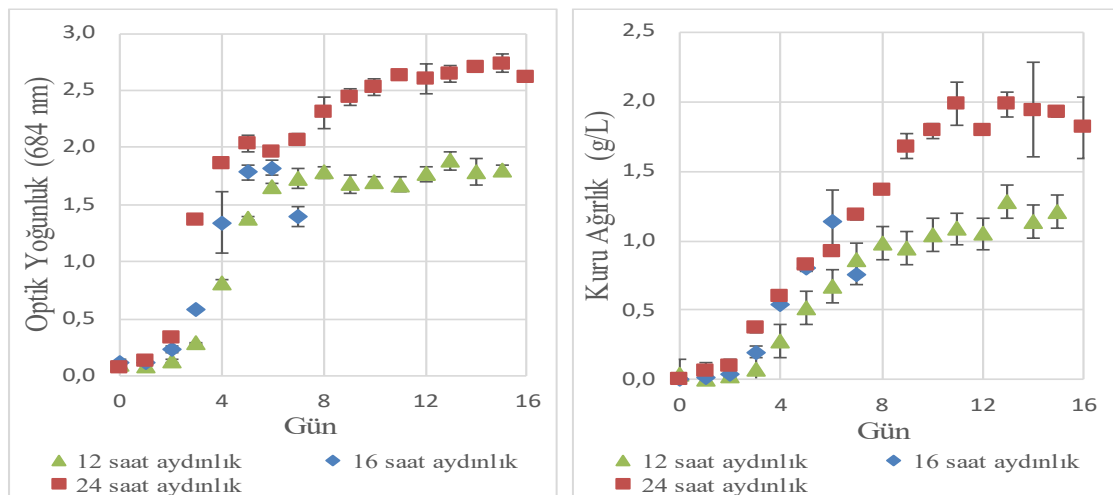
* X_{max} : maksimum biyokütle derişimi, g (kuru ağırlık)/L

4.2. Aydınlatma süresinin mikroalgal biyokütle büyüme verimine etkisi (Effect of illumination duration on microalgal growth)

SET-II deneyleri kapsamında fotobiyoreaktöre %15 CO₂ içeren gaz karışımı (%15 CO₂+ %3 O₂+ %82 N₂) 7 000 lux ışık akısı altında sisteme verilmiş ve 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma sürelerinin mikroalg kültürünün büyümesi üzerine etkisi incelenmiştir. %15 CO₂ içeren gaz karışımının kullanıldığı, 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma sürelerinin test edildiği deneyler için fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD ve kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Kültürün başlangıç OD değerleri 684 nm dalga boyunda 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için sırasıyla 0,10, 0,12 ve 0,10 olarak ölçülmüş ve 2 gün boyunca kültürün OD değerlerinde ciddi bir artış görülmemiştir. Bu süre mikroalg kültürü için %15 CO₂ içeren gaz karışımına adaptasyon süresi olarak değerlendirilmiştir. İki günlük adaptasyon süresinin ardından mikroalg kültürü popülasyonu artmaya başlamıştır. En yüksek OD değerlerine 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için sırasıyla 13., 6. ve 15. günde ulaşılmıştır. 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için 684 nm dalga boyunda ölçülen en yüksek OD değerleri sırasıyla 1 885, 1 819 olmuştur. Deney sonuçlarına göre 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında en iyi büyümenin 24 saat sürekli aydınlatma süresinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Nautiyal vd. (2014), normal hava ortamında 2 000 lux aydınlatma şiddetinde ve 25 ± 1 °C'de *Spirulina*, *Chlorella* ve havuz suyu algi ile yaptıkları çalışma sonucunda elde ettikleri maksimum biyokütle oranlarının sırasıyla *Chlorella* için 1,35 g/L, *Spirulina* için 0,94 g/L ve havuz suyu algi için 0,82 g/L olduğu belirtmişlerdir. Nautiyal vd. (2014) çalışma sonuçlarına göre maksimum biyokütle veriminin (1,35 g/L) sağlandığı aydınlatma şiddeti ile çalışmada belirlenen maksimum biyokütle veriminin (1,99 g/L) arasında ciddi bir fark gözlenmemiştir. Nautiyal vd. (2014) hem düşük aydınlatma şiddeti hemde düşük CO₂ derişiminde çalıştıkları için optimum büyüme sağlandıkları düşünülmektedir. Aynı şekilde, yapılan çalışmalar sonucunda yüksek aydınlatma şiddetine paralel olarak (7 000 lux) yüksek CO₂ derişiminde (%15) çalışılmasıyla optimum büyüme veriminin sağlandığı, inhibe etkisinin azaltıldığı ve yakın biyokütle değerlerinin elde edildiği tahmin edilmektedir.

Wong vd. (2016), farklı tür fotobiyoreaktörlerde (kabarcıklanma, hava kaldırma, gözenekli hava kaldırma) kullanılarak *C. vulgaris* mikroalgini, biyokütle ekimi ve lipit üretimini incelemek için 9 000 lux aydınlatma şiddetinde ve normal hava koşulları altında 16:8 aydınlatma süresinde yetiştirmişlerdir. Yetiştirme sonuçlarına göre elde edilen Kabarcıklı PBR'deki maksimum biyokütle konsantrasyonu 0,78 g/L iken, hava kaldırmalı PBR'nin değeri 0,09 g/L olarak belirlenmiştir. Wong vd. (2016), çalıştıkları yüksek aydınlatma şiddetine kıyasla oldukça düşük CO₂ derişiminde çalışmalarında, 16 saatlik aydınlatma süresinin optimum ışık yoğunluğunun elde edilememesinden dolayı büyüme üzerinde olumsuz etki yarattığı ve buna bağlı olarak belirlenen maksimum biyokütle değerinin de oldukça düşük olduğu görülmektedir. 7 000 lux altında iyi bir büyüme sağlanması ile elde edilen 1,99 g/L maksimum biyokütle oranının çok daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD ve kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux) (Change of OD and dry weight values of microalgae samples taken from photobioreactor at different illumination durations (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux))

12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için başlangıç kuru ağırlık değeri 0,01 g/L'dir. 12 saat aydınlatma süresinde 13. günün sonunda alg kültürü derişimi yaklaşık 130 kat artarak en yüksek seviyesine (1,28 g/L) ulaşmıştır. 16 saat aydınlatma süresinde ise en yüksek derişim (1,14 g/L) 6. günün sonunda elde edilmiştir. Bu değer 24 saat aydınlatma süresinde 11. günde 1,99 g/L (başlangıç kuru ağırlık değerine oranla yaklaşık 200 kat artışla) olarak belirlenmiştir.

12 saat aydınlatma süresi boyunca 13 468 lux ($182 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aydınlatma şiddetinde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalginin kuru ağırlık değeri 0,27 g/L olarak hesaplanmıştır (Scarsella vd. 2010). Scarsella vd. 2010, 12 saatlik aydınlatma süresinde 13 468 lux altında 0,27 g/L kuru ağırlık oranı elde etmişlerdir. En iyi verim sağlanan 24 saat sürekli aydınlatmada ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde belirlenen 1,99 g/L değerine göre düşük olduğu görülmektedir. 12 saatlik aydınlatma periyoduna göre aydınlatma şiddetinin yüksek olması, aydınlatma süresinin kısa olması ile foton enerjisinin düşük seviyede kalmasının fotosentetik gelişimi inhibe ettiği ve biyokütle verimini azalttığı düşünülmektedir.

Rendon vd. (2013), *C. vulgaris*'in beyaz, mavi, kırmızı ve kırmızı-mavi ışıklar altında %0,04 CO₂ derişimi ile başlayıp, %8,5'e yükselen CO₂ derişimleri altında ve 7 622 lux aydınlatma şiddetinde büyümesini incelemişlerdir. Tüm ışık kaynakları altında artan CO₂ derişimine paralel olarak biyokütle üretiminde de artış görülmüştür. Maksimum biyokütle üretimi (1,59 g/L) %8,5 CO₂ derişiminde beyaz ışık altında elde edilmiştir. Sırasıyla, kırmızı ve kırmızı+mavi ışık altında biyokütle üretimi sırasıyla 1,53 g/L, 0,45 g/L ve 1,27 g/L olarak belirlenmiştir. Rendon vd. (2013), çalışmalarında elde ettikleri 1,59 g/L oranındaki biyokütle değerinin 1,99 g/L değerinden düşük olduğu görülmektedir. Birbirine yakın aydınlatma şiddetlerine rağmen, benzer aydınlatma şiddetlerine kıyasla çalışmada yüksek CO₂ derişiminin (>%8,5) olduğu ortamda daha iyi bir büyüme verimi sağlandığı düşünülmektedir.

Sung vd. (1998) *C. vulgaris* KR-1 türünü %10 ile %70 arasında değişen farklı derişim oranlarında CO₂ ile 25 °C' de, 24 saat aydınlatma süresinde 14 800 lux ($200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aydınlatma şiddetinde çalışmışlardır. Maksimum büyüme oranı %10 CO₂ içeren kültürde bulunmuş, ancak yüksek büyüme oranları ve hücre konsantrasyonları %30 ve %50 CO₂ derişimlerinde de devam etmiştir. Ayrıca, mikroalg büyümesinde adaptasyon süresinin daha yüksek CO₂ derişimleri altında daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. %70 CO₂ derişiminde büyüme oranının çok az olmasına rağmen, büyümenin devam ettiği ve 6. günün sonunda 0,71 g /L' ye ulaştığı; bu değer başlangıç hücre biyokütlesine göre yedi kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlardan yola çıkarak; *C. vulgaris* KR-1'in yüksek CO₂ derişimlerine karşı oldukça dayanıklı bir yapıya sahip olduğu gösterilmiştir. %10 CO₂ ile kültürlenen KR-1'in doğrusal büyüme oranı yaklaşık 1,15 g/L/gün den 6 günlük kültürün sonunda 5,7 g/L'ye ulaşması da *C. vulgaris* sp'nin yüksek yoğunluklu kültür için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Sung vd. (1998) sonuçlarının 6. günün sonunda %10 CO₂ derişimi için 5,7 g/L seviyesine çıkması, deneyler sonucunda elde edilen büyüme değerlerinin üstündedir. Bu duruma sebep olan etkenin *C. vulgaris* KR-1 türünün laboratuvar ortamında izole edilmesi olabilir.

SET-II kapsamında yapılan deney sonuçlarına ait büyüme parametreleri Tablo 7'de verilmiştir. En iyi verim sağlayan 24 saat aydınlatma süresinde elde edilen maksimum spesifik büyüme oranı (μ_{max}) 0,45 gün⁻¹, maksimum biyokütle derişimi 3,98 g/L ve maksimum biyokütle üreme verimliliği 0,19 g/L/gün olarak elde edilmiştir. Kao vd. (2014) çalışmalarında bir çelik fabrikasının baca gazını kullanarak fotobiyoreaktörlerde *Chlorella* sp MTF-15 suşu yetiştirip, algal biyokütle ve lipit verimliliğini incelemişlerdir. 22 200 lux aydınlatma şiddetinde, % 25 CO₂ derişimi altında yapılan deneyde elde edilen maksimum spesifik büyüme hızı (0,49 gün⁻¹) bu çalışmada elde edilen maksimum spesifik büyüme hızına (0,45 gün⁻¹; Tablo 7) oldukça yakındır.

Tablo 7. Farklı aydınlatma sürelerinde *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux) (Kinetic parameters for *C. vulgaris* microalgae culture at different illumination durations (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux))

| Aydınlatma Süresi, saat | μ_{max} , 1/gün | X_{max} , g/L | P_{max} , g/L/gün | R_{CO_2} , g/L/gün |
|-------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 12 | 0,29 | 1,28 | 0,12 | 3,95 |
| 16 | 0,45 | 1,14 | 0,19 | 5,90 |
| 24 | 0,45 | 3,98 | 0,19 | 10,26 |

%15 CO₂ derişimi ve farklı aydınlatma süreleri altında (12:12, 16:8 ve 24:0 aydınlık/karanlık) yapılan deneyler süresince ölçülen pH değerleri; 12 saat aydınlıkta 4,62– 6,83, 16 saat aydınlıkta 5,97– 6,90 ve 24 saat aydınlıkta 6,04– 4,54 aralığında değişim göstermiştir. Daliry vd. (2017) *C. vulgaris*'ten biyoyakıt elde etmek amacıyla yaptıkları çalışmada biyokütle ve lipit açısından en iyi verimi sağlayan yetiştirme parametrelerini incelemişlerdir. pH 9-10 aralığında, 16 saat aydınlatma süresinde, 5 000 ile 7 000 lux aydınlatma şiddeti ve 200 mL/dk havalandırma debisinde en iyi fiziksel koşulların sağlandığını belirlemişlerdir. Daliry vd (2017), en iyi büyümenin pH 9-10 aralığında olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada ise en iyi büyümenin pH 6,04– 4,54 aralığında olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, farklı aydınlatma sürelerinin ve gaz akış oranlarının pH seviyelerinde farklılık yarattıkları ve bu yüzden verilerde uyuşma sağlanmadığı düşünülmektedir.

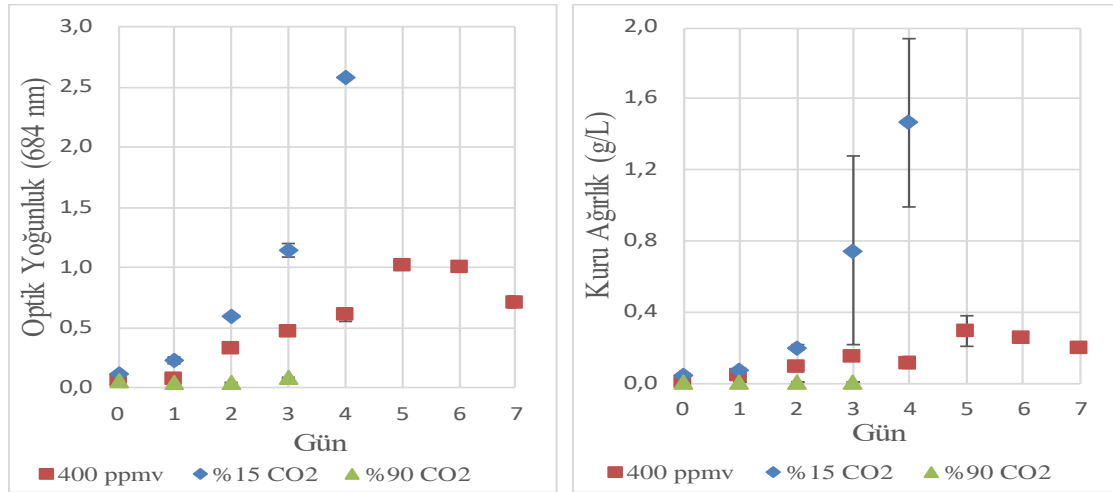
4.3. CO₂ derişiminin mikroalgal biyokütle büyüme verimine etkisi (Effect of CO₂ concentration on microalgal growth)

Fototrofik mikroalgler, fotosentez prosesinin gerçekleşebilmesi için karbon kaynağının tedarîğini ve biyokimyasal olarak bir nihai ürün oluşumunu sağlamaktadırlar. Bu noktada optimum gelişim göstermeleri ise, ortamda yeterli miktarda çözünmüş madde bulunmasına bağlıdır. Çözünmüş madde miktarının optimal seviyeye yükselmesiyle birlikte, mikroalglerin gelişebilmeleri ve buna bağlı olarak lipit üretme kapasitelerinde artış oranı da yükselmektedir. Sisteme verilen gazın ortamda sağladığı türbülans etkisi ortamdaki mikroalglerin çözünmüş maddeleri, verilen gazları ve ışığı eşit alabilmelerine imkan sağladığı için gelişmeyi olumlu yönde etkileyici unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat ortamdaki gaz miktarının yüksek seviyelere çıkması büyümeyi inhibe edici bir etki yaratmaktadır. Bunun nedeni olarak, kültür içerisinde kullanılmayan CO₂'nin karbonik aside (H₂CO₃) dönüşmesi ve buna bağlı olarak kültürün pH değerinin düşmesi öne sürülebilir (Zhu vd. 2016; Sibi vd. 2016). Bu nedenle, en iyi verim alınacak şekilde gelişmiş biyokütle ve lipit üretiminin elde edilebilmesi için optimum seviyelerde CO₂ ve çözünmüş madde miktarının sağlanabilmesi gerekmektedir.

SET-III kapsamında yapılan deneylerde 7 000 lux aydınlatma şiddetinde, sürekli aydınlatma ile en iyi verimi sağlayan CO₂ derişiminin tespitine yönelik hacimce 400 ppm, %15 ve %90 CO₂ içeren gaz karışımları altında deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). 400 ppm_v CO₂ içeren gaz karışımı altında *C. vulgaris* mikroalg kültürünün başlangıç kuru ağırlık değeri 0,01 g/L'dir. 5. günün sonunda kuru ağırlık derişimi 29 kat artarak yaklaşık 0,3 g/L olmuştur. 7. gün sonunda 5. gün OD değerine göre bir düşüş gerçekleşmiş ve kültür ölüm fazına geçmiştir. 7. günün sonunda elde edilen kuru ağırlık derişimi 0,2 g/L olarak belirlenmiştir. Deneye pH 5,2 civarında başlanılmış ve deney sonuna kadar pH değeri 10,5 (alkali) seviyesine doğru yükselmiştir. pH koşullarının iyi olmasına rağmen fotobiyoreaktöre verilen 400 ppm_v CO₂ derişimi yüksek mikroalg üretimi için yeterli olmamıştır. %15 CO₂ içeren gaz karışımı altında *C. vulgaris* mikroalg kültürü iyi bir büyüme eğrisi yakalamıştır. %15 CO₂'de kuru ağırlık değeri (max 1,47 g/L) 400 ppm_v'e göre 5 kat fazla verimle elde edilmiştir. Fotobiyoreaktöre verilen gaz karışımındaki CO₂ oranı %90'a çıkarıldığında ortam pH'sının 6'nın altına düştüğü, 2. günün sonunda alg hücrelerinin topaklaşmaya başladığı ve fotobiyoreaktörün dibine çöktüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, fotobiyoreaktöre verilen yüksek oranda CO₂ gazının mikroalgler tarafından kullanılmadığını göstermektedir. Suda çözünen CO₂ gazı karbonik aside dönüşerek ortam pH'sını düşürmüş, düşük pH nedeniyle de asidik ortam mikroalg kültürünün inhibe olmasına neden olmuş olabilir. Yüksek oranda CO₂ içeren gaz karışımlarının fotobiyoreaktöre verildiği deneylerde ortamın tamponlanması ve mikroalg hücrelerinin daha fazla çözünmüş CO₂ gazını bünyelerine alıp kullanabilmeleri için optimum pH değerinde bir ortamın sağlanması gerekmektedir. Mikroalg kültürünü doğrudan yüksek düzeyde CO₂ içeren gaz karışımına maruz bırakmanın büyümeyi engellediği görülmüştür. Bu durumun alg kültürüne verilen gaz karışımındaki CO₂ gazının kademeli olarak artırılması ile önlenebileceği düşünülmektedir.

Literatür çalışmalarında belirtilen optimum CO₂ derişimlerinin (Hu vd., 2016; Kitaya vd. 2005; Morais ve Costa 2007; Sung vd. 1998) oldukça üst sınırında olan %90 CO₂ derişiminin büyümeyi inhibe edici bir etki yarattığı görülmüştür. %90 CO₂ derişiminde 3 gün boyunca deneye devam edilmiş, fakat hücreler sağlıklı bir yeşil renge dönüşmek yerine OD değerlerinin 0,08 seviyelerinde kalması nedeniyle büyümenin inhibe olmasından dolayı saf suya yakın bir renge dönüşmüş ve bu durumda deneye son verilmiştir. Şekil 4'te verilen kuru ağırlık deney sonuçlarına bakıldığında en iyi kuru ağırlık değerinin önemli bir farkla %15 CO₂ derişimi altında elde edildiği görülmektedir. Maksimum kuru ağırlık değerleri 400 ppm_v derişiminde, %15 CO₂ derişiminde ve %90 CO₂ derişiminde sırasıyla; 0,3 g/L, 1,5 g/L ve 0,12 g/L olarak hesaplanmıştır.

Kitaya vd. (2005), sıcaklığın etkilerini araştırdıkları çalışmaları kapsamında mikroalglerin hücresel çoğalmasında CO₂/O₂ derişimleri ve aydınlatma şiddetini incelemişlerdir. Mikroalgleri, 25°C ile 33°C arasında beş sıcaklık seviyesi, %10 ile %30 arasında üç seviye CO₂ derişimi ve 20 µ mol m⁻² s⁻¹ (1 480 lux) ile 200 µ mol m⁻² s⁻¹ (14 800 lux) aydınlatma şiddetlerinde kültürlemişlerdir. Sonuçlar, mikroalg hücrelerinin en yüksek çoğalma oranının 27-31°C sıcaklıkta, %4 CO₂ derişiminde, %20 O₂ derişiminde ve yaklaşık 7 400 lux (100 µ mol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddetinde olduğunu göstermiştir. Anjos vd (2013) *C. vulgaris* ile %2, %6 ve %10 CO₂ derişimlerinde ve 5 180 lux (70 µ mol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddeti altında deneyler gerçekleştirmişlerdir. En iyi büyümenin %6 CO₂ derişiminde ve 5 180 lux aydınlatma şiddetinde olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmada %15 CO₂ ve 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında yapılan deneylerden elde edilen verilerle net bir şekilde kıyas yapılamamaktadır çünkü %15 CO₂ derişiminde 5 180 lux aydınlatma şiddeti altında yapılan bir çalışmada ışık kaynağının yeterli olmayabileceği ya da inhibe etkisi yaratabileceği düşünülmektedir. Ryu vd. (2009), *Chlorella sp. AG10002* suşu ile %0,5 - %5 aralığında CO₂ derişimini kademeli arttırarak, 2 960 lux aydınlatma şiddeti altında çalışmışlardır. Çalışmalarının sonucunda maksimum üreme verimliliği (0,34 g/L/gün), maksimum kuru ağırlık (2,02 g/L) ve maksimum CO₂ fiksasyon oranının (0,35 g CO₂/gün) %5 CO₂ derişimde sağlandığı belirlenmiştir. Elde edilen biyokütle derişiminin (2,02 g/L), bu çalışmada elde edilen 1,99 g/L ile çok yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Benzer oranlarının elde edilmesinin sebebi olarak, seçilen aydınlatma süreleri ve aydınlatma şiddetlerinin optimum büyümeyi sağladıkları düşünülmektedir.



Şekil 4. Farklı CO₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD ve kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlatma) (Change of OD and dry weight values of microalgae samples taken from photobioreactor at different CO₂ concentrations (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux; 24-hour illumination))

400 ppm_v CO₂ derişiminde ölçülen pH değerleri 5,18 ile 10,46 aralığında; %15 CO₂ derişiminde ölçülen pH değerleri 6,02 ile 6,83 aralığında ve %90 CO₂ derişiminde ölçülen pH değerleri 5,55 ile 5,88 aralığında değişim göstermiştir. Çalışılan CO₂ derişimlerine göre ölçülen pH aralıkları; Kong vd. (2010), Hulatt ve Thomas (2011) ve Yeh vd. (2010) tarafından elde edilen bulgular ile paralellik göstermektedir. Ortam havasını temsilen 400 ppm_v CO₂ derişimi deneylerinde ölçülen pH değerleri ve %15 CO₂ ile %90 CO₂ derişimlerinde (>%5 CO₂) yapılan deneylerde ölçülen pH değerlerinin bu çalışmada belirtilen pH aralıklarına oldukça yakın oldukları görülmektedir.

SET-III kapsamında en iyi verim eldesi 24 saat aydınlatma süresinde, %15 CO₂ derişiminde ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre belirlenen büyüme parametreleri Tablo 8'de verilmektedir. Barahoei vd. (2020) yaptıkları çalışmada %7 CO₂ derişimi altına kabarcık boyutlarının küçük olduğu koşullarda biyokütle derişimini 4 244 mg/L olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen maksimum biyokütle derişimi (1,46 mg/L; Tablo 8) ile kıyaslandığında, elde edilen yüksek biyokütle derişimi Barahoei vd. (2020) çalışmalarında kullanılan küçük kabarcık çapının CO₂ tutma verimliliği üzerindeki olumlu etkisi ile açıklanabilir.

Tablo 8. Farklı CO₂ derişimleri altında *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (7 000 lux; 24-hour illumination) (Kinetic parameters for *C. vulgaris* microalgae culture at different CO₂ concentrations (7 000 lux; 24-hour illumination))

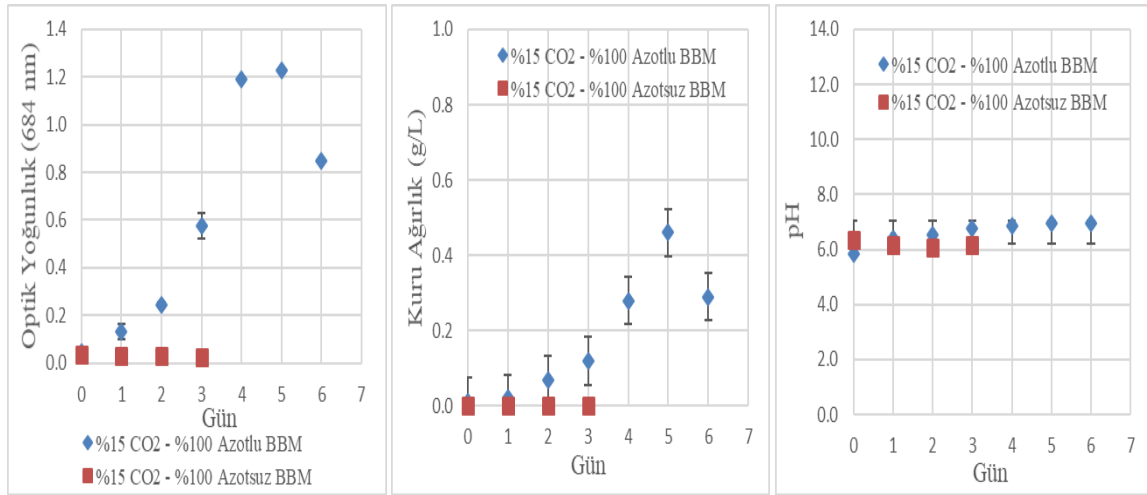
| CO ₂ , % | μ_{max} , 1/gün | X_{max} , g/L | P_{max} , g/L/gün | R_{CO_2} , g/L/gün |
|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| 0,04* | 0,39 | 0,29 | 0,06 | 10,63 |
| 15 | 0,31 | 1,46 | 0,35 | 53,72 |
| 90 | - | 0,01 | 0,00 | 0,37 |

* 400 ppm_v

4.4. Azot stresinin mikroalgal biyokütle büyüme verimine etkisi (Effect of nitrogen stress on microalgal growth)

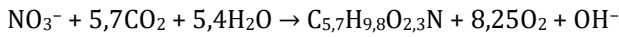
SET-I, SET-II ve SET-III deneyleri sonucunda elde edilen en iyi CO₂ giderim parametreleri (7 000 lux aydınlatma şiddeti, 24 saat süre aydınlatma şiddeti ve %15 CO₂ oranı) ile SET-IV deneyleri gerçekleştirilmiştir. "SET-IV: Azot Stresi" kapsamında ilk aşamada, %100 azotlu (BBM besiyeri ile) ve %100 azotsuz (besiyerindeki tüm azot içeren bileşenler (NaNO₃, EDTA ve Co(NO₃)₂.6H₂O) çıkarılmıştır) ortamlarda mikroalg yetiştirme deneyleri tamamlanmış olup, deneyler sonunda alınan numunelerde RuBisCO ve lipid ölçümleri yapılmıştır.

Şekil 5'te verilen OD ve kuru ağırlık (biyokütle) değerleri incelendiğinde %15 CO₂ derişimi altında %100 azotlu ortamda mikroalglerde normal bir büyüme eğrisinin olduğu görülürken, %100 azotsuz (%100 azot stresi) ortamda yetiştirilen mikroalglerin inhibe olup, büyümedikleri gözlemlenmiştir. Biyokütle derişimi, artan azot miktarı ile doğru orantılı bir ilişki içerisinde (Markou vd. 2017, Yodsuwan vd. 2017). Azotsuz ortam deneyinde azalan azot miktarına karşılık olarak OD değerlerinde ve biyokütle derişiminde azalma gerçekleşmesi stres ortamındaki yetiştirme sonucunda beklenen bir durumdur.



Şekil 5. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin OD, kuru ağırlık ve pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂) (Change of OD, dry weight and pH values of microalgae samples taken from photobioreactor at 15% CO₂ concentration under 100% nitrogen and 100% nitrogen stress conditions (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂))

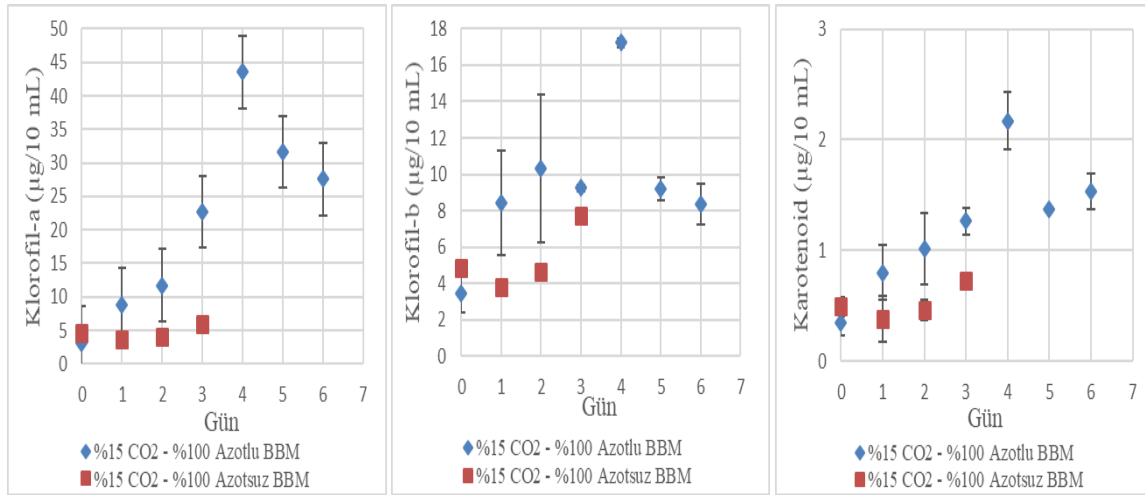
%15 CO₂ derişimi altında yapılan %100 azotlu ve %100 azotsuz deneylerde ölçülen pH değerlerine ait grafik Şekil 5'te verilmiştir. Azotsuz ortamın pH değerlerinin optimum alg büyümesini sağlayacak değerlere ulaşmadığı ve tam tersine bir düşüş gerçekteştiği ve alglerin büyümediği görülmektedir. Nitrat (NO₃⁻) kullanımı ile kültür ortamının pH değeri ve mikroalg büyümesi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Fotosentez aşamasında alglerin nitratı bünyelerine alıp kullanmaları sonucunda ortam pH'sında artış gözlenmektedir (Markou vd. 2017). Teorik olarak bir mol NO₃⁻ kullanımı karşılığında, 1 mol hidroksit (OH⁻) üretimi gerçekteşmektedir (Rashid vd. 2014; Song vd. 2011). Gerçekteşen tepkime Tepkime 2'de gösterilmektedir.



(Tepkime 2)

Fazla NO₃⁻ kullanımı sonucunda fazla OH⁻ üretilmesi ile pH değeri 10'un üzerine çıkabilmektedir. pH 10'un üzerinde alglerin büyümelerini inhibe edici etki gösterebilmektedir. Bunun yanısıra NO₃⁻ eksikliğine bağlı olarak da pH değerinde düşüş gerçekteşmektedir. NO₃⁻ miktarına bağlı olarak, optimum değerlerde büyümeyi sağlayabilmek için pH dengelenmesi daha iyi bir verim eldesi sağlayabilmektedir (Elcik ve Çakmakçı 2017).

%15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin Şekil 5'te verilen OD değerleri ile paralellik gösterdikleri net bir şekilde görülmektedir. İyi bir büyüme, iyi bir OD ve iyi bir klorofil değeri eldesi demektir. SET-IV deneylerinin ilk aşaması olan %15 CO₂ derişimi altında %100 azotlu ortamda hızlı bir büyüme ve hızlı bir ölüm ile deney sonuçlandırılırken, azotsuz ortamda alglerin inhibe olması nedeniyle deney kısa sürede sonlandırılmıştır. Azotsuz ortamda algler büyütüldüklerinde; protein, karotenoid ve klorofiller gibi azot bakımından zengin biyomoleküllerin üretiminde azalma meydana gelmektedir. Tam tersi olarak da, karbonhidrat ve lipitler gibi karbon bakımından zengin biyomoleküllerin birikiminde stres ortamında artış gerçekteşmektedir. Fakat azot stresi ortamında istenilen (örneğin lipit) bileşiğin miktarında artış gerçekteşse de biyokütle oranında azalma olması yapılan çalışmalar neticesinde ortaya konulmuştur (Markou vd. 2017; Münkel vd. 2013; Stephenson vd. 2010). SET-IV kapsamında yapılan azotlu ve azotsuz ortamda yetiştirilen alglerden elde edilen OD, kuru ağırlık (biyokütle), klorofil ve lipit değerleri bu verileri doğrulamaktadır.



Şekil 6. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂) (Change of chlorophyll-a, chlorophyll-b and carotenoid values of microalgae samples taken from photobioreactor at 15% CO₂ concentration under 100% nitrogen and 100% nitrogen stress conditions (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂))

Fotosentetik hücrelerde soğurulan ışık miktarı optimum doğunluk seviyesini aştığı zaman adaptasyon işlemleri bu noktada kritik bir hal alabilmektedir. Fotosentez süresince hücrelerde devam eden enerji akışını düşürmek amacıyla klorofil ve karotenoid gibi hücresel pigmentlerin içerik ve bileşimlerinde değişimler meydana gelmektedir. Karotenoidler, fotosentez esnasında fotonların yakalanması ve ışığın zararlı etkilerinden hücrenin korunması yönünden iki temel fonksiyona sahiptir (Kendirlioğlu 2012). Karotenoidler ayrıca, klorofiller gibi ışığın soğurularak klorofil-a'ya aktarılması ve ışık ve O₂ karşısında klorofillerin parçalanmasının (fotooksidasyon) önlenmesinde önemli etki sağlamaktadır. Bunu yanında azot stresi altında karotenoidler kloroplast yüzeyinde birikim yapıp, alge turuncu-kırmızı rengini vererek, azot yetersizliğinin fiziksel yönde etkisinin bilinmesine yardımcı olmaktadır (Kendirlioğlu 2012). Bu nedenle ortamdaki büyümenin iyi olduğu koşullarda klorofil-a ve klorofil-b pigmentlerine göre karotenoidler de paralel olarak değişim göstermektedir.

Pigment tarafından soğurma, ışık spektrumunun belirli kısımlarında daha yoğun olmaktadır. Pigmentin maksimum absorbans aralığı içinde bir dalga boyunun seçilmesinde, en büyük sinyali vermesi beklenir, ancak aynı zamanda hücrelerin pigment içeriği değiştiğinde en büyük hatayı da yine seçilen bu dalga boyu aralığında vermektedir. Healey (1975) yaptığı bir çalışma kapsamında; klorofil-a'nın kuru ağırlığa oranlarının tür kompozisyonundaki, sıcaklığındaki, besleyicideki ve ışık mevcudiyetindeki değişikliklerle 30 kattan fazla değiştiğini bildirmiştir. Bu çalışmada elde edilen pigment verileri bu görüşü doğrular niteliktedir. Büyüme parametrelerinde mikroalg gelişim fazlarına göre elde edilen veriler, klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinde görülememiştir. Fotobiyoreaktörde sıcaklık ayarının olmasına rağmen ısı değişimi olabilmekte ve gaz derişimleri değişim gösterebilmektedir. Bunların etkisiyle hassas olan pigmentlerin yapısında olan değişikliklerin, diğer parametrelere kıyasla daha çok etkilendiği ve değişim gösterdiği düşünölmektedir.

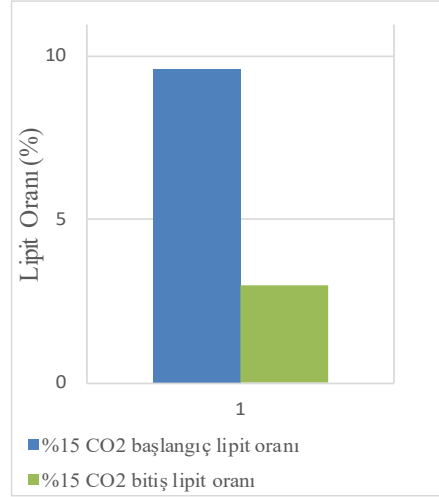
Kendirlioğlu vd. (2015) farklı aydınlatma sürelerinin (16:8, 17:7, 18:6, 19:5 ve 20:4 saat aydınlık/karanlık) *C. vulgaris* mikroalginin 2 000 lux aydınlatma şiddeti altındaki büyüme sürecinde hücre sayısı, klorofil ve protein miktarları üzerindeki etkisini incelemiştir. Maksimum toplam klorofil (klorofil-a ve klorofil-b) miktarı 235,53 µg/mL olarak 20:4 saatlik aydınlatma süresinde elde edilmiştir. Elde edilen maksimum toplam klorofil-a ve klorofil-b değerinin (235,53 µg/mL), bu çalışmada belirlenen toplam klorofil-a ve klorofil-b değerinden (140 µg/10 mL) yüksek olduğu görölmektedir. Bunun nedeni olarak, bu çalışmada kullanılan yüksek CO₂ derişiminin ve yüksek aydınlatma şiddetinin pigment değerlerinin azalmasında olumsuz etki yarattığı düşünölmektedir.

Hu vd. (2016) %10 CO₂ altında, pH 7,8 değerinde ve 4 070 lux aydınlatma şiddetinde, 12:12 aydınlık/karanlık periyodunda yetiştirilen on farklı *C. vulgaris* suşlarına ait klorofil-a verileri içerisinde en yüksek derişimin *FACHB-729* (*C. vulgaris regularis* var. *minima*), *FACHB-484* (*C. vulgaris* sp.), *FACHB-752* (*C. vulgaris* 64.01) ve *ESP-6* (*C. vulgaris*) kültürleri için sırasıyla 6,67 mg/L, 5,42 mg/L, 4,20 mg/L ve 4,05 mg/L olduğunu belirlemiştir. Hu vd. (2016) çalışmalarında elde edilen pigment değerlerinin bu çalışmada elde edilenlerden daha fazla olmasının sebebi pH'nin 7,8 seviyesinde olması ve bu durumun büyümei inhibe etmemiş olması olabilir.

Nautiyal vd. (2014), %0,04 CO₂ derişiminde, 12 saatlik aydınlatma süresinde ve 2 000 lux aydınlatma şiddeti altında, 25 ± 1 °C'de *Spirulina*, *Chlorella* ve havuz suyu algi ile yaptıkları çalışmada, en yüksek klorofil-a içeriğine *Chlorella*'nın (3,88 µg/mL) sahip olduğu belirlenmiştir. Nautiyal vd. (2014) tarafında elde edilen klorofil-a değerlerinin, bu çalışmada elde edilenlere kıyasla daha yüksek olmalarının da yüksek aydınlatma şiddetine göre

seçilen düşük CO₂ derişiminin daha iyi çözünürlük sağlarnasının ve yüksek foton enerjisini bünyesine alan mikroalglerin 12 saatlik karanlık sürede solunuma geçerek inhibe etkisini azaltmasını etkili olduğu tahmin edilmektedir.

C. vulgaris mikroalgi yapısındaki lipit oranı, alg kültürü fotobiyoreaktöre aktarılmadan önce ve fotobiyoreaktörde %15 CO₂ derişiminde ve %100 azotlu ortamda yetiştirildikten sonra ayrı ayrı belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Görüldüğü üzere; %15 CO₂ derişimindeki gelişim sonucunda mikroalg kültürünün lipit içeriğinde düşüş gerçekleşmiştir. Biyokütle artışına ters orantılı olarak, kültürün lipit üretiminde azalma meydana gelmektedir (Stephenson vd. 2010).



Şekil 7. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ortamda fotobiyoreaktörde gerçekleştirilen deney öncesinde ve sonrasında *C. vulgaris* mikroalg kültürüne ait lipit oranları (Lipit percentages of *C. vulgaris* microalgae culture before and after cultivation at 15% CO₂ concentration under 100% nitrogen condition)

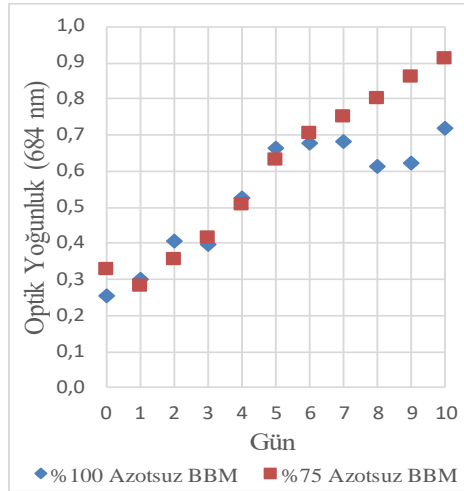
%15 CO₂ derişiminde, azot stresi altında yapılan deneylerde algler büyümemiş ve deneyler sonlandırılmıştır. Bu duruma, mikroalg kültürüne yüksek derişimde CO₂ verildiğinde mikroalg büyümesini etkileyen ağırlıklı olarak iki faktörün neden olduğu düşünülmektedir:

- 1) Mikroalglerin CO₂ alım kapasitesi (hücreye karbon tedariki) ve
- 2) pH

Yüksek gaz akışının sistemde yüksek bir oranda hızlı karışıma sebep olması neticesinde, CO₂ gazının fotosentez için hücre içine alınmasını engellediğine dair literatür çalışmaları bu bilgiyi doğrulamaktadır (Chisti 2007; Münkel vd. 2013; Stephenson vd. 2010). Azot stresi koşullarında mevcut besin yetersizliğinin yanısıra 100 mL/dk gaz akış oranında fotobiyoreaktöre yüksek CO₂ (%15) içeren gaz karışımının verilmesi büyüme üzerinde inhibe edici etki yaratabilmektedir. Bu koşullar, büyüme ortamının tipik olarak algler tarafından tolere edilemeyen asitleşmesine yol açabilmektedir. Ortamın pH değerinin düşmesi hücre dışı karbonik anhidrazın aktivitesini azaltmakta ve hücre büyümesini engellemektedir (Aslam vd. 2017; Tang vd. 2011). Birçok mikroalg türü ortamda CO₂'nin çözünmesiyle oluşan karbonik asitten kaynaklanan asidik koşullara dayanamamakta ve besin yetersizliğinin de etkisiyle büyüme gerçekleşmemektedir (Lam ve Lee 2011; Tang vd. 2011).

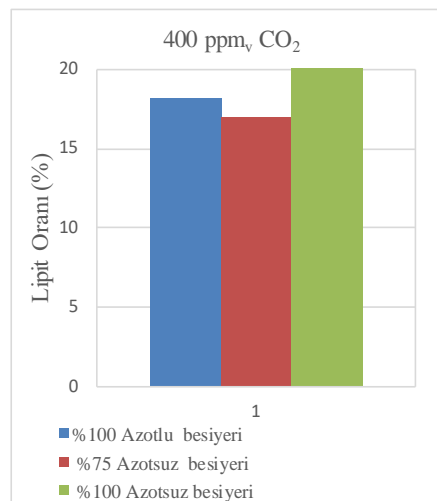
%15 CO₂ derişiminde %100 azot stresi şartlarında *C. vulgaris* mikroalg kültürünün fotobiyoreaktörde büyümemesi üzerine gaz karışımındaki CO₂ yüzdesinin büyümenin önünde bir engel oluşturup oluşturmadığını görmek amacıyla gaz karışımındaki CO₂ yüzdesi düşürülerek (400 ppm_v) deney tekrarlanmıştır. Fakat ikinci günden itibaren OD değerlerinde tekrar düşüş görülmüş ve bu durumu takiben büyüme inhibe olmuş ve sistem kapatılarak, deneye son verilmiştir. Kültürün bu şartlarda da büyümemesi üzerine kültürün erlenmeyerlerde üretilmesi aşamasına geçilmiştir. SET-IV deneylerinde ikinci aşama olarak, erlenmeyerler içerisinde 400 ppm_v CO₂ derişimi altında %100 azotsuz ve %75 azotsuz (sadece 4,505 g/L NaNO₃ var) ortamda mikroalg yetiştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda alınan numunelerde RuBisCO ve lipit ölçümleri yapılmıştır. Yaklaşık 10 gün boyunca alg büyümesi ve alg kültürünün lipit üretim potansiyeli gözlemlenebilmiştir. Şekil 8'de 400 ppm_v CO₂ derişimi altında erlenmeyer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalgere ait ölçülen OD değerlerine yer verilmiştir. %100 azotsuz ortamda 8. günün sonunda OD değerinde net bir düşüş gözlemlenmiştir. Fakat 9. günden itibaren OD değerinde tekrardan küçük miktarlarda artışlar ölçülmeye devam edilmiştir. İyi bir biyokütle eldesinde mikroalgin koyu yeşil renge ulaştığı yapılan deneyler kapsamında kazanılan bir deneyim olmuştur. %100 azot stresi ortamında yetişen mikroalgin yapısında artan lipit etkisiyle biyokütle

oranında azalma meydana gelmiş ve mikroalgin rengi sarı-yeşil tonunda bulanık ve partiküllü bir görüntüye ulaşmıştır. Bu sebeple; mikroalgin yapısında biriken lipid artışı ile OD değeri ölçümünde karanlık nokta oluştuğu ve yansıtıcı bir OD değeri ölçüldüğü düşünülmektedir. %75 azot stresi deneyin de ise, istikrarlı ve yavaş bir şekilde yaklaşık on iki günlük bir büyüme gerçekleşmiş ve mikroalgin rengi %100 azotsuz ortamda yetişen mikroalgin rengine göre daha koyu bir yeşile dönüşmüştür. %75 azot stresinin (%75 azotsuz) uygulandığı deneyde %100 azot stresinin (%100 azotsuz) uygulandığı deneye kıyasla 6. günden itibaren daha yüksek OD değerleri elde edilmiştir. OD değerlerine paralel olarak %100 azotsuz ortamda elde edilen biyokütle oranı, %75 azot stresi ortamında yetiştirilen mikroalglerin biyokütle eldesine oranla daha düşük olmuştur.



Şekil 8. 400 ppm_v CO₂ derişimi altında erlenmeyer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalglerin optik yoğunluk değerlerinin zamanla değişimi (Change of OD values of microalgae samples taken from an erlenmeyer flask at 400 ppm_v CO₂ concentration under 100% and 75% nitrogen stress conditions)

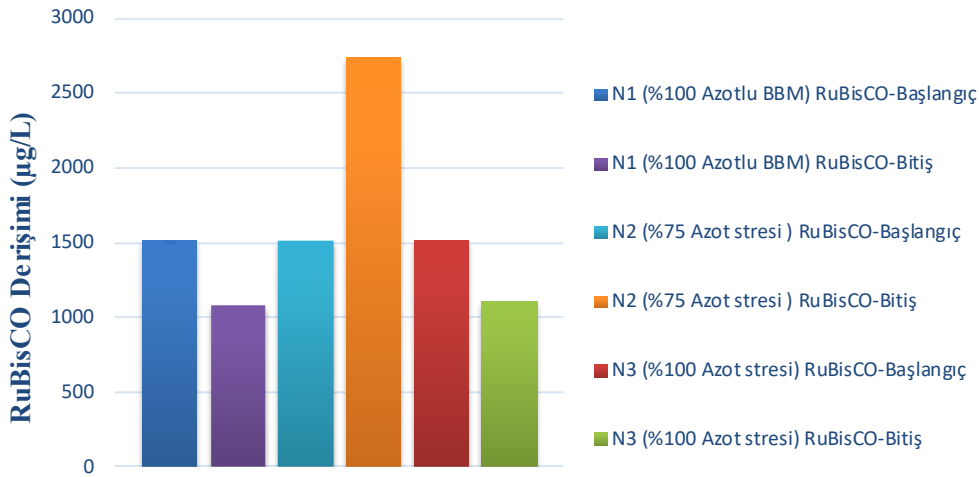
%100 azotsuz ortamda lipid yüzdesinin normal BBM besiyerinde ve %75 azotsuz ortamda büyüyen alglerden elde edilen lipid yüzdesinden daha fazla olduğu Şekil 9'da görülmektedir. Düşük CO₂ oranlarında daha iyi lipid eldesi sağlandığına dair çalışmalar mevcuttur (El-Sheekh vd. 2019, Miranda vd. 2015). Azot stresi, fotosentez prosesinde hücresel karbonun işlevinin protein üretiminden %20 ile %40 arasında değişen değerlerde lipid üretimine doğru yönelimi noktasında uyarıcı bir etki yapmaktadır. Bu durumda alg hücreleri klorofillerini hücre içi azot kaynağı olarak kullanarak daha fazla lipid üretimi gerçekleştirmektedir (Liu vd. 2008; Markou vd. 2017). Benzer sonuçlar içeren bir çalışmada (Miranda vd. 2016); mikroalglerin lipid üretimi için en uygun N, P ve tuz oranlarını belirlemek amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda en iyi lipid üretimi sağlayan değerlerin 0,04 g/L NO₃⁻ (%75 azot stresi), 0,01 g/L P (%75 fosfor stresi) ve 5,0 g/L sodyum klorür (NaCl) olduğu tespit edilmiştir. Bu optimal koşulları karşılayan değerlerde *Ankistrodesmus sp.* ve *Chlamydomonas sp.* ile gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre lipid asitleri verimi sırasıyla 2,1 ve 2,4 kat oranında artış göstermiştir. Ayrıca lipid üretim oranında gerçekleşen artışa ters olarak besin sınırlaması sebebiyle biyokütle eldesinde azalış görülmesi de daha önce yapılan literatür çalışmalarıyla desteklenmektedir (Li vd. 2008; Markou vd. 2017; Stephenson vd. 2010).



Şekil 9. 400 ppm_v CO₂ derişimi altında erlenmeyer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalglerin lipid oranları (Lipit percentages of microalgae samples taken from a Erlenmeyer flask at 400 ppm_v CO₂ concentration under 100% and 75% nitrogen stress conditions)

Şekil 10'da erlenmeyerler içerisinde farklı azot stresi koşullarında yapılan deneylerin başlangıç ve bitiş aşamalarında gerçekleştirilen RuBisCO analiz sonuçları verilmektedir. %100 azotlu ortamda yetiştirilen alglerin fotobiyoreaktöre aşılmanadan önce ve büyümeleri tamamlandıktan sonra yapılan RuBisCO ölçüm analiz sonuçlarına bakıldığında, enzim miktarında büyük bir oranda düşüş olduğu görülmektedir. Aynı deney kapsamında OD değerlerinin değişimi incelendiğinde kısa sürede hızlı bir büyüme sonrasında ölüm fazına geçiş olduğu ve yapılan tüm deney setlerinin sonuçları ile kıyaslandığında düşük bir biyokütle eldesinin mevcudiyeti tespit edilmiştir. İyi bir fotosentetik verim, iyi bir RuBisCO enzimi-CO₂ fiksasyon oranı ve buna bağlı olarak iyi bir biyokütle eldesi demektir. Düşük biyokütle oranına paralel olarak düşük RuBisCO miktarı elde etmek beklenen bir durum olarak değerlendirilmektedir. Protein üretimi yerine lipid üretiminde gerçekleşen artışla beraber RuBisCO miktarında azalış söz konusu olmaktadır.

Erlenmeyerde 400 ppm_v CO₂ derişimi altında %75 azot stresi ortamında yetiştirilen alglerin başlangıç RuBisCO miktarına (~1500 µg/L) göre deney sonunda ölçülen RuBisCO miktarında ~1,8 kat artış görülmüştür. %75 azotsuz ortamda büyüme %100 azotsuz ortama göre daha uzun süre devam etmiş ve biyoküttele artış olmuştur. Buna bağlı olarak RuBisCO oranında artış elde edilmiştir. Benzer artışın %100 azotlu ortamda da elde edilmesi beklenmiş, fakat %100 azotlu ortamda 5 günlük hızlı büyüme süresi ve 6. günde ani bir düşüşle kısa sürede ölüm fazına geçilmesi sebebiyle RuBisCO oranının beklenenden daha düşük seviyede ölçüldüğü tahmin edilmektedir. Deney kapsamındaki OD değerleri incelendiğinde yavaş oranlarda artan OD değerleri ile yavaş bir büyüme gerçekleştiği ve buna bağlı olarak biyoküttele bir artış olduğu belirlenmiştir. 400 ppm_v CO₂ derişimi altında %100 azotsuz ortamda yetiştirilen alglerin RuBisCO enzimlerine bakıldığında, %100 azotlu ortamda yetiştirilme öncesi ve sonrasındaki gibi enzim miktarında büyük bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, OD değerlerinde iyi bir artış olmaması, iyi bir büyümenin gerçekleşmemesi ve buna bağlı olarak iyi bir biyokütle verimi elde edilememesidir.



Şekil 10. Farklı azot kaynaklarında RuBisCO enzim miktarındaki değişimler (Concentrations of RuBisCO enzyme under different nitrogen sources)

5. Sonuçlar (Conclusions)

CO₂ derişiminin *C. vulgaris* mikroalg büyüme verimine etkisini incelemek amacıyla hacimce 400 ppm, %15 ve %90 CO₂ içeren gaz karışımları altında deneyler gerçekleştirilmiştir (7 000 lux; 24 saat aydınlık). %15 CO₂'de kuru ağırlık değeri (max 1,47 g/L) 400 ppm_v'e göre 5 kat fazla verimle elde edilmiştir. %15 CO₂ içeren gaz karışımı için mikroalg üreme verimliliği ve CO₂ tutma verimi sırasıyla 0,14 g/L/gün ve 0,25 g/L/gün olarak belirlenmiştir. Fotobiyoreaktöre verilen gaz karışımındaki CO₂ oranının %90'a çıkarılması büyümeyi engellemiştir. Bu durumun alg kültürüne verilen gaz karışımındaki CO₂ gazının kademeli olarak arttırılması ile önlenebileceği düşünülmektedir.

Azot stresi kapsamında, ilk aşamada; fotobiyoreaktöre aşılana *C. vulgaris* mikroalgi, %15 CO₂ derişimi altında ve %100 azotlu ortamda büyümeye bırakılmıştır. Başlangıç kuru ağırlık değeri 0,01 g/L iken 5. gün sonunda alg kültürü derişimi 46 kat artarak 0,46 g/L olmuştur. %100 azotlu ortamda lipid oranı başlangıçta %10 iken, deney sonunda %3 oranında belirlenmiştir. Fotobiyoreaktör içerisinde %15 CO₂ derişimi altında ve %100 azotsuz ortamda üç gün boyunca yapılan OD değerlerinde hiçbir artış gerçekleşmemiş, büyüme inhibe olmuştur. %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktöre verilen CO₂ derişiminin yüksek olması ve ortamdaki besin yetersizliği büyümeyi engellemiş olabilir. %15 CO₂ derişimi altında azot stresi ortamında iyi bir büyüme verimi elde edilememesi üzerine, *C. vulgaris* mikroalgi bir erlenmeyer içerisinde 400 ppm_v CO₂ derişiminde %75 ve %100 azot stresi şartlarında büyümeye bırakılmıştır. %100 azotsuz ortamda yetişen mikroalgin yapısında artan lipid etkisiyle

biyokütle oranında azalma meydana gelmiştir. %75 azotsuz ortamda %100 azotsuz ortama göre 1,3 kat daha iyi büyüme verimi elde edilmiştir. Ayrıca, %75 azotsuz deneyde %100 azotsuz ortama göre 2,5 kat daha yüksek RuBisCO oranı belirlenmiştir. %100 azotsuz deneyde ise %75 azotsuz ortama göre 1,2 kat daha yüksek lipit oranı elde edilmiştir.

Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, kömürle çalışan termik santrallerin baca gazını temsil eden gaz karışımında (%15 CO₂ içeren CO₂+N₂+O₂ karışımı) fotobiyoreaktörde yetiştirilen mikroalgelerde 7 000 lux aydınlatma şiddetinde ve 24 saat aydınlatma süresince azot stresinin uygulanmadığı durumda iyi bir büyüme verimi elde edilmiştir. Azot stresi deneylerinde ise, yüksek CO₂ derişimine (%15) kıyasla düşük CO₂ derişimi (400 ppm_v) altında lipit üretim veriminde artış elde edilmiştir. 400 ppm_v CO₂ derişiminde biyokütle ve klorofil oranında kademeli bir azalma söz konusuysen, lipit üretiminde bir artış meydana gelmiştir. Lipit verimindeki artışa paralel olarak RuBisCO enziminde düşüş gerçekleşmiştir. Bu bilgiler, azot stresi ile elde edilecek lipit oranını arttırmak için RuBisCO aktivitesini azaltıcı koşulların oluşturulmasına yönelik çalışmalara bir alt yapı niteliği taşımaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2019-4865 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahmad, A.L., Yasin N.H., Mat C.J.C., Derek Lim, J.K. 2011. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15: 584-593.
- Amaro, H.M., Guedes, A.C., Malcata, F.X. 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Appl Energy*, 88: 3402-3410.
- Anjos, M., Fernandes, B.D., Vicente, A.A., Teixeira, J.A., Dragone, G. 2013. Optimization of CO₂ bio-mitigation by *Chlorella Vulgaris*. *Bioresource Technology*, 139: 149-154.
- Aslam, A., Thomas-Hall S.R., Mughal, T.A., Schenk, P.M. 2017. Selection and adaptation of microalgae to growth in 100% unfiltered coal-fired flue gas. *Bioresource Technology*, 233: 271-283.
- Aviva Systems Biology 2005. RuBisCo ELISA Kit (Plant) (OKCA00374) Instructions for use. <https://www.avivasysbio.com/pub/media/pdf/products/OKCA00374.pdf>. [Son erişim tarihi: 19.04.2021].
- Barahoei, M., Hatamipour, M.S., Afsharzadeh, S. 2020. CO₂ capturing by *C. vulgaris* in a bubble column photo-bioreactor; Effect of bubble size on CO₂ removal and growth rate. *J. CO₂ Util*, 37: 9-19.
- Bischoff, H.W., Bold, H.C. 1963. Phycological studies IV. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. *Phycol. Stud. (University of Texas)* 4 (6318): (1)-95.
- Bligh, E.G., Dyer, W.J. 1959. A Rapid Method of Total Lipid Extraction and Purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37: 911-917.
- Bogless, C.D. 2014. Optimization of Growth Parameters for Algal Regrowth Potential Experiments. M.Sc. Thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo/CA-USA.
- Brown, M.L., Zeiler, K.G. 1993. Aquatic biomass and carbon dioxide trapping. *Energy Convers. Manage*, 34: 1005-1013.
- Chávez-Fuentes, P., Ruiz-Marin, A., Canedo-López, Y. 2018. Biodiesel synthesis from *C. vulgaris* under effect of nitrogen limitation, intensity and quality light: estimation on the based fatty acids profiles. *Mol Biol Rep*, 45, 1145-1154.
- Chen, C.Y., Yeh, K.L., Aisyah, R., Lee, D.J., Chang, J.S. 2011. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource technology*, 102: 1, 71-81.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25 (3): 294-306.
- Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Huang, T.T., Lin, C.J., Ong, S.C., Chen, C.D., Chang, J.S. and Lin, C.S. 2011. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella sp.* Cultures. *Bioresource Technology*, 102: 9135-9142.
- Daliry, S., Hallajisani, A., Mohammadi, Roshandeh, J., Nouri, H., Golzary, A. 2017. Investigation of optimal condition for *C. vulgaris* microalgae growth. *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 3 (2): 217-230.
- Dukarte, J.H., de Moraes, E.G., Radmann, E.M., Costa, J.A.V. 2017. Biological CO₂ mitigation from coal power plant by *Chlorella fusca* and *Spirulina sp.* *Bioresource Technology*, 234, 472-475.
- Elcik, H., Çakmakçı, M. 2017. Mikroalglerden Yenilenebilir Biyoyakıt Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (3).
- El-Sheekh, M.M., Gheda, S.F., El-Sayed, A.E.K.B., Abo Shady, A.M., El-Sheikh, M.E., Schagerl, M. 2019. Outdoor cultivation of the green microalga *C. vulgaris vulgaris* under stress conditions as a feedstock for biofuel. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (18): 18520-18532.
- García-Cubero, R., Moreno-Fernández, J., García-González, M. 2017. Potential of *Chlorella vulgaris* to Abate Flue Gas. *Waste and Biomass Valorization*. DOI: 10.1007/s12649-017-9987-9.
- Goli, A., Shamiri, A., Talaiekhosani, A., Eshtiagh, N., Aghamohammadi, N., Aroua, M.K. 2016. An overview of biological processes and their potential for CO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, 183: 41-58.

- Griffiths, M.J., Garcin, C., Hille, R.P., Harrison, S.T.L. 2011. Interference by pigment in the estimation of microalgal biomass concentration by optical density. *Journal of Microbiological Methods*, 85: 119-123.
- Gürol, M.D., Soydemir, G., Şen, Ü.K., Say, N., Şen Ü. 2014. Mikroalglerden biyoyakıt üretim potansiyeli. *Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı*, 69-78.
- Han, F., Pei, H., Hu, W., Song, M., Ma, G., Pei, R. 2015. Optimization and lipid production enhancement of microalgae culture by efficiently changing the conditions along with the growth-state. *Energy Conversion and Management*, 90: 315-322.
- Healey, F.P. 1975. Physiological indicators of nutrient deficiency in algae. Tech. Rep. 585. Department of the Environment, Fisheries and Marine Service Research and Development Directorate, Winnipeg, Man.
- Hu, X., Zhou, J., Liu, G., Gui, B. 2016. Selection of microalgae for high CO₂ fixation efficiency and lipid accumulation from ten *C. vulgaris* strains using municipal wastewater, *Journal of Environmental Sciences*, 46: 83-91.
- Huang, G., Wang, J., Kuang, Y., He, H. 2016. Effects of SO₂ and NO₂ in Flue Gas on CO₂ Sequestration and Intracellular Microstructures Analysis of *Chlorella sp.* Research & Reviews: *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 5 (3): 60-67.
- Hulatt, C.J., Thomas, D.N. 2011. Productivity, carbon dioxide uptake and net energy return of microalgal bubble column photobioreactors. *Bioresource Technology*, 102 (10): 5775-5787.
- IEA 2017. Key World Energy Statistics. Sayfa 54. Paris: OECD/IEA.
- Jeong, M.J., Gillis, J.M., Hwang, J.Y. 2003. Carbon dioxide mitigation by microalgal photosynthesis. *Bulletin- Korean Chemical Society*, 24: 1763-1766.
- Kao, C.Y., Chen, T.Y., Chang, Y.B., Chiu, T.W., Lin, H.Y., Chen, C.D., Lin, C.S. 2014. Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella sp.* *Bioresource Technology*, 166, 485-493.
- Kendirlioğlu, G. 2012. *Chlorella Vulgaris*'in Hücre Sayısı, Klorofil Miktarı ve Büyüme Hızına Aydınlanma Süresinin Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Kendirlioğlu, G., Ağırman, N., Cetin, A.K. 2015. The effects of photoperiod on the growth, protein amount and pigment content of *Chlorella Vulgaris*. *Turkish Journal of Science & Technology*, 10 (2): 7-10.
- Khoeyi, Z.A., Seyfabadi J., Ramezanpour, Z. 2012. Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, *Chlorella Vulgaris*. *Aquacult. Int.*, 20 (1): 41-49.
- Kitaya, Y., Azuma, H., Kiyota, M. 2005. Effects of temperature, CO₂/O₂ concentrations and light intensity on cellular multiplication of microalgae, *Euglena gracilis*. *Advances in Space Research*, 35 (9): 1584-1588.
- Kong, Q.X., Li, L., Martinez, B., Chen, P., Ruan, R. 2010. Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production. *Appl Biochem Biotechnol*, 160: 9-18.
- Lam, M.K., Lee, K.T. 2012. Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, 30 (3): 673-690.
- Li, Y., Horsman, M., Wang, B., Wu, N., Lan, C.Q. 2008. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 81 (4): 629-636.
- Liu, Z., Wang, G., Zhou, B., 2008. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella Vulgaris*. *Bioresour Technol*, 99: 4717-4722.
- Markou, G., Dao, L.H.T., Muylaert, K., Beardall, J. 2017. Influence of different degrees of N limitation on photosystem II performance and heterogeneity of *Chlorella Vulgaris*. *Algal Research*, 26: 84-92.
- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 217-232.
- Menteşe, S., Çotuker, O., 2021. Partikül madde, karbon monoksit ve karbondioksit seviyelerinin iç ve dış ortamlarda değişimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9 (3), 723-734. DOI: 10.21923/jesd.811053.
- Miranda, C.T., Pinto, R.F., Lima, D.V.N., Viegas, C.V., Costa S.M., Azevedo, S.M.F.O. 2015. Microalgae Lipid and Biodiesel Production: A Brazilian Challenge. *American Journal of Plant Sciences*, 6: 2522-2533.
- Miranda, C.T., Lima, D.V.N., Atella, G.C., Aguiar, P.F., Azevedo, S.M.F.O. 2016. Optimization of Nitrogen, Phosphorus and Salt for Lipid Accumulation of Microalgae: Towards the Viability of Microalgae Biodiesel. *Natural Science*. 8: 557-573.
- Míguez, J.L., Porteiro, J., Pérez-Orozco, R., Patiño, D., Rodríguez, S. 2018. Evolution of CO₂ capture technology between 2007 and 2017 through the study of patent activity. *Applied Energy*. 211: 1282-1296.
- Montoya, O., Casazza, A.A., Aliakbarian, B., Perego, P., Converti, A., de Carvalho, J.C.M. 2014. Production of *Chlorella Vulgaris* as a source of essential fatty acids in a tubular photobioreactor continuously fed with air enriched with CO₂ at different concentrations. *Biotechnology Progress*, 30 (4): 916-922.
- Morais, M.G., Costa, J.A.V. 2007. Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 48: 2169-2173.
- Münkel, R., Schmid-Staiger, U., Werner, A., Hirth, T. 2013. Optimization of outdoor cultivation in flat panel airlift reactors for lipid production by *Chlorella Vulgaris*. *Biotechnology and Bioengineering*, 110 (11): 2882-2893.
- Nakamura, C.E., Whited, G.M. 2003. Metabolic engineering for the microbial production of 1,3-propanediol. *Current Opinion in Biotechnology*, 14 (5): 454-459.
- Nautiyal, P., Subramanian, K.A., Dastidar, M.G. 2014. Production and characterization of biodiesel from algae. *Fuel Processing Technology*, 120, 79-88.
- NOAA 2021. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Monthly Average Mauna Loa CO₂. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. [Son erişim tarihi: 05.06.2021].
- Öğüt, H., Oğuz, H. 2006. Üçüncü Milenyum Yakıtı Biyodizel, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 190 s.
- Parsons, T.R., Strickland, J.D.H. 1972. A practical handbook of seawaters analysis. *Bull Fish Res Bd Can*, 167: 1-20.
- Pegallapati, A.K., Nirmalakhandan, N. 2013. Internally illuminated photobioreactor for algal cultivation under carbon dioxide-supplementation: Performance evaluation. *Renewable Energy*, 56: 129-135.
- Rashid, N., Rehman, M.S.U., Sadiq, M., Mahmood, T., Han, J.I. 2014. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 40: 760-778.

- Rendon, S.M., Roldan, G.C.J.C., Paul Voroney, R. 2013. Effect of carbon dioxide concentration on the growth response of *Chlorella vulgaris* under four different led illumination. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 2013, 2, 125-131.
- Rodrigues, L.H.R., Arenzon, A., Raya-Rodriguez, M.T., Fontoura, N.F. 2011. Algal density assessed by spectrophotometry: A calibration curve for the unicellular algae *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3 (8): 225-228.
- Ryu, H.J., Oh, K.K., Kim, Y.S. 2009. Optimization of the influential factors for the improvement of CO₂ utilization efficiency and CO₂ mass transfer rate. *J. Ind. Eng. Chem.*, 15: 471-475.
- Sadeghizadeh, A., Farhad, F., Moghaddasi, L., Rahimi, R. 2017. CO₂ capture from air by *Chlorella Vulgaris* microalgae in an airlift photobioreactor. *Bioresource Technology*, 243: 441-447.
- Scarsella, M., Belotti, G., De Filippis, P., Bravi, M. 2010. Study on the optimal growing conditions of *Chlorella Vulgaris* in bubble column photobioreactors. *Chemical Engineering Transactions*, 20: 85-90.
- Sibi, G., Shetty, V., Mokashi, K. 2016. Enhanced lipid productivity approaches in microalgae as an alternate for fossil fuels – A review. *Journal of the Energy Institute*, 89 (3): 330-334.
- Song, W., Rashid, N., Choi, W., Lee, K. 2011. Biohydrogen production by immobilized *Chlorella sp.* using cycles of oxygenic photosynthesis and anaerobiosis. *Bioresour. Technol.*, 102 (18): 8676-8681.
- Stephenson, A.L., Dennis, J.S., Howe, C. J., Scott, S.A., Smith, A.G. 2010. Influence of nitrogen-limitation regime on the production by *Chlorella Vulgaris* of lipids for biodiesel feedstocks. *Biofuels*, 1 (1): 47-58.
- Sung, K.D., Lee, J.S., Shin, C.S., Park, S.C. 1998. Enhanced cell growth of *sp. KR-1* by the addition of iron and EDTA. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 8: 409-411.
- Sutherland, D., Craggs, R., Campbell, H. 2012. Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *J. Appl. Phycol.*, 24: 329-337.
- Sutherland, D.L., Howard-Williams, C., Turnbull, M.H., Broady, P.A., Craggs, R.J. 2013. Seasonal variation in light utilisation, biomass production and nutrient removal by wastewater microalgae in a full-scale high-rate algal pond. *J. Appl. Phycol.*, 26: 1317-1329.
- Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., Zhong, J. 2011. CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Bioresource Technology*, 102 (3): 3071-3076.
- Taştan, B.E., Duygu, E., İlbaş, M., Dönmez, G. 2013. Utilization of LPG and gasoline engine exhaust emissions by microalgae. *Journal of Hazardous Materials*, 246-247: 173-180.
- Taştan, B.E., Duygu, E., İlbaş, M., Dönmez, G. 2016. Enhancement of microalgal biomass production and dissolved inorganic C fixation from actual coal flue gas by exogenous salicylic acid and 1-triacontanol growth promoters. *Energy*, 103: 598-604.
- TÜİK 2021. Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2019. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2019-37196> [Son erişim tarihi: 14.06.2021].
- Ullah, K., Ahmad, M., Sharma, V.K., Lu, P., Harvey, A., Zafar, M., Sultana, S., Anyanwu, C.N. 2014. Algal biomass as a global source of transport fuels: Overview and development perspectives. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24: 329-339.
- Usui, N., Ikenouchi, M. 1997. The biological CO₂ fixation and utilization project by RITE (1) Highly-effective photobioreactor system. *Energy Convers. Manag.* 38, S487-S492.
- Utex 2019. Culture Collection of Algae at the University of Texas at Austin. <https://utex.org/>. [Son erişim tarihi: 25.12.2019].
- Wahidin, S., Idris, A., Shaleh, S.R. 2013. The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis sp.* *Bioresource Technology*, 129: 7-11.
- Wong, Y.K., Ho, K.C., Tsang, Y.F., Wang, L., Yung, K.K.L. 2016. Cultivation of *Chlorella vulgaris* in column photobioreactor for biomass production and lipid accumulation. *Water Environment Research*, 88 (1), 40-46.
- Yaakob, M.A., Mohamed, R.M.S.R., Al-Gheethi, A., Aswathnarayana Gokare, R., Ambati, R.R. 2021. Influence of Nitrogen and Phosphorus on Microalgal Growth, Biomass, Lipid, and Fatty Acid Production: An Overview. *Cells*, 10, 393.
- Yeh, K.L., Chang, J.S., Chen, W. 2010. Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella Vulgaris ESP-31*. *Engineering in Life Sciences*, 10 (3): 201-208.
- Yıldız, İ., Çalışkan, H., 2020. Motor yüküne bağlı olarak biyodizel yakıtlı bir dizel motorun enerji ve ekserji analizi sonuçlarının değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (3), 833-843. DOI: 10.21923/jesd.775787.
- Yodsuwan, N., Sawayama, S., Sirisansaneeyakul, S. 2017. Effect of nitrogen concentration on growth, lipid production and fatty acid profiles of the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Agriculture and Natural Resources*, 51 (3): 190-197.
- Yusuf, N.N.A.N., Kamarudin, S.K., Yaakub, Z. 2011. Overview on the current trends in biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 52 (7): 2741- 2751.
- Zhu, L.D., Li, Z.H., Hiltunen, E. 2016. Strategies for Lipid Production Improvement in Microalgae as a Biodiesel Feedstock. *BioMed Research International*, 1-8.



HASTANE ATIKSULARINDAKİ MİKROKİRLETİCİLER VE MİKROKİRLETİCİLERİN MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE GİDERİMİ

İnci KARAKAŞ^{1,2*}, Yasemin KAYA², İlda VERGİLİ², Z. Beril GÖNDER², Gülsüm YILMAZ²

¹ Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Çevre Sağlığı Programı, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|---|
| <i>Hastane Atıksuyu, Mikrokirletici, MBR.</i> | Mikrokirleticiler, biyolojik olarak parçalanabilirliklerinin düşük olması sebebiyle ekosistemde birikme eğilimi göstermekte ve canlı hayatı için toksik, kanserojenik ve mutajenik etkileriyle büyük bir risk oluşturmaktadır. Yaygın olarak içme suları, yüzeysel sular ve yeraltı sularında da nanogram seviyesinde tespit edilen mikrokirleticiler; hastane atıksularında çok yüksek konsantrasyonlarda bulunabilmektedir. Ülkemizde hastane atıksuları doğrudan kanalizasyon sistemine verilerek, evsel atıksularla beraber ön arıtma yapılarak veya biyolojik atıksu arıtma tesisinde arıtıldıktan sonra alıcı ortama verilmektedir. Klasik atıksu arıtma yöntemleriyle atıksulardan giderilemeyen mikrokirleticilerin, ancak ileri atıksu arıtma yöntemleriyle giderimi mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, hastane atıksularındaki mikrokirleticilerin membran biyoreaktörde (MBR) giderimi ve işletme parametrelerinin giderim verimleri üzerine etkisi incelenmiştir. |

MICROPOLLUTANTS IN HOSPITAL WASTEWATER AND TREATMENT IN MEMBRANE BIOREACTORS

| Keywords | Abstract |
|---|--|
| <i>Hospital Wastewater, Micropollutants, MBR.</i> | Micropollutants tend to accumulate in the ecosystem due to their low biodegradability and pose a great risk for ecosystem with their toxic, carcinogenic and mutagenic effects. Generally micropollutants detected at ng levels even in drinking, surface and ground water might have very high concentrations in hospital wastewater. In our country, the hospital wastewater directly connected to sewage system is discharged into the receiving environment after treating in a pre-treatment or a biological wastewater treatment plant. Advanced treatment methods are needed for micropollutant removal since conventional methods could not be effective. In this study, the treatment of micropollutants in hospital wastewater in membrane bioreactor (MBR) system and the effects of operation parameters on the removal efficiency were evaluated. |

Alıntı / Cite

Karakas, I., Kaya, Y., Vergili, I., Gönder, Z. B., Yilmaz, G., (2022). Hastane Atıksularındaki Mikrokirleticiler ve Mikrokirleticilerin Membran Biyoreaktörlerde Giderimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 10(2), 722-739.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

I. Karakas, 0000-0002-3590-3395
Y. Kaya, 0000-0001-7360-8090
I. Vergili, 0000-0001-9083-3097
Z. B. Gönder, 0000-0002-3263-4425
G. Yilmaz, 0000-0002-7692-6024

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 17.04.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 22.02.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 09.03.2022 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Mikrokirleticiler günümüzde endüstriyel prosesler, tarımsal uygulamalar, günlük yaşam aktiviteleri gibi insan faaliyetleri sonucunda üretilen (Aemig vd., 2020) ve çok düşük konsantrasyonlarda dahi canlı yaşamı üzerinde toksisite, kalıcılık ve biyoakümüülasyon etkilerine sahip bileşikler olarak tanımlanmaktadır (Fent vd., 2006; Bebianno ve Gonzalez- Rey, 2015; Sangion ve Gramatica, 2016). Bu maddelerin büyük miktarlarda üretildiği,

* İlgili yazar / Corresponding author: inci.karakas@uskudar.edu.tr, +90-216-400-2222

kullanıldığı ve sucul çevrede kalıcı olabildiği düşünüldüğünde sorunun büyüklüğü daha da öne çıkmaktadır (Yamamoto vd., 2009). Son 20 yılda, yüzey sularında, yeraltı sularında ve atıksularda mikrokirleticilerin varlığı yaygın olarak tespit edilmektedir (Kasonga vd., 2021). Bu kirleticilerin, doğrudan ya da dolaylı olarak kentsel atıksular, endüstriyel deşarjlar, hastane kaynaklı deşarjlar, hayvancılık faaliyetleri ve yüzey akışları ile birlikte sucul ekosisteme girebildiği belirtilmektedir (Klatte vd., 2017; Yang vd., 2017; Noutsopoulos vd., 2019). Ekosisteme giren mikrokirleticiler içeriğindeki lipofilik moleküller sebebiyle, organizmalara kolaylıkla geçebilmekte ve insan sağlığı için büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Morehead vd., 2018). Atıksular çok çeşitli organik ve inorganik mikrokirleticiler içermektedir (Besha vd., 2017). Organik mikrokirleticiler; canlı organizmalar ve insanlar üzerinde kanserojenik etki, endokrin bozucu etki gibi bilinen etkilere sahiptir. İnorganik mikrokirleticiler de formlarına bağlı olarak kanserojenik etki, sinir sisteminin bozulması, mide sorunları, dermal patolojiler gibi sağlık üzerinde farklı etkiler oluşturmaktadır (Gwenzi vd., 2018).

Hastane atıksularının kompozisyonu nitelik olarak evsel atıksulara benzerlik göstermesinin yanında içerdiği mikrokirleticiler, dezenfektanlar ve laboratuvarlarda kullanılan çeşitli kimyasallar nedeniyle evsel atıksulardan daha problemlili atıksular olarak dikkate alınmalıdır. Su ortamlarında hastane kaynaklı mikrokirleticilerin bulunmasının nedenleri arasında; çeşitli hastalıklara karşı kullanılan ilaçların tamamen metabolize edilmeden vücuttan atılması ve klasik arıtma tesislerinde de yeterince arıtılmaması gösterilmektedir. Bu sebeple, atıksu arıtma tesisi çıkışında çok çeşitli mikrokirleticiler tanımlanmaktadır (Stülten vd., 2008; Zhang vd., 2008; Santos vd., 2009; Pal vd., 2010; Gros vd., 2012; Padhye vd., 2014; Comber vd., 2018). Mikrokirleticiler doğal ekosistemlere sürekli olarak deşarj edilmekte ve tüm yaşam döngüsü boyunca da sucul türleri etkilemektedir (Fent vd., 2006; Santos vd., 2010; Bebianno ve Gonzalez-Rey, 2015; Mezzelani vd., 2016a; b). İlk olarak ABD'de arıtılmış atıksularda 70'li yıllarda klofibratik asit, salisilik asit ve klofibratin metabolitleri tespit edilmiştir (Hignite ve Azarnoff, 1977). Yaklaşık 10 yıl sonra, İngiltere'de nehirlerde ve atıksu arıtma tesislerinin çıkış sularında kemoterapi ilaçlarının ve sentetik steroidlerin varlığı tespit edilmiştir (Aherne vd., 1985; Richardson ve Bowron, 1985). 90'lı yılların ortalarında su ekosistemlerindeki mikrokirleticilerin, analitik tekniklerin daha da ilerlemesiyle ng/L aralıklarında tespit edilebildiği belirtilmiştir (Santos vd., 2010). 2015 yılında yapılan çalışmayla ilaç kullanımının, dünya genelinde yılda 4500 kg doza ulaşacağı ve 2015 yılına kıyasla gelecekte %24 daha fazla olacağı; aynı zamanda, dünya nüfusunun %50'sinin günde kişi başına tüketmesi gerekenden daha fazla dozda ilaç tüketeceği belirtilmiştir (QuintilesIMSHealth, 2015). İnsan ve hayvan hastalıklarını tedavi etmek için yaygın olarak kullanılan antibiyotikler, atıksularda yüksek konsantrasyonda tespit edilmiştir (Li, 2014; Sabri vd., 2018). Antibiyotiklerin, suda çözünürlüklerinin yüksek olması sebebiyle çevre kirliliğinde önemli bir rol oynadığı vurgulanmıştır (Türkyılmaz vd., 2020). Bu sebeple antibiyotiklerin çevrede ortaya çıkması, antibiyotik dirençli bakterilerin (ADB) varlığı ve birikimine bağlı olarak çevre güvenliği ve halk sağlığı açısından ciddi risklere neden olmaktadır (Berendonk vd., 2015; Sharma vd., 2016). ADB'lerin atıksu arıtma tesisi çıkışındaki varlığı doğal ortamlar açısından ekolojik bir risk oluşturmaktadır (Zhu vd., 2018). Bu çalışmada, ekosistem ve hastane atıksularında mikrokirleticilerin varlığı ve bunların membran biyoreaktör (MBR)'lerdeki giderimleri araştırılarak; işletme parametrelerinin mikrokirletici giderimine etkisi değerlendirilmiştir.

2. Mikrokirleticilerin Ekosistemdeki Varlığı (Presence of Micropollutants in the Ecosystem)

Hastane atıksuları, sucul ekosistemdeki mikrokirleticiler için önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Doğrudan deşarj edilen veya arıtma tesislerinde yeterli seviyede arıtılmayan hastane atıksularından kaynaklanan mikrokirleticiler yüzeysel sulara, yeraltı sularına ve içme sularına ulaşması çevresel riskin büyüklüğünü daha net ortaya çıkarmaktadır. Su ortamındaki mikrokirleticiler, sedimentlerde de birikebilmektedir (Bebianno ve Gonzalez-Rey, 2015; Peake vd., 2016). Mikrokirleticilerin çevrede uzun süre kalıcı olması ve biyo-parçalanabilirliklerinin düşük olması yanında; toksik, kanserojenik ve mutajenik etkilere yol açtığı bilinmektedir. Bu nedenle, kirletici maddelerin suda yaşayan organizmalar üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla, çevredeki ekotoksik kimyasalların konsantrasyonlarının belirlenmesi ve toksisite değerlerinin karşılaştırılması gerekmektedir (Guruge vd., 2019).

Güneş ışınlarının etkisiyle sucul ekosistemde bulunan karbamazepin ve akridin gibi mikrokirleticilerin fotoliziyle toksik, mutajenik ve kanserojenik etkilerinde artış meydana gelmektedir (Chitescu vd., 2015; Ebele vd., 2017). Kontrollü laboratuvar koşullarında yapılan araştırmalarla yumuşakçaların, kabukluların ve balıkların mikrokirleticileri kendi bünyelerinde biriktirdikleri ve makroalg, yumuşakçalar, kabuklular ve farklı ekolojik kategorilere ait balıklar da dâhil olmak üzere tatlı sularda ve denizlerde çeşitli mikrokirleticilerin bulunduğu tespit edilmiştir (Almeida vd., 2014; Fong ve Ford, 2014; Alvarez Munoz vd., 2015; Liu vd., 2015; Mezzelani vd., 2016a; b). Mikrokirleticilerin çevresel risk değerlendirmesi (ÇRD) yapılması esnasında, bu bileşiklerin ana kaynağının atıksu arıtma tesislerinin olduğu varsayılmakta ve yüzeysel suda öngörülen çevresel konsantrasyon (ÖÇK) hesaplanmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde herhangi bir ilaç biyodegradasyonu meydana gelmemekte, yıllık tüketilen miktar zamana eşit olarak dağıtılmakta ve alan genelinde metabolizma dikkate alınmamaktadır (Mezzelani vd., 2018).

$$\text{Sucul ÖÇK (g/L)} = A \times (100 - R) / 365 \times P \times V \times D \times 100 \quad (1)$$

A = Yıllık tüketilen ilaç miktarı [kg]

R = Adsorpsiyon, buharlaşma, hidroliz, biyolojik bozunma veya diğer işlemler yoluyla çevreden uzaklaştırılan bileşiğin yüzdesi (%)

P = Değerlendirilen alandaki kişi sayısı

V = Kişi başına günlük atıksu miktarı (genellikle 0,15-0,30 m³ arasında)

D = Seyreltme faktörü (genellikle 10)

100 = Yüzde dönüşüm faktörü

Eşitlik 1’de ÖÇK değeri 0.01 µg/L'nin altındaysa, çevre için bir risk oluşturmayacağı vurgulanmaktadır. Bu değer üzerindeyse; ÖÇK/ÖEOK oranını değerlendiren bir analiz daha yapılacağı belirtilmektedir. ÖEOK; tipik olarak akut toksisite biyo deneyinden elde edilen Öngörülen Etkili Olmayan Konsantrasyon olarak tanımlanmaktadır. ÖÇK / ÖEOK <1 ise, bileşiğin seviyelerinin sucul ortam için bir risk oluşturma olasılığı bulunmayacağı belirtilmiştir (Directive, 2001/83 ve Regulation 726/2004).

Avrupa Komisyonunun 2008 yılındaki tebliğinde su ve toprağın ilaç kalıntıları tarafından kirletilmesinin, önlem alınması gereken bir çevre ve halk sağlığı problemi olduğu belirtilmektedir. Mikrokirleticileri içeren ürünlerin üretimi ve kullanımı, atıksu arıtma tesislerine ulaşan mikrokirletici miktarı üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca yerel yaygın hastalıklar belirli dönemlerde daha fazla spesifik ilaç tüketimine neden olabilmektedir. Ağızdan alınan ilaçlar insan vücudunda metabolize edilmekte ve daha sonra idrar ve dışkı yoluyla atılmaktadır. Ham atıksuda karşılaşılan mikrokirleticilerin konsantrasyonlarının idrar ve dışkı yoluyla atılan mikrokirleticilerle ilişkili olduğu belirtilmektedir. Çevrede risk oluşturma durumuna göre bir sıralama yapıldığında α-etinilestradiol, 17-β estradiol, estron, diklofenak, eritromisin, klaritromisin ve azitromisinin yüksek etkiye sahip olduğu görülmektedir (Benedetti vd., 2012).

Araştırmalar farklı iklim koşullarının etkisiyle, mikrokirleticilerin farklı konsantrasyonlarda çevrede bulunabileceğini göstermektedir (Kolpin vd., 2004). Mikrokirleticilerin atıksu arıtma tesislerindeki konsantrasyonlarıyla ilgili olarak bir diğer önemli noktanın birleşik kanalizasyon sistemi kullanıldığında atıksu girişinin akış düzenini etkilemesi sebebiyle yağmur suyu olduğu belirtilmektedir. Yağmur suyunun kanalizasyon içindeki bileşiklerin konsantrasyonlarını seyrelteceği düşünülmektedir. Çoğu mikrokirletici, atıksu arıtma tesislerinde 0.1 ile 10 µg/L aralığında değişebilen konsantrasyonlarda bulunmaktayken; bazı mikrokirleticiler (analjezik grubunda olan asetaminofen, anti-inflamatuar grubunda olan ibuprofen, naproksen ve bitkisel hormonlar grubunda olan salisilik asit), biyosit (triklosan), yüzey aktif madde (nonilfenol) nispeten daha yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır.

3. Hastane Atıksularının Özellikleri (Characteristics of Hospital Wastewater)

Hastane atıksuları, evsel nitelikli atıksuların yanı sıra; mikrokirleticileri de içeren atıksulardan oluşmaktadır. Evsel nitelikli atıksular yemekhane ve çamaşırhaneden kaynaklanmakta olup; mikrokirleticilerin temel kaynakları arasında laboratuvarlar, araştırma birimleri, ameliyathaneler ve polikliniklerden gelen atıksular yer almaktadır. Hastanelerde mevcut birimlere ve yapılan faaliyetlere bağlı olarak su tüketiminin evlerde kullanımına kıyasla daha büyük miktarda olduğu belirtilmektedir. Oluşan atıksu miktarı hastanedeki yatak kapasitesi, hastanenin yaşı, servisler (çamaşırhane, yemekhane gibi), tedavi birimlerinin sayısı ve tipi, iklim, kültürel ve coğrafik şartlara göre değişkenlik göstermektedir (Verlicchi vd., 2010). Hastane atıksularının içeriğinde genellikle röntgen kontrast maddeler, dezenfektanlar, ilaç aktif maddeler ve arıtma yüksek direnç gösteren mikrobiyolojik çeşitlilik yoğun olarak görülmektedir. Hastane atıksularındaki kirleticiler sınıflandırıldığında; ilaç aktif maddeler, (analjezikler ve anti-inflamatuarlar, anestezipler, antibiyotikler, psikiyatrik ilaçlar, beta blokerler, lipit düzenleyiciler, antihipertansifler) antifungallar, röntgen ilaçları, antineoplastikler, antiseptikler, antiviraller, hormonlar, reseptör antagonistleri ve uyarıcılar olduğu görülmektedir (Verlicchi vd., 2010). Hastane atıksuları makro ve mikro kirleticileri içermektedir. Makrokirleticiler başlıca BOİ₅, KOİ, azot ve fosfor bileşikleridir; mikrokirleticiler ise ilaç aktif maddeleri, pestisitler, adsorplanabilen organik halojenler, kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucular, bulaşıcı idrar/dışkı gibi biyolojik sıvılar, solventler gibi kirleticiler olarak tanımlanmaktadır (Gönder vd., 2021). Türkiyede hastane atıksularının karakterizasyonu ile ilgili bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Yılmaz vd., 2017; Aydın vd., 2019; Gönder vd., 2021; Hocaoglu vd., 2021). Yılmaz vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, makrokirleticilerin yanı sıra ilaç aktif maddeleri ve metabolitleri, korozyon önleyiciler ve pestisitler analiz edilmiştir. Atıksularda toksisite analizi ve çevresel risk değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada İstanbul’da bulunan Türkiye’nin en büyük iki tıp fakültesi hastanesinin ve bir eğitim araştırma hastanesinin atıksularında mikrokirletici ve toksisite analizleri yapılmıştır. Antibiyotikler ve analjezikler ve en yaygın tespit edilen mikrokirleticiler olarak tespit edilmiştir. Sık reçete edilen bir analjezik olan Parasetamol 3 hastanenin de atıksuyunda yüksek konsantrasyonlarda (65 µg/L) tespit edilmiştir. Araştırılan hastane atıksularından biri çok çeşitli ve yüksek konsantrasyonlarda antibiyotik içermesi nedeniyle antibiyotik dirençliliği açısından riskli olarak

değerlendirilmiştir. Türkiyede yapılan bir diğer çalışmada ise İstanbul'daki bir tıp fakültesi hastanesinin atıksuyunda makrokirleticilerin yanı sıra 20 antibiyotik, 8 analjezik ve antiinflamatuvar, 5 sitostatik madde, 7 β -bloker, 4 lipit düzenleyici, 13 psikiyatrik, 1 antidiyabetik, 1 reseptör antagonisti, 1 lokal anestezi, 1 antihipertansif ve 5 antihipertansif metaboliti, 8 hormon, 6 röntgen kontrast maddesi, 3 benzotriazol, 6 pestisit ile hastane atıksularındaki antibiyotik direnci araştırılmıştır (Gönder vd., 2021). Elde edilen sonuçlara göre; antibiyotik grubunda en yüksek konsantrasyonda sülfametoksazol (35 $\mu\text{g/L}$) ve metaboliti 4 N-asetil-sülfametoksazol (43 $\mu\text{g/L}$) saptanırken analjezik ve antiinflamatuvar grubunda yer alan parasetamol (210 $\mu\text{g/L}$) en yüksek konsantrasyonda tespit edilmiştir. İncelenen tüm mikrokirleticiler arasında hastane atıksuyundaki en yüksek konsantrasyona röntgen kontrast maddelerin sahip olduğu (3000 $\mu\text{g/L}$) vurgulanmıştır. Aydın vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, ülkemizdeki 16 farklı hastane atıksuyunda antibiyotikler analiz edilmiştir. Araştırılan antibiyotikler içinde en yüksek konsantrasyonlar azitromisin, klaritromisin ve siprofloksasin için ölçülmüştür. Hocaoglu vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada ise, hastane atıksuyunda makrokirleticiler için ayrıntılı karakterizasyon, metal analizleri ve adsorplanabilen organik halojenler (AOX) analizleri yapılmıştır. Ayrıca, ana organik kirleticilerin boyut dağılımı ve KOİ fraksiyonasyonu araştırılmıştır. Tablo 1'de hastane atıksularının bazı makrokirleticiler ve ilaç kalıntılarında kalan bazı mikrokirleticiler için karakterizasyonu özetlenmektedir.

Tablo 1. Hastane atıksularının karakterizasyonu (Characterization of hospital wastewater)

| Parametre | Birim | Konsantrasyon | Kaynak |
|--------------------|-----------------|--|---|
| pH | - | 6.58-8.63 7.47 \pm 0.21 5.6-7.2 | Aydın vd., 2019 Ouarda vd., 2019 Hocaoglu vd., 2021 |
| KOİ | mg/L | 500 155-405 633-1012 183-818 441 \pm 99 180-920 263-2325 | Verlicchi vd.,2010 Nguyen vd.,2017 Mir-Tutusaus vd.,2017 Aydın vd., 2019 Ouarda vd., 2019 Gönder vd., 2021 Hocaoglu vd., 2021 |
| TSS | mg/L | 160 120-400 27-125 193-284 100-430 102-1060 | Verlicchi vd.,2010 Verlicchi vd.,2015 Nguyen vd.,2017 Mir-Tutusaus vd.,2017 Gönder vd., 2021 Hocaoglu vd., 2021 |
| NH ₄ -N | mg/L | 3-11.2 9.9-36 21-58 25-55 | Nguyen vd.,2017 Mir-Tutusaus vd.,2017 Gönder vd., 2021 Hocaoglu vd., 2021 |
| TKN | mg/L | 5-80 11.4-32.5 35-90 38-105 | Verlicchi vd.,2010 Nguyen vd.,2017 Gönder vd., 2021 Hocaoglu vd., 2021 |
| PO ₄ -P | mg/L | 6-19 0.5-1.3 3-7.1 | Verlicchi vd.,2015 Mir-Tutusaus vd.,2017 Gönder vd., 2021 |
| TP | mg/L | 0.2-13 1-3 3.8-10 0.7-15.5 | Verlicchi vd.,2010 Nguyen vd.,2017 Gönder vd., 2021 Hocaoglu vd., 2021 |
| AOX | $\mu\text{g/L}$ | 1371 550-10000 775-2200 3200-32000 | Verlicchi vd.,2010 Verlicchi vd.,2015 Gönder vd., 2021 Hocaoglu vd., 2021 |
| Parasetamol | $\mu\text{g/L}$ | 7.4-65 41-210 | Yılmaz vd., 2017 Gönder vd., 2021 |
| Diklofenak | $\mu\text{g/L}$ | 0.62-2.3 0.16 \pm 0.05 0.1-11 | Yılmaz vd., 2017 Ouarda vd., 2019 Gönder vd., 2021 |
| İbuprofen | $\mu\text{g/L}$ | 0.6 20 \pm 3 8 | Yılmaz vd., 2017 Ouarda vd., 2019 Gönder vd., 2021 |
| Sülfametoksazol | $\mu\text{g/L}$ | 8.5 0.0015-0.373 3 \pm 3 6.7-35 | Yılmaz vd., 2017 Aydın vd., 2019 Ouarda vd., 2019 Gönder vd., 2021 |

| | | | |
|-----------------------|------|---|---|
| Klaritromisin | µg/L | 0.1-15 0.0015-2.07 0.06 ± 0.05 1.8-8.4 | Yılmaz vd., 2017 Aydın vd., 2019 Ouarda vd., 2019 Gönder vd., 2021 |
| Karbamazepin | µg/L | 0.1-1.2 0.62 ± 0.80 0.54-2.5 | Yılmaz vd., 2017 Ouarda vd., 2019 Gönder vd., 2021 |
| Bisphenol A | µg/L | 0.9-3.4 14 | Cruz-Morató vd., 2014 Gönder vd., 2021 |
| 17-α-Estradiol | µg/L | 0.031 | Gönder vd., 2021 |
| 17-α-Ethinylestradiol | µg/L | 0.03-0.4 0.68 | Lin ve Tsai, 2009 Gönder vd., 2021 |
| 17-β-Estradiol | µg/L | 0.03-2 0.14 | Lin ve Tsai, 2009 Gönder vd., 2021 |
| Ioheksol | µg/L | <20-1700 1.9-1000 | Weissbrodt vd., 2009 Gönder vd., 2021 |
| Iopamidol | µg/L | <10-1120 0.6-64 | Weissbrodt vd., 2009 Gönder vd., 2021 |
| Iopromide | µg/L | <5-1390 37-3000 | Weissbrodt vd., 2009 Gönder vd., 2021 |

4. Hastane Atıksularının Arıtma Yöntemleri (Treatment Methods of Hospital Wastewater)

Günümüzdeki koşullar dikkate alındığında, hastane atıksuları konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde evsel atıksularla birlikte kısmen arıtmakta hatta bazı ilaç kalıntıları arıtılmadan sistemi terketmektedir. Hastane atıksularının yönetiminde uygulanan 4 farklı senaryo bulunmaktadır. Hastane atıksularının arıtımı için bu senaryoların geliştirilmesi gerekmektedir (Pauwels ve Verstraete, 2006). Bu atıksuların yönetiminde uygulanan senaryolar;

- 1- Herhangi bir arıtma prosedürü olmaksızın alıcı ortama direkt deşarj,
- 2- Evsel atıksu arıtma tesislerinde birlikte arıtım,
- 3- Kaynağında arıtma ve sonrasında çıkış suyunun alıcı ortama deşarjı,
- 4- İlk olarak yerinde ve sonra merkezi evsel atıksu arıtma tesisinde arıtmadır.

İlk senaryoda hastane atıksularının arıtılmaksızın direkt deşarjı sebebiyle kirleticiler yüzeysel sulara, içme sularına ulaşabilmekte ve tehlike oluşturabilmektedir. İkinci senaryoda, hastane atıksuları seyrelmekte ve çevreye direkt deşarj edilmemeleri sebebiyle tehlikenin daha az olduğu görülmektedir. Üçüncü senaryoda ise, çevresel yarar ve yüksek verimlilik sağlanabilmekte fakat sıkı izleme ve proses kontrolü gerektirmektedir. Dördüncü senaryo ise; tehlikesi en az olan arıtım yöntemidir (Pauwels ve Verstraete, 2006). Genel olarak hastane atıksularının, seyrelmeye neden olmaması adına kentsel atıksular ile birlikte arıtılmaları önerilmektedir. İçeriğindeki organik kirliliği gidermek için de biyolojik arıtımın kullanılması gerekmektedir. Hastane atıksuyunda bulunan mikrokirleticilerin çoğunun biyolojik olarak giderimi yetersiz olup; membran teknolojileri, adsorpsiyon, ileri oksidasyon gibi ileri arıtım teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Pauwels ve Verstraete, 2006; Escher vd., 2011). Türkiye'deki mevcut durumda, çok çeşitli kirleticileri içeren hastane atıksularının evsel atıksulardan ayrı arıtılmasına ve hastane atıksularındaki kirletici konsantrasyonları ile ilgili sınır değerlerine dair yasal bir mevzuat bulunmamaktadır. Mikrokirleticilerin atıksu arıtma tesislerinde (AAT); birincil, ikincil ve üçüncül arıtmaları gerçekleşmektedir. AAT'lerde birincil arıtmada katı maddelerin giderilerek, prosesteki mekanik teçhizatın tıkanmaya karşı korunması temel amaçtır. Stasinakis vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, ön çökeltme tankında Nonilfenol monoeksholat ve Bisfenol A'nın giderim verimlerinin sırasıyla %13 ve %43 olduğu görülmektedir. Ayrıca birincil arıtımın sülfametoksazol, naproksen, ibuprofen ve estron mikrokirleticilerin giderimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmektedir (Luo vd., 2014; Akkurt vd., 2019).

İkincil arıtmada; biyolojik bozunma, çamurda tutunma, fiziksel ve kimyasal arıtım basamakları yer almaktadır (Akkurt vd., 2019). Klasik aktif çamur prosesi kullanılarak yapılan bir çalışmada, atenolol, sülfametoksazol, asetaminofen, 17β-estradiol, naproksen, ibuprofen ve kafein'in giderim verimlerinin sırasıyla %35, %62, %72, %51, %85, %88 ve %98 olduğu tespit edilmektedir (Choi vd., 2022). Birincil arıtmayla giderilemeyen sülfametoksazol, naproksen ve ibuprofen gibi bileşenlerin ikincil arıtmada giderilebildiği görülürken; estron hormonunun birincil ve ikincil arıtma proseslerinden etkilenmediği görülmektedir (Choi vd., 2022).

Üçüncül arıtım prosesleri, birincil ve ikincil arıtım yöntemlerine göre daha maliyetli olmakla birlikte yüksek kalitede çıkış suyu elde edebilmek amacıyla kullanılmaktadır (Luo vd., 2014). Mikrokirleticilerin gideriminde membran filtrasyonu ve biyolojik arıtmaya kıyasla aktif karbon kullanımının çok daha başarılı olduğu

belirtilmektedir (Türkyılmaz vd., 2020). MBR'ye 8 mg/L'lik toz aktif karbon ilavesiyle (TAK) diklofenak, karbamazepin ve propranolol giderimlerinin %91'in üzerinde olduğu vurgulanmaktadır (Akkurt vd., 2019). Ayrıca, MBR'ye TAK ilavesiyle sistemde büyük flokların oluştuğu, membran kirlenmesinin azaldığı ve filtrasyon performansının arttığı belirtilmektedir (Meng vd., 2007). Finlandiya'da yapılan bir çalışmada, antiepileptik olan karbamazepin'in klasik arıtma tesisinde arıtılmadığı, beta bloker türlerinden metoprolol, atenolol ve sotalol gibi bileşiklerin arıtımının yetersiz olduğu, ofloksazin gibi antibiyotik türlerinin ise, %80 verimle arıtıldığı ifade edilmektedir. Ayrıca üçüncül arıtım proseslerinden olan biyolojik filtrasyon ünitesinin de bu ilaç türlerini arıtamadığı vurgulanmaktadır (Eren vd., 2018).

5. Hastane Atıksularındaki Bazı Mikrokirleticilerin Klasik Aktif Çamur (AÇ) Tesislerinde Varlığı ve Giderim Verimleri (Presence and Removal Efficiencies of Some Micropollutants in Conventional Activated Sludge (CAS) Plants)

AÇ tesisleri, özellikle karmaşık kimyasal yapı ve/veya güçlü elektron çeken fonksiyonel gruplar içeren mikrokirleticilerin etkili bir şekilde uzaklaştırılması için özel olarak tasarlanmadığından (Asif vd., 2019; Hai vd., 2019); atıksu arıtma tesislerindeki farklı mikrokirleticiler arasında farklı giderim verimleriyle karşılaşmaktadır. Bu durumun, mikrokirletici özelliklerinden ve işletme koşullarından kaynaklandığı belirtilmektedir. Atıksu arıtımı sırasında mikrokirleticiler, çamura sorpsiyon, buharlaşma veya fizikokimyasal/biyolojik dönüşüm yoluyla düşük miktarlarda elimine edilebilmektedirler (Grandclément vd., 2017; Alvarino vd., 2018). Genel olarak, en yüksek konsantrasyonlara sahip bileşikler arasında (ortalama değer 10 µg/L) kafein, anti-inflamuar grubunda olan ibuprofen, β-bloker grubunda yer alan atenolol ve endokrin bozucu kimyasallar arasında olan nonilfenol bulunmaktadır. İspanyadaki bir atıksu arıtma tesisinde yapılan bir araştırmaya göre en fazla bulunan mikrokirleticinin 3.73 - 603 µg/L arasında değişen konsantrasyon seviyeleri ile ibuprofen olduğu görülmüştür (Santos vd., 2009). Çin'deki üç atıksu arıtma tesisinde bulunabilen ve miktarı ortalama 50 µg/L'ye ulaşan seviyelerde kafein tespit edilmiştir. Özellikle, atıksu arıtma tesislerindeki yüksek konsantrasyonların, yüksek tüketim sonucunda oluştuğunu ve diğer ilaçlara nazaran kolay erişilebilir olduğunu göstermektedir (Zhou vd., 2010). Steroit hormonlarına bakıldığında ve diğer mikrokirleticilerle karşılaştırıldığında atıksu arıtma tesislerinde daha düşük konsantrasyonlarda bulunduğu (çoğunlukla 1 µg/L'den az) görülmektedir. Tablo 2'de bazı mikrokirleticilerin AÇ prosesiyle giderim verimleri özetlenmiştir.

Atıksu arıtma tesislerinde en çok karşılaşılan mikrokirleticilerin nonsteroidal antiinflamatuvar ilaç (NSAEİ)'ler olduğu belirtilmektedir. Yapılan bir çalışmaya göre; kodein, naproksen ve ketoprofenin sırasıyla; % 18.8, % 93 ve %35'lik ortalama giderim verimliliğinin olduğu; tramadol'un ise, gideriminin olmadığı görülmektedir. Atıksu arıtma tesislerinde en kalıcı ilaç aktif madde olarak görülen, psikiyatrik ilaçlardan karbamazepinin giderilemediği tespit edilmiştir (Leiviskä vd., 2022).

Steroid hormonları için, giderim verimlerinin %44-95 arasında değiştiği görülmektedir. Ayrıca, lipit düzenleyicilerin giderim verimlerinin %50-98 arasında olduğu; β bloker ise etkin şekilde giderilemediği görülmektedir (Leiviskä vd., 2022). Pestisitlerin giderim verimleriyle ilgili az sayıda çalışma olmasına rağmen; tarımsal kaynaklı pestisitlerin atıksu arıtma tesislerinde yeterli ölçüde giderilebildiği belirtilmektedir (Köck-Schulmeyer vd., 2013).

Tablo 2. Mikrokirleticilerin klasik aktif çamur prosesinde giderim verimleri
(Removal efficiency of micropollutants in the conventional activated sludge process) (Leiviskä vd., 2022)

| Kategori | Mikrokirletici | Ortalama Giriş Konsantrasyonu (ng/L) | Giderim Verimi (%) |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------|
| Analjezik ve Anti-İnflamatuar | Kodein | 1702 | 18.8 |
| | Tramadol | 528 | g.y. |
| | Naproksen | 6150 | 93 |
| | Ketoprofen | 484 | 35 |
| Lipit düzenleyici | Benzafibrat | 56 | 50 |
| | Simvastatin | 1218 | 97.9 |
| Antibiyotik | Sülfametaksazol | 117 | 54.7 |
| | Trimethoprim | 728 | 38.7 |
| | Sülfadiazin | 697 | 66.4 |
| β bloker | Atenolol | 200 | 12.5 |
| | Metoprolol | 749 | g.y. |
| | Bisoprolol | 693 | <5 |
| Antikonvülzan | Karbamazepin | 221 | g.y. |
| | Gabapentin | 26275 | 83 |
| | Levetirasetam | 8467 | 95 |
| | Pirimidon | 5.8 | g.y. |
| Hormon | Testosteron | 25 | 44 |
| | Progesteron | 28 | 95 |
| | Estron | 37 | 87.3 |
| | 17β-estradiol | 19 | 71.5 |

*g.y. : giderim yoktur.

6. Hastane Atıksularının MBR'de Arıtımı (Treatment of Hospital Wastewater in MBR)

MBR'lerin, AÇ prosesine göre çok daha avantajlı olmaları ve mikrokirleticileri arıtılabilmeleri sebebiyle MBR sistemleri incelenmiştir. MBR'lerin, yüksek çamur yaşı (SRT) ile yüksek askıda katı madde (AKM) konsantrasyonunda işletilebilmesi sayesinde dayanıklı mikrokirleticilerin bozunabilmeleri üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmektedir (Asif vd., 2020). MBR'ler; partiküller, karbonlu maddeler, besinler ve patojenik mikroorganizmalar gibi çeşitli kirletici maddelerin arıtımı amacıyla tasarlanmıştır (Mir-Tutusaus vd., 2018). MBR teknolojisi, membran filtrasyonu ile doğrudan katı-sıvı ayrımı sayesinde AÇ ve biyodegradasyonu birleştirmektedir. MBR'lerin, klasik atıksu arıtma tesisine kıyasla bazı mikrokirleticilerin gideriminin daha yüksek olması (Abtahi vd., 2018), daha az yer gereksinimi, yüksek kalitede çıkış suyu, daha az atık çamur üretimi, yüksek hacimsel yüklemelerde işletim gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, MBR'ler birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede suyun yeniden kullanımı için anahtar teknoloji olarak kabul edilmektedir (Hai vd., 2014). Asif vd. (2019) tarafından yapılan kapsamlı bir literatür araştırmasına göre, geniş bir mikrokirletici spektrumunun MBR ile gideriminin ortalama %70'e kadar olduğu, AÇ prosesleri için ise, giderim verimlerinin %60'a kadar olduğu belirtilmektedir.

Atıksu arıtımında MBR'de mikrokirleticilerin gideriminde temel olarak meydana gelen prosesler, biyodegradasyon, çamura sorpsiyon ve buharlaşma olarak tanımlanmıştır. MBR'de hastane atıksularının gideriminde biyodegradasyon ve sorpsiyon temel mekanizma olarak tanımlanmaktadır (Gao vd., 2012; Guerra vd., 2014; Trinh vd., 2016). MBR'nin uzun çamur yaşlarıyla işletilebilmesi sayesinde yüksek konsantrasyonda tutulan biyokütle tarafından gerçekleştirilen biodegradasyon, birinci giderim mekanizması olarak ifade edilmektedir. İkinci giderim mekanizması olarak ise, MBR prosesinde tutulan biyokütlenin yüzey alanının büyük, flok boyutunun küçük olması nedeniyle çamura sorpsiyon olarak tanımlanmakta ve sorpsiyonun maksimum seviyede gerçekleştiği belirtilmektedir (Fernandez-Fontaina vd., 2013). Çeşitli mikrokirletici türlerine bakıldığında, sucul ortamda 10-5 µg/L'den daha düşük konsantrasyonlarda bulunabilen kişisel bakım ürünlerinin buharlaşma vasıtasıyla giderimlerinin olmadığı görülmüştür (Ternes vd., 2004a,b; Stevens-Garmon vd., 2011). Mikrokirletici türlerinden olan endokrin bozucu bileşenlerin (Bisphenol A, Estrone, 17β-Estradiol, Estriol, Octylphenol) her birinin konsantrasyonu 1-5 µg/L aralığında olduğu ve MBR ile giderim verimlerinin %92-%99 arasında değiştiği görülmektedir (Gruchlik vd., 2018).

Salisilik asit ve propilparaben gibi kişisel bakım ürünlerinin MBR sistemlerinde tümüyle giderilebildiği belirtilmektedir. MBR'ler kullanılarak triklosan, atenolol ve β blokerlar için giderim verimlerinin sırasıyla %99,

%97 ve %70-80 oranında değiştiği görülmektedir (Vyrides, 2010).

Bazı antibiyotiklerin (ofloksasin, sülfametaksazol ve eritromisin) ve analjeziklerin (lorazepam, sitalopram, ibuprofen, karbamazepin ve primidon) %75 ve %95 aralığında değişebilen giderim verimiyle artırıldığı belirtilmektedir (Besha vd., 2017). Genel olarak, MBR'lerde farklı mikrokirleticilerin giderim verimliliği; endokrin bozucu bileşikler > beta blokerleri > pestisitler şeklinde sıralanmaktadır (Gruchlik vd., 2018). Makrolit ve sülfonamid gibi birkaç antibiyotiklerin giderim verimine bakıldığında %15-42 oranında değişen verimlerde olduğu ve giderim veriminin AÇ'ye kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Sahar vd., 2011). Bazı ilaç kalıntılarında kaynaklanan mikrokirleticilerin MBR ve AÇ'deki giderim verimleri, linkomisin MBR'de %62, AÇ'de %42; azitromisin MBR'de %91, AÇ'de %78; sulfametazin MBR'de %88, AÇ'de %80; tetrasilin MBR'de %92, AÇ'de %67; oksitetrasilin MBR'de %93, AÇ'de %80; trimetoprin MBR'de %69, AÇ'de %33 ve triklokarbon ise MBR'de %80 AÇ'de %70 olarak bulunmuştur (Tran vd., 2016). Kişisel bakım ürünlerine bakıldığında giderim verimlerinde MBR ve AÇ prosesleri arasında önemli bir farklılığın olmadığı belirtilmektedir (Radjenovic vd., 2009).

Tablo 3'te hastane atıksularının MBR ile arıtımı üzerine yapılmış çalışmalar detaylı olarak özetlenmektedir. SRT'nin ve hidrolik bekletme süresinin (HRT) artmasıyla ketaprofen, noproksen, roksitromisin, sülfametoksazol, trimetoprim gibi mikrokirleticilerin giderim verimlerinde artış olduğu görülmektedir (Tambosi vd., 2010). Kaya vd. (2013) tarafından ilaç aktif madde içeren atıksularla ve dört farklı tipte mikrofiltrasyon membranı (MP005, CA, MCE, MV02) kullanılarak yapılan bir çalışmada, 3 farklı SRT'de işletilen MBR'de non-steroid antiinflatuar olan etodolak ve KOİ giderimleri incelenmiştir. 15 gün, 30 gün ve sonsuz çamur yaşlarında KOİ giderimlerinin yüksek olduğu (>%82) ve üç farklı SRT'de giderim verimlerinde büyük farklılık olmadığı görülmektedir. SRT'nin artışıyla, her dört farklı tipteki membranda da etodolak gideriminin arttığı görülmektedir. Yılmaz vd. (2018) TÜBİTAK projesinde 3 farklı SRT'de toz aktif karbon ilaveli ve ilavesiz olmak üzere 2 MBR sistemi hastane atıksuyu ile işletilmiş ve mikrokirletici giderimi izlenmiştir. Mikrokirleticilerin giderimi için optimum SRT 30 gün olarak belirlenmiştir. Toz aktif karbon ilavesinin ilavesinin ölçülen hemen hemen tüm mikrokirleticilerin gideriminde etkili olduğu görülmüştür. İki farklı SRT'de işletilen bir başka MBR çalışmasında, SRT'nin 21 günden 60 gün'e çıkarılması makrokirleticilerin giderim verimlerinde büyük bir değişiklik görülmezken, metoprolol giderimlerinde SRT'nin artışıyla giderim veriminde de artış olduğu görülmektedir. Atenolol-Bisoprolol giderimlerinin ise SRT'den bağımsız olduğu görülmektedir (Gurung vd., 2019). Sentetik atıksu ve gerçek hastane atıksuyunun belirli oranlarda karıştırılmasıyla yapılan bir çalışmada, hastane atıksuyu oranının artmasıyla karbamazepin giderim veriminin azaldığı görülmektedir. Hastane atıksuyu biyokütle konsantrasyonundaki düşüşün, giderim veriminin azalması üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir (Tiwari vd., 2021).

Tablo 3. Hastane Atıksularının MBR ile arıtımı üzerine yapılmış çalışmalar
(Studies on treatment of hospital wastewater with MBR)

| Reaktör Tipi | Atıksu Türü | İşletme Süresi | SRT (gün) | HRT (saat) | Giderim Verimi (%) | Kaynak | | |
|---|---|---|-----------|------------|--|--|--|----------------|
| Aerobik MBR | Hastane Atıksuyu | 4 hafta | 15 | 9 | Asetaminofen: 100 Ketaprofen: 98 Noproksen: 86 Roksitromisin: 57 Sülfametoksazol: 55 Trimetoprim: 86 | Tambosi vd., 2010 | | |
| Aerobik MBR | Hastane Atıksuyu | 4 hafta | 30 | 13 | Asetaminofen: 100 Ketaprofen: 100 Noproksen: 89 Roksitromisin: 81 Sülfametoksazol: 64 Trimetoprim: 94 | Tambosi vd., 2010 | | |
| MBR | İlaç aktif madde içeren atıksu | - | 15-30-∞ | 24 | SRT:15 gün | SRT: 30 gün | SRT: ∞ gün | Kaya vd., 2013 |
| | | | | | KOİ: 85,3, Etodolak: 31.7 (MP005 Tipi MFM) | KOİ: 84, Etodolak: 46 (MP005 Tipi MFM) | KOİ: 87,3, Etodolak: 65 (MP005 Tipi MFM) | |
| | | | | | KOİ: 86,6, Etodolak: 27 (CA Tipi MFM) | KOİ: 82,6, Etodolak: 44,7 (CA Tipi MFM) | KOİ: 86,6, Etodolak: 81 (CA Tipi MFM) | |
| | | | | | KOİ: 85,3, Etodolak: 25,8 (MCE Tipi MFM) | KOİ: 84,6, Etodolak: 43,5 (MCE Tipi MFM) | KOİ: 86,6, Etodolak: 81,1 (MCE Tipi MFM) | |
| KOİ: 85,3, Etodolak: 31,7 (MV02 Tipi MFM) | KOİ: 86, Etodolak: 46 (MV02 Tipi MFM) | KOİ: 87,3, Etodolak: 66,8 (MV02 Tipi MFM) | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--|---|-------------|----------|-------|---|--|--|--|-------------------------|
| MBR | İlaç aktif madde içeren atıksu | 145 gün | Sonsuz | 2.7-9 | OLR: 1kgKOİ m ⁻³ .gün ⁻¹ (TAK'sız) | OLR: 1kgKOİ m ⁻³ .gün ⁻¹ (OLR:TAK = 0.5) | OLR: 1.5kgKOİ m ⁻³ .gün ⁻¹ (OLR:TAK = 0.75) | OLR: 2kgKOİ m ⁻³ .gün ⁻¹ (OLR:TAK = 1) | Kaya vd., 2016 |
| | | | | | KOİ: 81-91, Etodolak:73 | KOİ: 85-98, Etodolak:99 | KOİ: 89-95, Etodolak:95 | KOİ:90-97, Etodolak:97 | |
| MBR | Hastane Atıksuyu | 76 gün | 27 | 3 | KOİ: 66-72 Sülfametoksazol: 78.5, İbuprofen: 100 | | | | Prasertkulsak vd., 2016 |
| Aerobik MBR | Yarı Sentetik Hastane Atıksuyu KOİ: 1750 mg/L, TN: 125 mg/L , TP: 25 mg/L | 153 gün | 20 | 36 | KOİ: 98 TN: 94 Siklofosfamid: 97 | | | | Seira vd.,2016 |
| MBR | Mikrokirletici İçeren Endüstriyel Atıksu | 180 gün | 40 | 24 | KOİ: 92 PAH (metilnaftalin, fluoren, benzoapiren): <50 | | | | Özcan, 2017 |
| Aerobik MBR (FS MBR) | Hastane Atıksuyu KOİ: 155-405 mg/L NH ₄ -N: 3-11,2 mg/L TKN: 11,4-32,5 mg/L TP: 1-3 mg/L | - | 20 | - | Norfloksasin: 93-99 Ofloksasin: 73-93 Siprofloksasin: 76-93 Tetrasiklin: 100 Trimetoprim: 60-97 Eritromisin: 67-78 | | | | Nguyen vd., 2017 |
| MBR | Hastane Atıksuyu KOİ:700-1100 mg/L NH ₃ : 150-160 mg/L P: 16-19 mg/L | 63 gün | 25 | 4-8 | KOİ: 73.6 NH ₃ : 84.9 P: 58 | | | | Alsahya vd., 2018 |
| sMBR/ eMBR* | Hastane Atıksuyu- Onkoloji Birimi Atıksuyu | 160/180 gün | - | 1-2 | KOİ: >90 NH ₄ : 100 Kodein: ort.72, Siklofosfamid: ort.60, İfosfamid: ort.49, Sülfametoksazol: ort.75 | | | | Hamon vd., 2018 |
| MBR+Elektro kimyasal ileri oksidasyon (EO) | Sentetik Hastane Atıksuyu KOİ: 2000 mg/L | 140 gün | 140 | 18 | Karbamazepin: <5 Venlafaksin: >10 İbuprofen: >97 Estradiol: >97 | | | | Ouarda vd., 2018 |
| MBR MBR+toz aktif karbon | Hastane atıksuyu KOİ:180-920 mg/L NH ₄ -N: 21-58 mg/L TP: 3.8-10 mg/L | 750 gün | 10-30-60 | - | MBR - SRT 10 gün: Giderim verimi >%99: hormonlar. Giderim verimi >%70: Atenolol, Atorvastatin, Cilastatin, Clarithromycin, Cortisone, Cyclophosphamide, Enalapril, İbuprofen, Mefenamic acid, Metformin, Metronidazole, 4N-Acetyl-Sulfadiazine, 4N-Acetyl-Sulfamethoxazole, Naproxen, Paracetamol, Ranitidine, Rosuvastatin, Roxithromycin, Simvastatin, Sulfamethoxazole, Sulfapyridine, Sotalol ve Trimethoprim | | | | Yılmaz vd., 2018 |
| MBR | Organik mikrokirletici (antibiyotik, β-bloker, analjezik, antiepileptik, antikoagülant) ve steroid hormonu içeren belediye atıksuyu | 4 hafta | 21 - 60 | 42.13 | SRT: 21 gün | SRT: 60 gün | | | Gurung vd., 2019 |
| | | | | | KOİ: 93.03 NH ₄ : >99.96 TP: 87.40 Atenolol- Bisoprolol: 92-97 Metoprolol: 50-60 Diklofenak: 45 | KOİ: 92.43 NH ₄ : >99.96 TP: 88.12 Atenolol-Bisoprolol: 92-97 Metoprolol: 82-84 Diklofenak: 38 | | | |
| MBR | Hastane Atıksuyu | 45 gün | - | 24 | Dahili MBR | Uzun Havalandırmalı MBR | | | Morabet vd., 2020 |
| | | | | | KOİ: 72 BOİs: 78 | KOİ: 85 BOİs: 91 | | | |
| MBR | Sentetik ve Gerçek Hastane Atıksuyu (SHA ve GHA) KOİ: 200-350 mgO ₂ /L NH ₄ : 24.48 mgN/L | 40 gün | 100 | 18 | Faz:1 (SHA:GHA) (75:25) h/h | Faz:2 (SHA:GHA) (50:50) h/h | Faz:3 (SHA:GHA) (25:75) h/h | | Tiwari vd., 2021 |
| | | | | | KOİ: 90.9; N-NH ₄ : 88.9 P-PO ₄ : 20.2 Sülfametaksazol: 86.2 Venlafaksin: 55.2 İbuprofen: >99 Karbamazepin: 45.4 | KOİ: 80.9; N-NH ₄ : 86.4 P-PO ₄ : 19.2 Sülfametaksazol: 54 Venlafaksin: 34 İbuprofen: 99.9 Karbamazepin: 28.4 | KOİ: 73.9; N-NH ₄ : 77.1 P-PO ₄ : 17.8 Sülfametaksazol: 64 Venlafaksin: 10 İbuprofen: 97 Karbamazepin: 10.4 | | |
| MBR | Mikrokirletici içeren kentsel atıksu | 55 gün | 200 | 21 | KOİ: >91; Sülfametaksazol: >68.3; Trimetoprim: >61.1; Siprofloksazin: >71.4; Kafein: >99.6; Asetaminofen: >99.7 | | | | Isik vd., 2022 |

*sMBR: batık MBR, eMBR: harici MBR, PAH: Polisiklik aromatik hidrokarbonlar, OLR: Organik Yükleme Hızı, MFM: Mikrofiltrasyon membranı, ∞:Sonsuz

7. MBR İşletme Parametrelerinin Hastane Atıksularındaki Mikrokirletici Giderimine Etkileri (The Effects of Operation Parameters on the Removal of Micropollutants)

MBR'de işletme parametrelerinin farklı oluşu sebebiyle mikrokirleticilerin giderim verimleri de farklılık göstermektedir. Hastane atıksuyundaki ilaç aktif maddelerin fizikokimyasal özellikleri ve MBR'nin işletme parametreleri (sorpsiyon, çamur yaşı, hidrolik bekletme süresi, pH ve sıcaklık) mikroorganizmaların metabolik aktivitesini etkilemekte, dolayısıyla mikrokirletici giderim verimini ve MBR'deki çıkış suyu kalitesini değiştirmektedir. Çeşitli literatür çalışmalarında mikro kirletici giderimlerinin farklı işletme parametreleriyle bağlantılı olarak MBR verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

7.1. Çamur Yaşı (Sludge Retention Time)

SRT, MBR verimini etkileyen en önemli işletme parametrelerinden birisidir. SRT'nin viskozite, biyokütle konsantrasyonu, mikrobiyal topluluğun bileşimi, flok boyutu ve viskozite gibi çamur özelliklerini etkileyebildiği vurgulanmaktadır (Hocaoğlu vd., 2011; Nadeem vd., 2022). Çok yüksek SRT'lerde, AKM konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak çözünürlüğü yüksek ve partiküllü maddeler birikebilmekte ve vizkozitede meydana gelen artışla membranların geri yıkamasında daha yüksek hava akımına ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir (Krzeminski vd., 2012). Bazı ilaç aktif maddelerin, SRT'nin artışıyla daha yüksek giderim verimiyle artırıldığı belirtilmektedir (Kruglova vd., 2016, Goswami vd., 2018). Phan vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, MBR'lerin yüksek SRT'de işletilebilmeleri sayesinde yavaş gelişen nitrifikasyon bakterileri gelişebilmekte ve giderilemeyen bazı mikrokirleticilerin de giderimi sağlanabilmekteyken; ibuprofen, diklofenak, naproksen, ketoprofen ve karbamazepinin gideriminin SRT'den bağımsız olduğu vurgulanmaktadır (Li vd., 2015). Yılmaz vd. (2018) TÜBİTAK projesinde SRT değeri 10 günden 30 güne çıkarıldığında, mikrokirletici giderim verimlerinin önemli ölçüde iyileştiği; ancak SRT'nin 60 güne çıkarılmasıyla bazı ilaç aktif madde giderim verimlerinin bozulduğu görülmüştür. Bu nedenle mikrokirleticilerin giderimi için optimum SRT 30 gün olarak belirlenmiştir. Gurung vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, SRT 21 gün ve 60 gün olarak işletilen bir MBR'de her iki SRT değerinde parasetamol, ibuprofen, ketoprofen, naproksen, tetrasiklin, siprofloksasin ve trimetoprim giderim verimlerinin %90'ın üzerinde olduğu belirtilmekteyken; SRT'nin 21 günden (%50-60) 60 güne (%82-84) çıkarılmasıyla, metoprolol ve propranolol giderim verimlerinin arttığı belirtilmektedir. Bununla birlikte MBR'de mikrokirleticilerin çoğunun giderilebilmesi için, çamur yaşlarının 20 gün ve 30 gün aralığında tutulmasının yeterli olduğu belirtilmektedir.

MBR sistemlerinde yeterli SRT değerlerine ulaşıldığında mikrokirletici giderimlerinin yüksek olduğu ifade edilmektedir (Liu vd., 2022). Prasertkulsak vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, SRT'nin 15 günden 30 güne çıkarılmasıyla diklofenak, trimetoprim, naproksen, ibuprofen ve triklosanın gideriminin %43.33'ten %80.75'e çıktığı vurgulanmaktadır. Sülfametoksazolün gideriminin araştırıldığı bir diğer çalışmada, SRT'den bağımsız olarak yaklaşık %80 oranında giderim veriminin olduğu bildirilmektedir (Gobel vd., 2007). Antiepileptik bir ilaç olan karbamazepinin SRT'den bağımsız olarak giderilemediği, karbamazepinin ana metabolitinin 10,11 epoksi-karbamazepin olduğu ve glukuronid olarak vücuttan dışarı atıldığı belirtilmektedir. Glukuronid bileşiğinin biyolojik proseslerde parçalanmasının ardından, atıksu giriş konsantrasyonlarında artış olabildiği görülmektedir (Ternes, 1998). Karbamazepinin MBR'de parçalanabilirliğinin zayıf olmasına bağlı olarak giderilemediği ve inatçı bir bileşik olduğu birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Clara vd., 2005b; Radjenovic vd., 2007; Wijekoon vd., 2013). İki farklı SRT'de işletilen bir MBR'de karbamazepinin biyotransformasyona karşı yüksek direnç gösterdiği ve bu nedenle atıksuda yüksek oranda tespit edildiği belirtilmektedir (Gurung vd., 2019). Klofibrik asit gideriminin araştırıldığı bir çalışmada, SRT'nin 15 günden 65 güne çıkarılmasıyla giderim veriminin %50'den %82'ye yükseldiği belirtilmektedir (Kimura vd., 2007).

7.2. pH Etkisi (Effect of pH)

İyonize olabilen mikrokirleticileri içeren bir MBR sistemi için pH, giderim veriminde önemli bir rol oynamaktadır. Biyolojik arıtma için genellikle pH değerlerinin 6-7 arasında olması gerektiği belirtilmektedir (Tadkaew vd., 2010). İbuprofen ve ketoprofen gibi bileşiklerin MBR'lerde giderim verimlerine bakıldığında asidik koşullar altında bu bileşiklerin giderim verimlerinde önemli bir artış olduğu belirtilmektedir (Urase vd., 2005). İbuprofen, diklofenak ve ketoprofen gibi bileşikler oldukça hidrofobiktir ve bu nedenle AÇ'ye oldukça kolay bir şekilde adsorbe olabilmektedir. Hidrofobik bileşenlerin MBR'larda yüksek giderim verimleriyle artırılabilmesinin, biyolojik olarak parçalanabilirliklerine ve çamura adsorbe olabilmeye kapasitelerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Statik abiyotik çamurda adsorpsiyon testleri sonuçlarına bakıldığında; pH 5'e doğru düştüğünde adsorpsiyon kapasitelerinde artış olduğu belirtilmektedir. Biyolojik sistemlerde pH 5'in üzerinde sülfametoksazolün giderim verimlerinde ciddi düşüşlerin olduğu görülmektedir (Urase vd., 2005; Tadkaew vd., 2010; Taheran vd., 2016).

7.3. Sıcaklığın Etkisi (Effect of Temperature)

Düşük sıcaklık değeri atıksu arıtma tesislerinde bazı mikrokirleticilerin giderimini olumsuz yönde etkilemektedir. MBR'deki sıcaklık 15°C'nin altına düştüğünde, karbamazepinin gideriminin %10'dan %0'a indiği belirtilmektedir (Li vd., 2011). Mikroorganizma gelişimi ve aktivitesinin sıcaklık değişiminden etkilendiği, ancak MBR kullanılarak ibuprofen, asetaminofen, bezafibrat ve naproksen gibi mikrokirleticilerin çoğunun gideriminin oda sıcaklığında gerçekleşebildiği tespit edilmiştir (Chon vd., 2011).

18–23°C arasındaki sıcaklıkların; sülfametoksazol, eritromisin, atenolol, ibuprofen gibi antibiyotiklerin gideriminde etkili olduğu belirtilmektedir (Suarez vd., 2012; Kim vd., 2014). MBR ve AÇ prosesinde mikrokirleticilerin giderimi genellikle ortam sıcaklığında sağlanabilmekteyken, karbamazepin ve diklofenak gibi mikrokirleticilerde ise arıtılabilirliğin ortam sıcaklığından bağımsız olduğu belirtilmektedir (Radjenovic vd., 2007; Chon vd., 2011). Tiwari vd. (2021a) tarafından yapılan bir çalışmada, hastane atıksularından sülfametoksazol, klaritromisin, diklofenak, hidroksi diklofenak ve venlafaksin'in MBR ile giderimi esnasında sıcaklığın 10°C'den 20°C'ye çıkarılmasıyla giderim veriminin %10-50 aralığından %40-90 aralığına yükseldiği ifade edilmektedir. Giderim verimindeki artışın çamur konsantrasyonunun artması ve mikroorganizmaların artan sıcaklıkla birlikte metabolik aktivitelerinin artması olduğu düşünülmektedir. Hai vd. (2011b) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, hidrofobik özellik gösteren mikrokirleticilerin kararlı bir şekilde giderildiği; ketoprofen, fenoprop ve pentaklorofenol gibi hidrofilik bazı bileşiklerin giderim verimlerinin sıcaklık artışıyla (10°C'den 35 °C 'ye) arttığı vurgulanmaktadır. Mikrokirleticilerin giderimi esnasında, MBR'de sıcaklık değerlerinin 45°C'ye yükselmesiyle metabolik aktivite engellenmekte ve arıtım gerçekleşmemektedir. Aynı zamanda yüksek sıcaklık değerlerinde, çamurun parçalanmasıyla mikrokirleticilerin adsorpsiyonunun engellendiği de vurgulanmaktadır (Hai vd., 2011b).

7.4. Redoks Şartlarının Etkisi (Effect of Redox)

MBR farklı redoks koşullarında işletildiğinde, yüksek mikrobiyal aktivitenin sağlandığı belirtilmektedir. Aerobik koşullar altında naproksen, 17 α -etinilestradiol ve ibuprofen gibi bazı mikrokirleticilerin önemli miktarda biyolojik olarak bozunduğu belirtilirken; galaksolit ve tonalit gibi bazı bileşiklerin de hem aerobik hem de anoksik koşullar altında bozunduğu belirtilmektedir (Suarez vd., 2012). MBR'deki anoksik koşulların mikrokirleticilerin giderimi için yeterli olduğu vurgulanmaktadır (Stasinakis vd., 2009). Gemfibrozil, diklofenak, bezafibrat ve ketoprofen, gibi mikrokirleticilerin anoksik şartlarda kısmen giderilebildiği belirtilmektedir. Alvarino vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, sülfametoksazol ve trimetoprim'in sülfonil grubu gibi elektron çeken grupların varlığı nedeniyle anaerobik koşullar altında yüksek oranda giderilmekteyken, aerobik koşullar altında biyolojik bozunmanın sınırlı olduğu ifade edilmektedir.

7.5. Hidrolik Bekletme Süresi (Hydraulic Retention Time)

Hidrolik bekletme süresi (HRT), atıksuda bulunan biyokütle ve kirleticiler arasındaki ortalama reaksiyon süresi olarak tanımlanmaktadır. HRT, atıksudaki organik yüklemeye hızı ve besin/mikroorganizma oranını etkilemektedir. Sülfametoksazol ve ibuprofen gibi birçok mikro kirleticinin azalan hidrolik bekletme süresi ile biyolojik bozunabilirliğinde düşüş gözlenmektedir (Zhao vd., 2015). MBR'de HRT'nin düşüşüyle organik bileşenlerin de giderim veriminin azaldığı belirtilmektedir (Ng vd., 2014). Ayrıca HRT'nin düşüşüyle akının ve membran tıkanmasının arttığı vurgulanmaktadır (Nadeem vd., 2022). HRT'nin asetaminofen, bezafibrat, ofloksasin, gemfibrozil ve metronidazol gibi bileşiklerin gideriminde etkisinin olmadığı belirtilmektedir (Hemmati vd., 2012). Prasertkulsak vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, HRT'nin 3 saat olduğu bir MBR'de 17 β -estradiol ve triklosan bileşiklerinin uzaklaştırılmasının adsorpsiyon mekanizması ile gerçekleştiği ve giderim veriminin %80'den fazla olduğu vurgulanmaktadır.

Alvarino vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada ise 17 β -estradiol'ün 24 saatlik HRT'de aerobik koşullar altında, yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilir olduğunu belirtilmektedir. Mikrokirleticilerin gideriminde yavaş gelişen mikroorganizmaların biyolojik degradasyonu gerçekleştirebilmeleri için 3 saatlik HRT'nin yeterli olduğu ve bu sürede mikroorganizmaların iyi gelişebildiği belirtilmektedir (Prasertkulsak vd., 2019). Boonorat vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, fenollerin ve ftalatların biyolojik olarak parçalanmasından sorumlu bakterilerin büyümesi için optimum HRT'nin 12 saat olduğu vurgulanırken; MBR'lerde karbamazepin ve diklofenak'ın biyodegradasyonunun sağlanması için daha uzun HRT'lere ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Anaerobik MBR kullanılarak Chen vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, belediye atıksuyunda mikrokirletici giderimi incelenmiş ve HRT'nin 4.5 saatten 7.5 saate yükseltilmesiyle, naproksen gideriminin %63.8'den %72.1'e ulaştığı belirtilmektedir. Bununla birlikte, MBR'nin yüksek verimlilikte çalışabilmesi için SRT ve HRT parametrelerinin, 10-80 gün ve 4-48 saat aralığında olması gerektiğini ifade edilmektedir (Smith vd., 2012; Pathak vd., 2020).

7.6. Sorpsiyonun Etkisi (Effect of Sorption)

Kirleticilerin sorpsiyonunun değerlendirilmesinde adsorpsiyon (pozitif yüklü mikrokirletici gruplarının, negatif yüklü mikroorganizmaların yüzeyi ile elektrostatik etkileşimi) ve absorpsiyon (mikroorganizmaların lipofilik hücre zarı ve çamurun lipit fraksiyonları ile kirleticilerin hidrofobik etkileşimi) olmak üzere iki temel faktörün olduğu bilinmektedir (Cirja vd., 2008; Sipma vd., 2010). MBR'de sorpsiyon, mikrokirleticilerin birikmesiyle ilave ikincil tabakanın oluşumuna bağlı olarak gerçekleşmektedir (Liv vd., 2011). MBR'de sorpsiyonun gerçekleşebilmesinde kirleticilerin türlerinin de önemli bir faktör olduğu belirtilmektedir. Hidrofobik (apolar) kirleticilerin gideriminde, AÇ üzerinde öncelikle biyosorpsiyon, ardından biyodegradasyon gerçekleşmektedir. Hidrofilik (polar) kirleticilerin gideriminde ise; öncelikli prosesin biyolojik bozunma olduğu ve sorpsiyonun sınırlı olduğu görülmektedir (Bo vd., 2009). Prasertkulsak vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, sülfametoksazol, trimetoprim, karbamazepin, tramadol, naproksen, propanolol, 17 β -estradiol ve triklosan giderimlerinin esas olarak adsorpsiyonla gerçekleştiği; diklofenak, ibuprofen ve gemfibrozil giderimlerinin ise esas olarak biyolojik bozunma yoluyla gerçekleştiği vurgulanmaktadır.

HRT'nin 3 saatten az olduğu çalışmalarda hidrofobik bileşenlerin çoğunun çamura ya da koloidal partiküller üzerine adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırıldığı ifade edilmektedir. Orta derecede hidrofobik bir bileşik olan karbamazepin'in koloidal partiküller üzerine adsorbe olduğu belirtilmektedir (Alvarino vd., 2014). Diklofenak, naproksen, ibuprofen ve gemfibrozil gibi negatif yüklü bileşiklerin sülfametoksazol ve trimetoprim gibi nötr bileşiklerden daha iyi uzaklaştırıldığı, ancak bu bileşiklerin gideriminden sorumlu ana mekanizmanın farklı olabileceği vurgulanmaktadır (Stevens-Garmon vd., 2011; Prasertkulsak vd., 2019). Diklofenakın adsorpsiyon yoluyla kısmen uzaklaştırıldığı (%25.8), büyük çoğunluğunun biyolojik bozunma yoluyla (%49) giderildiği belirtilmektedir (Stevens-Garmon vd., 2011). Gemfibrozil giderimi üzerine yapılan bir çalışmada, adsorpsiyon (%29) ve biyodegradasyon (%34) mekanizmaları ile bu bileşenin toplam %63 giderim verimiyle uzaklaştırıldığı görülmektedir. Aynı çalışmada naproksenin %28 adsorpsiyon ve %15 biyodegradasyon olmak üzere %43 giderim verimiyle giderildiği görülmektedir (Prasertkulsak vd., 2019). Grenni vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada gemfibrozilin naproksene göre daha kalıcı olduğunu bildirilirken; Stumpf vd. (1999) tarafından yapılan bir çalışmada da, gemfibrozilin doğal sularla ve kanalizasyon sularında parçalanmadığı belirtilmektedir.

8. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Mikrokirleticiler nehirler, göller ve yeraltı suyu gibi önemli içme suyu kaynaklarında tespit edilmiştir. Birçok mikro kirleticinin birincil kaynağının hastaneler ve atıksu arıtma tesisleri olduğu kabul edilmektedir. Klasik atıksu arıtma tesislerinde birçok mikrokirleticinin yeterince giderilememesi ve kullanılabilir su kaynaklarının azalması sebebiyle, mikrokirleticilerin giderimine yönelik araştırmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. MBR'lar; klasik atıksu arıtma tesislerinde giderilemeyen mikrokirleticilerin giderilmesi açısından umut verici bir teknoloji olarak görülmektedir. Klasik atıksu arıtma tesislerinde kirletici giderimlerinin tasarım parametrelerine bağlı olmasına benzer olarak, MBR'lerin işletme şartları ya da optimize edilen parametreleri atıksu ortamındaki kirleticilerin yüksek verimle uzaklaştırılmasını ve membran kirlenmesinin kontrolünü sağlamaktadır. Bu nedenle MBR'de optimum performansın sağlanabilmesi için mikrokirletici giderimlerinde SRT ve HRT gibi işletme koşullarının detaylı olarak ortaya konması gerekmektedir.

Bu çalışmada, hastane atıksularının AÇ ve MBR'lerde arıtılabilirlikleri değerlendirilmiş ve MBR'deki işletme parametrelerinin (sorpsiyon, pH, sıcaklık, SRT, HRT) giderim verimine etkisi incelenmiştir. Artan SRT'nin yavaş gelişen mikroorganizmaların gelişimine olanak sağladığı ve diklofenak gibi bileşiklerin giderimlerinin arttığı görülmektedir. Mikrokirletici giderim mekanizmalarının, bileşiğin kimyasal özelliklerine bağlı olarak adsorpsiyon ve/veya biyodegradasyon yoluyla gerçekleşebildiği görülmektedir. SRT'nin artışıyla AKM konsantrasyonlarının arttığı, buna bağlı olarak adsorpsiyonla giderimin artabileceği düşünülmektedir. Artan AKM konsantrasyonlarıyla geri yıkamada zorluklar oluşarak membran kirlenmesinin hızlanacağı görülmektedir. Ayrıca kullanılan membranların da giderim verimi ve kirliliğin kontrolü üzerinde ciddi etkileri olduğu bilinmektedir. Mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon gibi gözenekli membranların yerine ileri osmoz gibi düşük kirlenme eğilimine sahip olan membranların tercih edilebileceği düşünülmektedir. Kullanılan farklı membran materyallerinin de KOİ gideriminde ciddi farklılıklar oluşturmadığı, mikrokirletici gideriminde ise etodolak gibi bazı bileşiklerin gideriminde SRT ile birlikte farklılıklar oluşturabileceği görülmektedir.

Hastane atıksularının arıtımında ikincil arıtma proseslerinden AÇ ve MBR kıyaslandığında, MBR'nin mikrokirleticilerin gideriminde ortalama %70'e varan giderim verimi sağladığı belirtilmiştir. MBR ile giderilemeyen bazı mikrokirleticilerin giderilebilmesi için farklı stratejiler/kombinasyonlar kullanılmaktadır. Bu amaçla, farklı ileri arıtma teknikleriyle MBR'ye toz aktif karbon (TAK) ilavesi ya da MBR/UV, MBR/ileri oksidasyon, MBR/adsorpsiyon uygulamaları sayesinde daha etkin giderim sağlanabilmektedir. MBR'ye eklenen TAK ilavesiyle kirlenmenin azalabileceği de görülmektedir.

Ayrıca mikrokirleticilerin çevre üzerinde ne gibi olumsuzluklar oluşturduğu henüz bilinmemektedir. Mikrokirleticilerin çevre üzerinde sebep olduğu zararların daha net anlaşılabilmesi için kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, 114Y192 numaralı TÜBİTAK (1001) projesi ile desteklenmiştir.

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2019-34246 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Abtahi, S.M., Petermann, M., Flambard, A.J., Beaufort, S., Terrisse, F., Trotouin, T., Cassan, C.J., Albasi, C., 2018. Micropollutants removal in tertiary moving bed biofilm reactors (MBBRs): contribution of the biofilm and suspended biomass. *Science of the Total Environment*, 643, 1464-1480.
- Aemig Q., Helias, A., Patureau, D., 2020. Impact assessment of a large panel of organic and inorganic micropollutants released by wastewater treatment plants at the scale of France. *Water Research*, 188, 116524.
- Aherne, G.W., English, J., Marks, V., 1985. The role of immuno assay in the analysis of micro contaminants in water samples. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 9, 79-83.
- Akkurt, Ş., Oğuz, M., 2019. Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikro Kirleticilerin Arıtılabilirliği. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 22(2), 58-77.
- Almeida, Â., Calisto, V., Esteves, V., Soares, A.M.V.M., Figueira, E., Freitas, R., 2014. Presence of carbamazepine in coastal systems: effects on bivalves. *Aquatic Toxicology*, 156, 74-87.
- Alsahya, Q.F., Al-Anib, F. H., Al-Najarb, A. E., 2018. A new Sponge-GAC-Sponge membrane module for submerged membrane bioreactor use in hospital wastewater treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 133, 130-139
- Alvarez-Muñoz, D., Huerta, B., Fernandez-Tejedor, M., Rodríguez-Mozaza, S., Barceló, D., 2015. Multi-residue method for the analysis of pharmaceuticals and some of their metabolites in bivalves. *Talanta*. 136, 174-182.
- Alvarino, T., Suarez, S., Lema, J.M., Omil, F., 2014. Understanding the removal mechanisms of PPCPs and the influence of main technological parameters in anaerobic UASB and aerobic CAS reactors. *Journal of Hazardous Materials*. 278, 506-513.
- Alvarino, T., Suarez, S., Lema, J., Omil, F., 2018. Understanding the sorption and biotransformation of organic micropollutants in innovative biological wastewater treatment technologies. *Science of the Total Environment*, 615, 297-306.
- Asif, M. B., Ansari, A.J., Chen, S.-S., Nghiem, L.D., Price, W.E., Hai, F.I., 2019. Understanding the mechanisms of trace organic contaminant removal by high retention membrane bioreactors: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 34085-34100.
- Asif, M.B., Ren, B., Li, C., Maqbool, T., Zhang, X., Zhang, Z., 2020. Powdered activated carbon-Membrane bioreactor (PAC-MBR): Impacts of high PAC concentration on micropollutant removal and microbial communities. *Science of the Total Environment*, 745, 141090.
- Aydin, S., Aydin, M.E., Ulvi, A., Kilic, H., 2019. Antibiotics in hospital effluents: occurrence, contribution to urban wastewater, removal in a wastewater treatment plant, and environmental risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 544-558.
- Bebiano, M.J., Gonzalez-Rey, M., 2015. *Ecotoxicological Risk of Personal Care Products and Pharmaceuticals in Claude Amiard-Triquet, Jean-Claude Amiard and Catherine Mouneyrac, Aquatic Ecotoxicology, Advancing Tools for Dealing with Emerging Risks*, vol. 16. Academic Press Ch, pp. 383-416.
- Benedetti, M., Ciaprini, F., Piva, F., Onorati, F., Fattorini, D., Notti, A., Ausili, A., Regoli, F., 2012. A multidisciplinary weight of evidence approach toward polluted sediments: integrating sediment chemistry, bioavailability, biomarkers responses and bioassays. *Environment International*, 38, 17-28.
- Berendonk, T.U., Manaia, C.M., Merlin, C., Fatta-Kassinos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Bürgmann, H., Sørum, H., Norström, M., Pons, M.-N., 2015. Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. *Nature Reviews Microbiology*, 13 (5), 310.
- Besha, A. T., Gebreyohannes, A.Y., Tufa, R. A., Bekele, D.N., Curcio, E., Giorno, L., 2017. Removal of Emerging Micropollutants by Activated Sludge Process and Membrane Bioreactors and the Effects of Micropollutants on Membrane Fouling: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2395-2414
- Bo, L., Urase, T., Wang, X. 2009. Biodegradation of trace pharmaceutical substances in wastewater by a membrane bioreactor. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 3, 236-240.
- Boonnorat, J., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Yamamoto, K., 2014. Microbial adaptation to biodegrade toxic organic micropollutants in membrane bioreactor using different sludge sources. *Bioresour Technology*, 165, 50-59.
- Chen, W., Wong, Y., Huang, T., Chen, W., Lin, J., 2019. Removals of pharmaceuticals in municipal wastewater using a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 140, 29-36.
- Chitescu, C.L., Kaklamanos, G., Nicolau, A.I., Stolker, A.A., 2015. High sensitive multiresidue analysis of pharmaceuticals and antifungals in surface water using U-HPLC-QExactive Orbitrap HRMS. Application to the Danube river basin on the Romanian territory. *Science of the Total Environment*, 532, 501-511.
- Choi, S., Yoom, H., Son, H., Seo, C., Kim, K., Lee, Y., Kim, Y. M., 2022. Removal efficiency of organic micropollutants in successive

- wastewater treatment steps in a full-scale wastewater treatment plant: Bench-scale application of tertiary treatment processes to improve removal of organic micropollutants persisting after secondary treatment. *Chemosphere*, 288, 132629.
- Chon, K., Sarp, S., Lee, S., Lee, J. H., Lopez-Ramirez, J.A. Cho, J., 2011. Evaluation of a membrane bioreactor and nanofiltration for municipal wastewater reclamation: Trace contaminant control and fouling mitigation. *Desalination*, 272, 128-134.
- Cirja, M., Ivashechkin, P., Schäffer, A., Corvini, P. F. 2008. Factors affecting the removal of organic micropollutants from wastewater in conventional treatment plants (CTP) and membrane bioreactors (MBR), *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7,61-78.
- Clara, M., Kreuzinger, N., Strenn, B., Gans, O., Kroiss, H., 2005. The solids retention time a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. *Water Resource*, 39, 97-106.
- Comber, S., Gardner, M., Sörme, P., Leverett, D., Ellor, B., 2018. Active pharmaceutical ingredients entering the aquatic environment from wastewater treatment works: a cause for concern. *Science of the Total Environment*, 613-614, 538-547.
- CPMP/SWP/4447/00 Guideline on the Environmental Risk Assessment of Medicinal Products for Human Use, 2006. European medicines agency.
- Cruz-Morató, C., Lucas, D., Llorca, M., Rodriguez-Mozaz, S., Gorga, M., Petrovic, M., Barceló, D., Vicent, T., Sarrà, M., Marco-Urrea, E., 2014. Hospital wastewater treatment by fungal bioreactor: removal efficiency for pharmaceuticals and endocrine disruptor compounds. *Science of the Total Environment*, 15, 365-376.
- Directive 2001/83/EC of the European Parliament and of the Council of 6 November 2001 On the Community code relating to medicinal products for human use.
- Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 On environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European.
- Ebele, A.J., Abou-Elwafa Abdallah, M., Harrad, S., 2017. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants*, 3, 1-16.
- Eren, Z., 2018. Su Kaynaklarındaki İlaç Kalıntılarının İleri Oksidasyon Yöntemleri ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 6-3, 153-163.
- Escher, B.I., Baumgartner, R., Koller, M., Treyer, K., Lienert, J., Mc Ardell, C.S., 2011. Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospital wastewater, *Water Research*, 45, 75-92.
- Fent, K., Weston, A.A., Caminada, D., 2006. Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76, 122-159.
- Fernandez-Fontaina, E., Pinho, I., Carballa, M., Omil, F., Lema, J.M., 2013. Biodegradation kinetic constants and sorption coefficients of micropollutants in membrane bioreactors. *Biodegradation* 24, 165-177.
- Fong, P.P., Ford, A.T., 2014. The biological effects of antidepressants on the molluscs and crustaceans: a review. *Aquatic Toxicology*, 151, 4-13.
- Gao, P., Ding, Y., Li, H., Xagorarakis, I., 2012. Occurrence of pharmaceuticals in a municipal wastewater treatment plant mass balance and removal processes. *Chemosphere*, 88, 17-24.
- Gobel, A., Mc Ardell, C.S., Joss, A., Siegrist, H., Giger, W., 2007. Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies. *Science of the Total Environment*, 372 (2-3), 361-371.
- Gönder, B. Z., Kara, M. E., Celik, O. B., Vergili, I., Kaya, Y., Altinkum, S. M., Bagdatli, Y., Yilmaz, G., 2021. Detailed characterization, antibiotic resistance and seasonal variation of hospital wastewater. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 16380-16393.
- Grandclément, C., Seyssiecq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N., Doumenq, P., 2017. From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A review. *Water Resources*, 111, 297-317.
- Gros, M., Rodríguez-Mozaz, S., Barceló, D., 2012. Fast and comprehensive multi-residue analysis of a broad range of human and veterinary pharmaceuticals and some of their metabolites in surface and treated waters by ultra-high-performance liquid chromatography coupled to quadrupole-linear ion trap tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1248, 104-121.
- Gruchlik, Y., Linge, K., Joll, C., 2018. Removal of organic micropollutants in waste stabilisation ponds: A review. *Journal of Environmental Management*. 206, 202-214.
- Guerra, P., Kim, M., Shah, A., Alaei, M., Smyth, S. A., 2014. Occurrence and fate of antibiotic, analgesic/anti-inflammatory and antifungal compounds in five wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, 473-474, 235-243.
- Guruge, K.S., Goswami, P., Tanoue, R., Nomiyama, K., Wijesekara, R.G.S., Dharmaratne, T.S., 2019. First nationwide investigation and environmental risk assessment of 72 pharmaceuticals and personal care products from Sri Lankasurface waterways. *Science of the Total Environment*, 690, 683-695.
- Gurung, K., Ncibi, M. C., Sillanpää, M., 2019. Removal and fate of emerging organic micropollutants (EOMs) in municipal wastewater by a pilot-scale membrane bioreactor (MBR) treatment under varying solid retention times. *Science of the Total Environment*, 667, 671-680.
- Gwenzi, W., Mangori, L., Danha, C., Chaukura, N., Dunjana, N., Sanganyado, E., 2018. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 636, 299-313.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., Lee, C. H., 2014. *Membrane biological reactors*. IWA Publishing, UK. ISBN 9781780400655.
- Hai, F.I., Li, X., Price, W.E., Nghiem, L.D., 2011a. Removal of carbamazepine and sulfamethoxazole by MBR under anoxic and aerobic conditions. *Bioresource Technology*, 102 (22), 10386-10390.
- Hai, F.I., Nghiem, L.D., Khan, S.J., Asif, M.B., Price, W.E., Yamamoto, K., 2019. Removal of emerging trace organic contaminants (TrOC) by MBR. In: Hai, F.I., Yamamoto, K., Lee, C. (Eds.), *Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse*. IWA publishing, London, United Kingdom, pp. 413-468.
- Hamon, P., Moulina, P., Ercoleib, L., Marrota, B., 2018. Oncological ward wastewater treatment by membrane bioreactor: Acclimation feasibility and pharmaceuticals removal performances. *Journal of Water Process Engineering*. 21, 9-26.
- Hemmati, A., Dolatabad, M.M., Naeimpoor, F., Pak, A., Mohammadi, T., 2012. Effect of hydraulic retention time and temperature

- on submerged membrane bioreactor (SMBR) performance. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29, 369–376.
- Hignite, C., Azarnoff, D.L., 1977. Drugs and drugs metabolites as environmental contaminants: chlorophenoxyisobutyrate and salicylic acid in sewage water effluent. *Life Sciences*, 20, 337–341.
- Hocaoglu, S. M., Insel, G., Ubay Cokgor, E., Orhon, D., 2011. Effect of sludge age on simultaneous nitrification and denitrification in membrane bioreactor. *Bioresour Technol*, 102, 6665–6672.
- Hocaoglu, S. M., Celebi, M.D., Basturk, I., Partal, R., 2021. Treatment-based hospital wastewater characterization and fractionation of pollutants, *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102205.
- Isik, O., Erbil, M. C., Abdelrahman, A. M., Ersahin, M. E., Koyuncu, I., Ozgun, H., Demir, I., 2022. Removal of micropollutants from municipal wastewater by membrane bioreactors: Conventional membrane versus dynamic membrane. *Journal of Environmental Management* 303, 114233.
- Janex-Habibi, M. L., Huyard, A., Esperanza, M., Bruchet, A., 2009. Reduction of endocrine disruptor emissions in the environment: the benefit of wastewater treatment. *Water Research*, 43, 1565–76.
- Karakas, I., 2022. Hastane Atıksularının Toz Aktif Karbon İlavesiyle Membran Biyoreaktörde Arıtımı. Yayınlanmamış Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul.
- Kasonga, T. K., Coetzee, A. A. M., Kamika, I., Ngole-Jeme, M. V., Ndombo, M., Momba, B. 2021. Endocrine-disruptive chemicals as contaminants of emerging concern in wastewater and surface water: A review. *Journal of Environmental Management*, 277, 111485.
- Kaya, Y., Ersan, G., Vergili, I., Gönder, B. Z., Yılmaz, G., Dizge, N., Aydiner, C., 2013. The treatment of pharmaceutical wastewater using in a submerged membrane bioreactor under different sludge retention times. *Journal of Membrane Science*, 442, 72–82.
- Kaya, Y., Bacaksiz, M.A., Golebatmaz, U., Vergili, I., Gonder, Z. B., Yılmaz, G., 2016. Improving the performance of an aerobic membrane bioreactor (MBR) treating pharmaceutical wastewater with powdered activated carbon (PAC) addition. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 39, 661–676.
- Kim, M., Guerra, P., Shah, A., Parsa, M., Alae, M., Smyth, S.A., 2014. Removal of pharmaceuticals and personal care products in a membrane bioreactor wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 69, 2221–2229.
- Klatte, S., Schaefer, H.-Ch, Hempel, M., 2017. Pharmaceuticals in the environment: a short review on options to minimize the exposure of humans, animals and ecosystems. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 5, 61–66.
- Kolpin, D.W., Skopec, M., Meyer, M.T., Furlong, E.T., Zaugg, S.D. 2004. Urban contribution of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants to streams during differing flow conditions. *Science of the Total Environment*, 328, 119–30.
- Köck-Schulmeyer, M., Villagrasa, M., Lopez de Alda, M., Cespedez-Sanchez, R., Ventura, F., Barcelo, D. 2013. Occurrence and behavior of pesticides in wastewater treatment plants and their environmental impact. *Science of the Total Environment*, 458, 466–76.
- Kruglova, A., Kråkström, M., Riska, M., Mikola, A., Rantanen, P., Vahala R., Kronberg, L., 2016. Comparative study of emerging micropollutants removal by aerobic activated sludge of large laboratory-scale membrane bioreactors and sequencing batch reactors under low-temperature conditions. *Bioresour Technol*, 214, 81–88.
- Krzeminski, P., Iglesias-Obelleiro, A., Madebo, G., Garrido, J.M., van der Graaf, J.H.J.M., van Lier, J.B., 2012. Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment. *Journal of Membrane Science*, 423(424), 348–361.
- Leiviskä, T., Risteelä, S., 2022. Analysis of pharmaceuticals, hormones and bacterial communities in a municipal wastewater treatment plant – Comparison of parallel full-scale membrane bioreactor and activated sludge systems. *Environmental Pollution* 292, 118433.
- Li, X., Hai, F. I., Nghiem, L. D., 2011. Simultaneous activated carbon adsorption within a membrane bioreactor for an enhanced micropollutant removal. *Bioresour Technol*, 102(9), 5319–5324.
- Li, W.C., 2014. Occurrence, sources, and fate of pharmaceuticals in aquatic environment and soil. *Environ. Pollut.* 187, 193–201.
- Li, C., Cabassud, C., Guigui, C., 2015. Evaluation of membrane bioreactor on removal of pharmaceutical micropollutants: a review. *Desalination and Water Treatment*, 55, 845–858.
- Lin, A.Y.-C., Tsai, Y.-T., 2009. Occurrence of pharmaceuticals in Taiwan's surface waters: impact of waste streams from hospitals and pharmaceutical production facilities. *Sci Total Environ* 407, 3793–3802
- Liu, J., Lu, G., Xie, Z., Zhang, Z., Li, S., Yan, Z., 2015. Occurrence, bioaccumulation and risk assessment of lipophilic pharmaceutically active compounds in the downstream rivers of sewage treatment plants. *Science of the Total Environment*, 511, 54–62.
- Liu, W., Song, X., Na, Z., Li, G., Luo, W., 2022. Strategies to enhance micropollutant removal from wastewater by membrane bioreactors: Recent advances and future perspectives. *Bioresour Technol*, 344, 126322.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., Wang, X. C., 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473–474, 619–641.
- Meng, F., Shi, B., Yang, F., Zhang, H., 2007. Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors. *Bioprocess Biosyst Engineering*, 30, 359–367.
- Mezzelani, M., Gorbi, S., Da Ros, Z., Fattorini, D., d'Errico, G., Milan, M., Bargelloni, L., Regoli, F., 2016a. Ecotoxicological potential of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs) in marine organisms: bioavailability, biomarkers and natural occurrence in *Mytilus galloprovincialis*. *Marine Environmental Research*, 121, 31–39.
- Mezzelani, M., Gorbi, S., Fattorini, D., d'Errico, G., Benedetti, M., Milan, M., Bargelloni, L., Regoli, F., 2016b. Transcriptional and cellular effects of non-Steroidal Anti-inflammatory drugs (NSAIDs) in experimentally exposed mussels, *Mytilus galloprovincialis*. *Aquatic Toxicology*, 180, 306–313.
- Mezzelani, M., Gorbi, S., Fattorini, D., d'Errico, G., Consolandi, G., Milan, M., Bargelloni, L., Regoli, F., 2018. Long-term exposure of *Mytilus galloprovincialis* to Diclofenac, Ibuprofen and Ketoprofen: insights into bioavailability, biomarkers and transcriptomic changes. *Chemosphere*, 198, 238–248.
- Mir-Tutusaus, J.A., Parlade, E., Llorca, M., Villagrasa, M., Barcelo, D., Rodriguez-Mozaz, S., Martinez-Alonso, M., Gaju, N., Caminal,

- G., Sarra, M., 2017. Pharmaceuticals removal and microbial community assessment in a continuous fungal treatment of non-sterile real hospital wastewater after a coagulation-flocculation pretreatment. *Water Research*, 116, 65-75.
- Mir-Tutusaus, J.A., Baccar, R., Caminal, G., Sarrà, M., 2018. Can white-rot fungi be a real wastewater treatment alternative for organic micropollutants removal A review. *Water Research*, 138, 137-151.
- Morabet, R. E., Khan, R. A., Mallick, J., Khan, N. A., Ahmed, S., Dhingra, A., Khan, A. R., Alsubih, M., Alqadhi, S., Bindajam, A., 2020. Comparative study of submerged membrane bioreactor and extended aeration process coupled with tubesettler for hospital wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*, 59, 4633-4641.
- Morehead, M. S., Scarbrough, C. 2018. Emergence of global antibiotic resistance. *Primary Care: Clinics in Office Practice*, 45, 467-484.
- Nadeema, K., Alliet, M., Plana, Q., Bernier, J., Azimi, S., Rocher, V., Albasi, C., 2022. Modeling, simulation and control of biological and chemical P-removal processes for membrane bioreactors (MBRs) from lab to full-scale applications: State of the art. *Science of the Total Environment*, 809, 151109.
- Nguyen, T., Bui, X. T., Luu, V. P., Nguyen, P. D., Wenshan Guo, W., Ngo, H. H., 2017. Removal of antibiotics in sponge membrane bioreactors treating hospital wastewater: Comparison between hollow fiber and flat sheet membrane systems. 240, 42-49.
- Noutsopoulos, C., Koumaki, E., Sarantopoulos, V., Mamais, D., 2019. Analytical and mathematical assessment of emerging pollutants fate in a river system. *Journal of Hazardous Materials*, 364, 48-58.
- Ouarda, Y., Tiwari, B., Azais, A., Vaudreuil, M. A., Ndiaye, S. D., Drogui, P., Tyagi, R. D., Sauve, S., Desrosiers, M., Buelna, G., Dube, R., 2018. Synthetic hospital wastewater treatment by coupling submerged membrane bioreactor and electrochemical advanced oxidation process: Kinetic study and toxicity assessment. *Chemosphere*, 193, 160-169.
- Ouarda, Y., Bouchardb, F., Azaisa, A., Vaudreuilc, M. A., Drogua, P., Tyagia, R. D., Sauvéc, S., Buelnad, G., Dubéd, R., 2019. Electrochemical treatment of real hospital wastewaters and monitoring of pharmaceutical residues by using surrogate models. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7, 103332.
- Özcan, Ö., Kayseri Organize Sanayi Bölgesi Atıksularında Mikrokirleticilerin Pilot Ölçekli Membran Biyoreaktör ve Ters Ozmoz Sistemleri ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, 2017, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi.
- Padhye, L.P., Yao, H., Kung'u, F.T., Huang, C.H., 2014. Year-long evaluation on the occurrence and fate of pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disrupting chemicals in an urban drinking water treatment plant. *Water Resource*, 51, 266-276.
- Pal, A., Gin, A.Y.-C., Reinhard, M., 2010. Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of the Total Environment*, 408, 6062-606.
- Pathak, N., Tran, V.H., Merenda, A., Johir, M.A.H., Phuntsho, S., Shon, H., 2020. Removal of organic micro-pollutants by conventional membrane bioreactors and high-retention membrane bioreactors. *Applied Sciences*. 10 (8), 2969.
- Phan, H. V., Hai, F. I., Zhang, R., Kang, J., Price, W. E., Nghiema, L. D., 2016. Bacterial community dynamics in an anoxic-aerobic membrane bioreactor – Impact on nutrient and trace organic contaminant removal. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 109, 61-72.
- Parliament and of the Council. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 Amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy Text with EEA relevance.
- Pauwels, B., Verstraete, W., 2006. The treatment of hospital wastewater: an appraisal. *Journal of Water and Health*, 4(4), 405-476.
- Peake, B. M., Braund, R., Tong, Y.C.A., Tremblay, L. A., 2016. Detection and presence of pharmaceuticals in the environment. *The Life-Cycle of Pharmaceuticals in the Environment*. 77-107.
- Prasertkulsak, S. Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Itonaga, T., Yamamoto, K., 2019. Removals of pharmaceutical compounds from hospital wastewater in membrane bioreactor operated under short hydraulic retention time. *Chemosphere*, 150, 624-631.
- Radjenovic, J., Petrovic, M., Barcelo, D., 2007. Analysis of pharmaceuticals in wastewater and removal using a membrane bioreactor. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387, 1365-1377.
- Radjenovic, J., Petrovic, M., Barcelo, D., 2009. Fate and distribution of pharmaceuticals in wastewater and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment. *Water Resource*, 43, 831-841.
- QuintilesIMS and its affiliates, 2015. *Global Medicines Use in 2020. Outlook and Implications*, pp. 9-21.
- Richardson, M.L., Bowron, J.M., 1985. The fate of pharmaceutical chemicals in the aquatic environment. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 37, 1-12.
- Sabri, N., Schmitt, H., Van der Zaan, B., Gerritsen, H., Zuidema, T., Rijnaarts, H., Langenhoff, A., 2018. Prevalence of antibiotics and antibiotic resistance genes in a wastewater effluent-receiving river in the Netherlands. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 102245.
- Sahar, E., Messalem, R., Cikurel, H., Aharoni, A., Brenner, A., Godehardt, M., Jekel, M., Ernst, M., 2011. Fate of antibiotics in activated sludge followed by ultrafiltration (CAS-UF) and in a membrane bioreactor (MBR). *Water Research*, 45, 4827-4836.
- Santos, J.L., Aparicio, I., Callejon, M., Alonso, E., 2009. Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from four wastewater treatment plants in Seville (Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 164, 1509-1516.
- Santos, L.H.M.L.M., Araújo, A.N., Fachini, A., Pena, A., Delerue-Matos, C., Montenegro, M.C.B.S.M., 2010. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 45-95.
- Sangion, A., Gramatica, P., 2016. PBT assessment and prioritization of contaminants of emerging concern: pharmaceuticals. *Environmental Research*, 147, 297-306.
- Seiraa, J., Sablayrolles, C., Montréjaud-Vignoles, M., Albasi, C., Joannis-Cassan, C., 2016. Elimination of an anticancer drug (cyclophosphamide) by a membrane bioreactor: Comprehensive study of mechanisms, 114, 155-163.
- Sipma, J., Osuna, B., Collado, N., Monclús, H., Ferrero, G., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., 2010. Comparison of removal of pharmaceuticals in MBR and activated sludge systems, *Desalination*, 250, 653-659.
- Sharma, V.K., Johnson, N., Cizmas, L., McDonald, T.J., Kim, H., 2016. A review of the influence of treatment strategies on antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes. *Chemosphere* 150, 702-714.

- Smith, A.L., Stadler, L.B., Love, N.G., Skerlos, S.J., Raskin, L., 2012. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: a critical review. *Bioresource Technology*, 122, 149–159.
- Stevens-Garmon, J., Drewes, J.E., Khan, S.J., MacDonald, J.A., 2011. Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids. *Water Resource*, 45, 3417–3426.
- Stasinakis A. S, Gatidou G, Mamais D, Thomaidis N. S, Lekkas T. D., 2008. Occurrence and fate of endocrine disrupters in Greek sewage treatment plants. *Water Resource*, 42, 1796–804
- Stasinakis, A. S., Thomaidis, N. S., Arvaniti, O. S., Asimakopoulos, A. G., Samaras, V. G., Ajibola, A., Lekkas, T. D., 2013. Contribution of primary and secondary treatment on the removal of benzothiazoles, benzotriazoles, endocrine disruptors, pharmaceuticals and perfluorinated compounds in a sewage treatment plant. *Science of the Total Environment*, 463(464), 1067–1075.
- Stevens-Garmon, J., Dreves, J. E., Khan, S. J., Mc-Donald, J. A., Dickenson, E. R. V., 2011. Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids. *Water Resource*, 45, 3417–3426.
- Stülten, D., Zühlke, S., Lamshöft, M., Spittler, M., 2008. Occurrence of diclofenac and selected metabolites in sewage effluents. *Science of the Total Environment*, 310–316.
- Suárez, S., Reif, R., Lema, J. M., Omil, F., 2012. Mass balance of pharmaceutical and personal care products in a pilot-scale single-sludge system: Influence of T, SRT and recirculation ratio. *Chemosphere*, 89(2), 164–171.
- Tadkaew, N., Sivakumara, M., Khan, S. J., McDonald, J. A., DucNghiem, L., 2010. Effect of mixed liquor pH on the removal of trace organic contaminants in a membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 101, 1494–1500.
- Taheran, M., Brar, S. K., Verma, M., Surampalli, R. Y., Zhang, T.C., Valero, J.R., 2016. Membrane processes for removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from water and wastewaters. *Science of the Total Environment*, 547, 60–77.
- Tambosi, J. L., Sena, R. F., Favier, M., Gebhardt, W., José, H. J., Schröder, H. F., Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira, R. F. P. M. (2010). Removal of pharmaceutical compounds in membrane bioreactors (MBR) applying submerged membranes. *Desalination*, 261, 148–156.
- Ternes, T. A., 1998. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Resource*, 32(11), 3245–3260.
- Ternes, T. A., Joss, A., Siegrist, H., 2004a. Peer reviewed: scrutinizing pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment. *Environment Science & Technology*, 38, 392A–399A.
- Ternes, T. A., Janex-Habibi, M. L., Knacker, T., Kreuzinger, N., Siegrist, H., 2004b. Assessment of Technologies for the removal of pharmaceuticals and personal care products in sewage and drinking water facilities to improve the indirect potable water reuse (POSEIDON), 61.
- Tiwari, B., Sellamuthu, B., Choquette, S. P., Drogui, P., Tyagi, D. R., Vaudreuil, M. A., Sauve, S., Buelna, G., Dube, R., 2021. Acclimatization of microbial community of submerged membrane bioreactor treating hospital wastewater. *Bioresource Technology*, 319, 124223.
- Tiwari, B., Sellamuthu, B., Piché-Choquette, S., Drogui, P., Tyagi, R.D., Buelna, G., Vaudreuil, M.A., Sauvé, S., Dube, R., Surampalli, R.Y., 2021a. Compositional microbial-community shift of submerged membrane bioreactor treating hospital wastewater at varying temperatures. *Journal of Environmental Engineering*, 147 (2), 4020152.
- Tran, N. H., Chen, H., Reinhard, M., Mao, F., Yew-Hoong Gin, K., 2016. Occurrence and removal of multiple classes of antibiotics and antimicrobial agents in biological wastewater treatment processes. *Water Research*, 104, 461–472.
- Trinh, T., van den Akker, B., Coleman, H.M., Stuetz, R.M., Drewes, J.E., Le-Clech, P., Khan, S.J., 2016. Seasonal variations in fate and removal of trace organic chemical contaminants while operating a full-scale membrane bioreactor. *Science of the Total Environment*, 550, 176–183.
- Türkyılmaz, A., Işınkaralar, K., 2020. Sulu Çözeltilerden Aktif Karbon Üzerine Adsorpsiyon ile Antibiyotiklerin (Tetrasiklin ve Penisilin G) Giderimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 943 – 951.
- Urase, T., Kagawa, C., Kikuta, T., 2005. Factors affecting removal of pharmaceutical substances and estrogens in membrane separation bioreactors. *Desalination*, 178, 107–113.
- Verlicchi, P., Galletti, A., Petrovic, M., Barcelo, D., 2010. Hospital effluents as a source of emerging pollutants: an overview of micropollutants and sustainable treatment options, *Journal of Hydrology*, 389, 416–428.
- Verlicchi, P., Al Aukidy, M., Zambello, E., 2015. What have we learned from worldwide experiences on the management and treatment of hospital effluent? - An overview and a discussion on perspectives. *Science of the Total Environment*, 514, 467–491.
- Vyrides, I., Conteras, P.A., Stuckey, D.C., 2010. Post-treatment of a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) saline effluent using powdered activated carbon (PAC). *Journal of Hazardous Materials*, 177, 836–841.
- Weissbrodt, D., Kovalova, L., Ort, C., Pazhepurackel, V., Moser, R., Hollender, J., Siegrist, H., Mcardell, C.S., 2009. Mass flows of X-ray contrast media and cytostatics in hospital wastewater. *Environmental Science & Technology*, 43, 4810–4817.
- Wijekoon, K.C., Hai, F.I., Kang, J., Price, W.E., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L.D., 2013. The fate of pharmaceuticals, steroid hormones, phytoestrogens, UV-filters and pesticides during MBR treatment. *Bioresource Technology*, 144, 247–254.
- Yamamoto, H., Nakamura, Y., Moriguchi, S., Honda, Y., Tamura, I., Hirata, Y., Hayashi, A., Sekizawa, J., 2009. Persistence and partitioning of eight selected pharmaceuticals in the aquatic environment: laboratory photolysis, biodegradation, and sorption experiments. *Water Research*, 43, 351–362.
- Yang, Y., Ok, Y.S., Kim, K.-H., Kwon, E.E., Tsang, Y.F., 2017. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/ sewage treatment plants: a review. *Science of the Total Environment*, 596–597, 303–320.
- Yilmaz, G., Kaya, Y., Vergili, I., Gönder, B. Z., Özhan, G., Celik, O. B., Altinkum, M. S., Bagdatli, Y., Boergers, A., Tuerk, J., 2017. Characterization and toxicity of hospital wastewaters in Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 189: 55.
- Yılmaz, G. (yürütücü), Kaya, Y., Vergili, I., Gönder, B. Z., Özhan, G., Celik, O. B., Altinkum, M. S., Bagdatli, Y., Karakas, I., Ilyasoglu, G., 2018. Hastane atıksularının karakterizasyonu ve toz aktif karbon ilaveli membran biyoreaktörde arıtımı, TÜBİTAK 1001 Projesi, Proje no: 114Y192.
- Zhang, Y., Geissen, S.U., Gal, C., 2008. Carbamazepine and diclofenac: removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere* 73, 1151–1161.

- Zhou, H., Wu, C., Huang, X., Gao, M., Wen, X., Tsuno, H., 2010. Occurrence of selected pharmaceuticals and caffeine in sewage treatment plants and receiving Rivers in Beijing, China. *Water Environ Research*, 82, 2239-2248.
- Zhu, Y., Wang, Y., Zhou, S., Jiang, X., Ma, X., Liu, C., 2018. Robust performance of a membrane bioreactor for removing antibiotic resistance genes exposed to antibiotics: Role of membrane foulants. *Water Resource*, 130, 139-150.



ANAEROBİK ÇÜRÜTME ÖNCESİ ATIK BİYOLOJİK ÇAMURLARIN MİKRODALGA RASYONU İLE DEZENTEGRASYONU

Ali Abdulzahra Ali ALHRAİSHAWİ^{1*}, Şükrü ASLAN²

¹Department of Civil Engineering, College of Engineering, Misan University, Iraq

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Biyolojik Çamur,
Mikrodalga Radyasyonu,
Dezintegrasyon,
Metan Üretimi.*

Öz

Kentsel yerleşim alanlarındaki nüfus artışı, belediye atıksu arıtma tesislerinde (AAT) biyolojik çamur üretiminde artışa neden olmaktadır. Yüksek bertaraf maliyeti ve yasal kısıtlama, AAT'nde biyolojik çamur yönetimi konusunda karşılaşılan en önemli sorunlardır. Son yıllarda, AAT'nde atık çamur üretimini azaltmak ve anaerobik çürütme ünitesinde üretilen biyogaz hacmini artırmak için daha çevreci ve ekonomik yöntemler geliştirmek amacı ile deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Anaerobik çürütme reaktöründe biyolojik bozunma için gereken uzun hidrolik alıkonma süresi, atık biyolojik çamurun (ABÇ) dezintegrasyonu ile azaltılabilir. Biyolojik çamurun parçalanması, çözeltiye organik ve inorganik maddelerin salınmasını sağlar. Anaerobik reaktör girişindeki organik madde derişiminin artması, çürütme verimini artırır. Dezintegrasyon, biyolojik çamurun yavaş ve kısmen parçalanabilir kısmının anaerobik çürütme sürecinde, biyokütle tarafından daha kolay kullanılabilen bileşiklere dönüştürülmesini sağlar. Anaerobik çamur çürütme (AÇÇ) sürecinde, biyogaz üretim verimliliğini artırmak için termal, kimyasal, mekanik ve ileri oksidasyon işlemleri gibi biyolojik çamur dezintegrasyon yöntemleri veya bunların kombinasyonları uygulanmaktadır. Bu derleme çalışmasının temel amacı, anaerobik çamur çürütmede biyogaz üretimi dikkate alınarak biyolojik çamur dezintegrasyonunda mikrodalga radyasyon (MD) mekanizmasını tanıtmaktır. Çeşitli çalışma koşulları altında, MD ile dezintegrasyon yönteminin etkinliği, ısıtma prensipleri, çamur ayrışması, biyogaz üretimi açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca MD/H₂O₂, MD/UV vd. MD ile birleşik sistem verimliliği, tekil MD radyasyon süreci ile karşılaştırılmıştır.

DISINTEGRATION OF WASTE BIOLOGICAL SLUDGES BY MICROWAVE RADIATION BEFORE ANAEROBIC DIGESTION

Keywords

*Biosludge,
Microwaveirridiation,
Disintegration,
Methane Production.*

Abstract

The growth of population in the urban areas leads to an increase in the biological sludge production in the municipal wastewater treatment plants (WWTP). The most important problems on the biosludge management in the WWTP are the high disposal cost and legal constraint. In recent years, experimental studies have been carried out to develop more environmental friendly and economical methods in order to reduce the amount of waste sludge production in the WWTP and increase in the biogas volume produced in an anaerobic digestion unit. The long hydraulic retention time required for the biodegradation in the anaerobic digestion reactor can be reduced by the disintegration of waste biological sludge (WBS). The disintegration of biosludge provides the release of organic and inorganic substances into the solution. An increase of organic substances concentration in the inlet of anaerobic reactor improves the digestion efficiency. In the disintegration process, a slow and partial degradable organic fractions of biosludge are converted into the readily biologically available compounds in the anaerobic digestion process. In order to improve the biogas production in the anaerobic sludge digestion, several disintegration methods such as thermal, chemical, mechanical, and advance

* İlgili yazar / Corresponding author: alihussin2294@uomisan.edu.iq, +90-552-354-6612

oxidation processes or their combinations are applied. The main goal of the present review paper is to introduce the biological sludge disintegration by the microwave (MW) radiation considering the biogas production in the anaerobic digestion process. Under various operating conditions, the effectiveness of MW disintegration method was investigated in terms of heating principles, sludge disintegration, and biogas production. Additionally, the efficiency of hybrid systems such as MW/H₂O₂, MW/UV, etc. were compared with the singular MW radiation process.

Alıntı / Cite

Alhraishawi, A., Aslan, Ş., (2022). Anerobik Çürütme Öncesi Atık Biyolojik Çamurların Mikrodalga Radyasyonu İle Dezentegrasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 740-760.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Alhraishawi , 0000-0003-4099-9042
Ş.Aslan , 0000-0001-8735-8029

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 02.05.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 05.11.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 17.12.2021 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

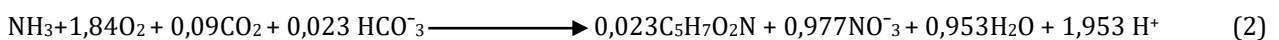
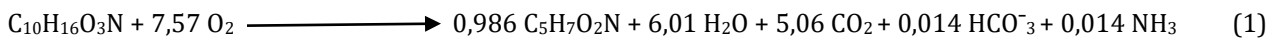
Artış hızı dikkate alındığında 2030 yılında dünya nüfusunun 9 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir. Nüfus artış hızı gelişmekte olan ülkelerde daha yüksek gerçekleşirken, gelişmiş ülkelerin nüfusunun yaklaşık 1 milyarda sabit kalacağı ve kırsal alanlardan kentsel alanlara güçlü bir göç olacağı öngörülmektedir (Jhansi ve Mishra, 2013). Plansız kentleşme ve göç sonucu bazı ülkelerin gelişmiş yerleşim alanlarında kontrol edilemeyen nüfus yoğunluğundaki artış, geleceğe yönelik alt yapı yatırımlarının planlamasını güçleştirmektedir. Gelecekte ise küresel ısınma sonucu bazı ülkelerin kuraklık sorunu ile karşılaşacağı ve küresel bir göç probleminin ortaya çıkaracağı tahmin edilmektedir. Öngörülemeyen nüfus yoğunluğu değişimi, yerleşim alanlarında gerekli su hacminin belirlenmesini ve su kaynaklarının planlamasını zorlaştırmaktadır. Özellikle büyük yerleşim alanlarında nüfus yoğunluğunun artması, su tüketimini yükseltmektedir. Endüstriyel ve evsel su kullanımı ile oluşan atıksular, kanalizasyon sistemi ile toplanmakta ve alıcı ortama verilmeden önce ekolojik dengeyi korumak için arıtılmaktadır.

Endüstriyel ve kentsel hızlı büyüme sonucu su kullanımının artması ile arıtma tesislerinde (AAT) alıcı ortama verilmeden önce çok yüksek hacimde atıksuyun arıtılması gerekmektedir. Atıksu arıtımında, organik madde, fosfor ve azot bileşiklerinin gideriminde yüksek verimleri nedeniyle biyolojik yöntemler, tercih edilmektedir. Ayrıca kimyasal madde gereksinimi olmaması, kimyasal atık oluşturulmaması, biyolojik arıtımın uygulamada daha fazla tercih edilmesini sağlamaktadır.

Atıksu içeriğindeki atık maddeler, boyutlarına göre AAT'lerinde fiziksel arıtım olarak tanımlanan ızgara, kum ve yağ tutucu ve ön çökeltim havuzlarında ayrılmaktadır. Fiziksel arıtımın temel amacı biyolojik reaktöre gelen kirlilik yükünün azaltılmasıdır. Fiziksel arıtım çıkış suyunda bulunan çözünmüş ve partikül formdaki kirleticiler (organik madde, azot bileşikleri, fosfor vd.) biyolojik reaktöre gelmektedir. Biyolojik reaktörde ise kirleticiler, çökebilir form olan biyokütle (basitleştirilmiş ampirik formül, C₅H₇O₂N veya C₆₀H₈₇O₂₃N₁₂P) ve uygulanan sürece göre (aerobik, anoksik, anaerobik) son ürünlere (CO₂, H₂O, N₂, CH₄ vd.) dönüştürülmektedir. Atıksu içeriğindeki biyokütle tarafından besi maddesi olarak tüketilen kirleticilerin (organik madde, NH₄⁺, PO₄-P) yanı sıra, farmasötikler, yüzey aktif maddeler, poliaromatik hidrokarbonlar, vd. bazı daha karmaşık organik kirleticiler ve ağır metallerin önemli bir kısmı ABÇ'a adsorbe edilir veya biriktirilir (Christodoulou ve Stamatelatos, 2016). Biyolojik reaktörde oluşan atık biyolojik çamur (ABÇ), son çökeltim havuzunda çöktürüldükten sonra uygun yöntemler ile bertaraf edilmektedir.

Evsel nitelikli atıksuların arıtımında son yıllarda inşaa edilen mevcut AAT'lerinde ön çökeltim havuzu bulunmamaktadır. Biyolojik arıtımda yaygın olarak uzun katı alıkonma süresine sahip (KAS/SRT/Çamur yaşı) askıda büyüme süreçleri uygulanmaktadır. Ön çökeltim uygulanmaması ile literatürde birincil çamur olarak tanımlanan organik madde içeriği yüksek atıksu, biyolojik reaktöre alınmaktadır.

Biyolojik arıtımda organik madde ve amonyak oksidasyonu ile üretilen biyokütle miktarı, ampirik olarak denklem 1 ve 2 ile tanımlanmaktadır (Barber, 2014).



Denklemdede; $C_{10}H_{16}O_3N$; atıksuyun ampirik formülü, biyokütle verimi (Y): 0,56 g $C_5H_7O_2N/g$ $C_{10}H_{16}O_3N$ ve 0,153g $C_5H_7O_2N/gNH_3$ olarak hesaplanmaktadır.

ABÇ'un katı madde özellikleri ve miktarı, çamur susuzlaştırma ve bertaraf yöntem seçiminde dikkate alınır. Temel yöntemler; yoğunlaştırma, şartlandırma, stabilizasyon, susuzlaştırma ve nihai bertaraf yöntemleri (yakma ve arazi uygulaması) olarak sınıflandırılabilir. ABÇ içeriğinde başlıca organik madde, azot, fosfor vd. bulunması ve olumsuz sağlık etkisi nedeni ile çevresel açıdan oldukça önemli bir sorun teşkil etmektedir.

ABÇ'un yüksek organik madde içeriği, anaerobik çürütülmesi (AÇÇ) ile enerji kaynağı olarak kullanılabilen CH_4 gazı içeren biyogaz oluşumuna olanak sağlamaktadır. Yaklaşık olarak % 97-99 su içeriğine sahip ABÇ'un, çöp deponi alanlarında daha düşük hacimlerde biriktirilebilmesi için susuzlaştırılması gerekmektedir.

21. yüzyılda AB politikaları, atık yönetiminin gözden geçirilmesine, biyo-atık yönetmeliklerinin yeniden değerlendirilmesine ve enerji stratejisinin uygulanmasına odaklanmıştır. AB tarafından temel hedef, ekonomi olarak belirlenerek, "Atığın Sonu", tehlikeli atıkların revizyonu, Gübre Yönetmeliğinin revizyonu, fosfor vd. olmak üzere biyolojik parçalanabilir atıkların, sürdürülebilir kullanımı konusunda çok sayıda girişim ve strateji desteklenmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan % 20 oranında enerji üretimi, AB mevzuatı çerçevesinde 2020 yılı için hedef olarak belirlenmiştir. Sürdürülebilir enerji üretiminin bir yolu olarak biyogaz üretiminin geliştirilmesi için AÇÇ teşvik edilmektedir (Christodoulou ve Stamatelatos, 2016). Ayrıca, AÇÇ süreci, farklı yöntemlerle işlendiğinde, yüksek oranlarda P ve N gibi nutrientleri içeren ve toprak iyileştirilmesinde kullanılabilen yararlı atık ürün sağlamaktadır (Lu vd., 2019; Wainaina vd., 2020).

AÇÇ sürecinin temel avantajları, CH_4 gazı elde edilebilmesi ve atıklarının toprak iyileştirmede kullanılabilmesi olarak görülmektedir (Christodoulou ve Stamatelatos, 2016; Iacovidou vd., 2012). Son yıllarda, AAT işletimi için gerekli toplam enerji ihtiyacının, atık çamurun AÇÇ süreci ile arıtımından elde edilen biyogaz ile karşılanması hedeflenmektedir. Ayrıca, enerji tüketimini ve karbon salınımını azaltmak için enerji açısından kendi kendine yeten arıtım işletim modelleri konusunda çalışmalar yapılmaktadır (Kor-Bicakci ve Eskicioglu, 2019). ABÇ yapısında bulunan zor parçalanabilir organik bileşenlerin, AÇÇ süreci öncesi ön işlemler ile parçalanması (dezentegrasyon) çamur içeriğindeki biyolojik parçalanabilir organik madde derişimini yükseltmekte ve sonuçta CH_4 gaz veriminde iyileşme sağlanmaktadır.

Bu derleme çalışmasında AAT'lerinde oluşan biyolojik çamurların (biyoçamur) dezentegrasyonunda mikrodalga (MD) radyasyon işletim koşulları olan hedef sıcaklık, sıcaklık yükselme hızı ve uygulanan gücün ABÇ parçalanmasında etkisi incelenmiştir. Ayrıca, MD ile birlikte uygulanan yöntemler (hibrit) ve işletim koşulları, AÇÇ'de oluşan CH_4 gazı ve atık içeriğindeki kirleticiler olan azot ve fosfor ele alınmıştır.

1.1. Çamur Üretimi (Sludge Production)

AAT'lerinde elektrik enerjisi, toplam işletme maliyetinin %25-40'ını oluştururken, çamur arıtımı işletme maliyetinin %50-%60'ını kapsamaktadır (Di Fraia vd., 2018). Daha sıkı yasal düzenlemeler sonucu ABÇ bertarafı, çevresel açıdan oldukça önemli bir sorun olarak görülmektedir (Desa, 2013, Canales vd., 1994). Çin'de 2016 yılında, 6 milyon tondan daha yüksek miktarda kuru katı madde olarak çamur üretilmiştir (Zhang vd., 2016). Avrupa Birliği (AB) nüfusu, 2010'da yaklaşık 499 milyon iken düşük nüfus artış hızı ile 2020 yılında 514 milyondan biraz daha düşük olacağı tahmin edilmektedir. Bu tahmine göre AB ülkelerinde çamur miktarının, 2010 yılında yaklaşık 11,8 milyon tondan, 2020'de 13 milyon ton kuru maddeye artacağı öngörülmüştür (Milieu, 2010).

Ülkelerin yaşam kalitesi ve toplumun alışkanlıklarına, uygulanan biyolojik arıtım yöntemlerine göre farklılık göstermesine rağmen biyolojik arıtmada oluşan çamurun kuru katı madde miktarı, belirli aralıklarda tanımlanmaktadır. Barber (2012), kurulu altyapı sistemine göre çamur üretiminin kişi başına günde 10-75 g kuru çamur aralığında olabileceğini belirtmiştir. Avrupa'da, birincil, ikincil ve hatta üçüncül arıtmadan kaynaklanan kuru madde üretimi, 90 g/kişi.gün olarak bildirilmektedir (Fytli ve Zabaniotou, 2008).

TÜİK, 2018 verilerine göre ülkemizde AAT hizmeti verilen nüfusun toplam belediye nüfusuna oranı %79'dur. Türkiye'de mevcut AAT'lerinde, 1.169.612.481 m³/yıl atıksu, biyolojik arıtmaya tabi tutulmakta ve yaklaşık olarak 318.503 ton kuru katı madde olarak çamur üretilmektedir (TÜİK, 2018). 2020 yılı nüfusu 83.614.362 kişi olarak açıklanmıştır (TÜİK, 2021). Türkiye'de 2019 yılında %92,8 olan il ve ilçe merkezlerinde yaşayanların oranı, 2020 yılında %93'e artış gösterirken, belde ve köylerde yaşayanların oranı %7,2'den %7'ye azalmıştır (TÜİK, 2021). Ülkemizde yeni inşaa edilen ve kapasitesi arttırılan AAT'leri ile ilgili son verilere ulaşamadığı için güncel oluşabilecek biyolojik kuru katı madde miktarı, nüfus ve 2018 yılı kuru katı madde miktarı dikkate alındığında, 324.758 ton olarak hesaplanabilir

1.2. Biyoçamur Özellikleri (Properties of Biosludge)

ABC içeriğindeki geniş çeşitliliğe sahip mikrobiyal topluluk, kanalizasyon kaynağına, arıtma koşullarına (örneğin kireçleme ve redoks koşulları), atıksu bileşimine bağlıdır (Nascimento vd., 2018). AAT'lerinde birincil ve ikincil arıtma ünitelerinde, farklı özelliklere sahip çamur üretilmektedir. Evsel nitelikli AAT'ine gelen su içeriğindeki askıda katı maddeler, birincil çamurun % 50-60'ını oluşturmaktadır ve ayrıştırılabilir, ağırlıkça dışkı ve yiyecek atıklarından müteşekkil % 1 katı madde ve görsel açıdan rahatsız edici köpük içermektedir (Colon vd., 2017; Spinosa ve Vesilind, 2001).

Birincil çamur yapısındaki su, yoğunlaştırma/susuzlaştırma ile kolayca azaltılabilir. İkincil çamura kıyasla, birincil çamur, daha büyük partikül boyutuna ve daha yüksek patojen organizma derişimine sahiptir (Verlicchi ve Zambello, 2015). ABC, daha fazla miktarda protein ve fosfor içermesine rağmen birincil çamura göre lipit ve lif derişimi daha düşüktür (Barber, 2014; Kor-Bicakci ve Eskicioğlu, 2019). Arıtma tesisine gelen kağıt lifleri, sebze ve yiyecek artıkları gibi karbonhidrat içeren maddelerin oranının yüksek olması, birincil çamurdaki karbonhidrat yüzdesinin ortalama değerden önemli ölçüde daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan son çökeltim havuzundan atılan fazla çamur, yüksek protein içeriğine sahiptir (Kor-Bicakci ve Eskicioğlu, 2019).

ABC'nin, çeşitli mikrobiyal hücrelerden, organik ve inorganik kimyasallardan ve AÇÇ'ye karşı dirençli hücre dışı polimerik maddelerden (EPS) oluşması nedeni ile biyolojik parçalanabilirliği düşüktür (Carlsson vd. 2012, Koupaie vd. 2016; Parkin vd.,1986). Biyokimyasal bozunma süreçleri ile biyogaz ve düşük miktarda yeni oluşan bakteri kütlelerine dönüştürülen biyoçamurun organik içeriği, temel olarak üç ana bileşen, proteinler, yağlar ve karbonhidratlardan oluşmaktadır. Karbonhidratların bozunabilirliği, monosakkaritlerin bağlanma şekline bağlıdır ve bu nedenle, örneğin, selüloz (3-glikosidik bağlanma) güç parçalanırken, nişasta (a-glikosidik) kolaylıkla parçalanabilir. Proteinler genellikle kolayca parçalanabilir, ancak mikroorganizma hücrelerinin içindeki protoplazmada bulunur ve bu nedenle yalnızca hücre duvarı hasar gördüğünde veya yok edildiğinde erişilebilir (Pinnekamp, 1988). Partiküllerin yavaş hidroliz hızından dolayı ikincil arıtma ünitesinden gelen yoğunlaştırılmış ABC içeriğindeki organiklerin %50'den fazlası, biyolojik olarak parçalanamaz. Geleneksel AÇÇ süreci ile organik içeriğindeki uçucu katıların (UK) % 30-% 45'inin azalması sağlanabilir (Töreci vd., 2010).

2. Anaerobik Çamur Çürütme Süreci (Anaerobic Sludge Digestion Process)

AÇÇ, organik atıkları (biyoçamur, hayvan gübresi, organik içerikli evsel nitelikli çöpler), ısıtma ve elektrik için yenilenebilir bir enerji kaynağı, CH₄ bakımından zengin biyogaza dönüştüren biyolojik bir süreçtir. AÇÇ süreci, organik atık içeriğindeki patojenlerin ve kokunun azalmasını sağlamak ve ayrıca antropojik atıklardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarında düşüş ile iklim değişikliğinde olumsuz etkiyi azaltmaktadır (Akgul vd., 2017). Stabilizasyonu ve enerji geri kazanımı dikkate alındığında sürdürülebilir ABC yönetimi için AÇÇ uygun bir seçenek olarak kabul edilmektedir (Appels vd., 2008; Duan vd., 2012).

ABC'un AÇÇ ile arıtılması için uzun bekleme süresine gereksinim olması, yüksek ilk yatırım giderlerine neden olmaktadır (Appels vd., 2008). Çamur kalınlığını azaltması, CH₄ gazı eldesi ve nutrient içeriği ile zengin son ürünler üretmesi avantajlarına sahip olduğundan AÇÇ süreci, modern bir AAT'inde gerekli bir çamur işleme yöntemi olarak kabul edilir (Matta vd., 2000). Bununla birlikte, AÇÇ için maksimum bozunma seviyesi % 40'a kadar çıkabilir (Neis vd., 2000). ABC içeriğindeki biyokütlenin hücre duvarları, dışsal enzim parçalamasına karşı fiziksel ve kimyasal engeller olduğundan, doğrudan anaerobik parçalamaya dirençli yapılardır (Baier ve Schmidheiny, 1997). Mikrobiyal hücrelerin yanı sıra, aktif çamur flok yapısında önemli bir organik fraksiyon, EPS ve EPS'nin katyonlara bağlanma mekanizmaları, aktif çamurun susuzlaştırılabilirliğini ve ayrıştırılabilirliğini belirleyen önemli bir faktör olarak görülmektedir (Eskicioğlu vd., 2007a). İki değerlikli katyonların EPS üzerindeki negatif bölgelere (polisakkaritler ve proteinler gibi) bağlanarak flok boyutunu, flok mukavemetini ve susuzlaştırılabilirliğini artırabileceğini göstermektedir. Daha spesifik olarak, polisakkaritlerin, lektin benzeri bileşiklerle ilişkili olduğu ve kalsiyum ve magnezyum gibi iki değerlikli katyonlara bağlanabildiği bildirilmektedir. Proteinlerin ise biri demire ve muhtemelen alüminyuma bağlanan ve diğeri iki değerlikli katyonlar ve polisakkaritlerle ilişkili olmak üzere iki fraksiyon içerdiği bulunmuştur. Mevcut iki değerlikli/tek değerlikli katyonların oranına bağlı olarak, iki değerlikli katyonlara bağlı proteinler çökelmeyi ve susuzlaştırmayı iyileştirirken yüksek, tek değerlikli katyon içeriğine sahip çamurların çökmesi ve susuzlaştırılması zor olabilir. AÇÇ, yüksek demir içeriğine sahip çamurlar için en iyi katı parçalanmasını sağlar ve flok bütünlüğü için gerekli olan yüksek miktarlarda iki değerlikli katyonların serbest kalmasını temin edebilir. Bu faktörlerin bir sonucu olarak, AÇÇ'de hidroliz, hız sınırlayıcı basamak haline gelir (Akgul vd., 2017; Eskicioğlu vd., 2007a).

Mezofilik tek aşamalı AÇÇ süreci, AAT'de üretilen ABC'un veya katı atık arıtılmasında en yaygın kullanılan geleneksel çürütme işlemlerinden biridir. Ancak, ABC'un mezofilik AÇÇ işleminde, son yıllarda gelişme olmasına rağmen minimum 15-20 gün KAS gerekmekte ve sadece (% 40-50) kısmi UK parçalanması sağlanmakta (Akgul

vd., 2017; Muller vd., 1998) ve patojenlerin deaktivasyonu sınırlı olmaktadır (Akgul vd., 2017). AÇÇ çıkışında elde edilen biyokatı maddelerin, arazide kısıtlı uygulamalara sahip olması, bu katıların kullanılabilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu sınırlama, kısmen ABÇ'un doğal karmaşık moleküler yapısı, kümelenmiş mikrobiyal hücrelerden ve hücre içi ve hücre dışı EPS'den kaynaklanmaktadır. Hidrolize birlikte direnç yaratan hücreler ve EPS, ABÇ'ların biyolojik bozunmaya nispeten dayanıklı hale gelmesine neden olur ve ABÇ'ların hidrolizi için AÇÇ'de daha uzun KAS gerektirmektedir. AÇÇ ile biyolojik olarak parçalanabilirliğin iyileştirilmesi, çamur flok yapısının bozulmasının geliştirilmesine, hücre dışı ve hücre içi bileşenlere erişilebilirliğin artmasına bağlıdır (Eskicioğlu vd., 2007a). ABÇ doğal yapısı nedeni ile klasik AÇÇ sürecinde KOI azalması % 30-35 ile sınırlıdır (Eskicioğlu vd., 2007a,b). Özellikle yüksek dirençli dezentegrasyon uygulandığında çözünürlüğün artması, ABÇ içeriğindeki yararlanılabilir substrat miktarını yükseltmekte ve her zaman AÇÇ süreci ile CH₄ üretim veriminde iyileşme sağlamaktadır (Kim vd., 2013). ABÇ dezentegrasyonu, sadece hidroliz sürecini hızlandırmakla kalmamakta, çamur susuzlaştırmasını iyileştirirken, bakteri derişimini ve köpüklenmeyi azaltmaktadır (Muller 2001).

3. Biyoçamur Dezentegrasyonu (Disintegration of Biosludge)

AÇÇ sürecinin verimliliği, biyoçamur içeriğinde bulunan partikül organiklerin hidrolizine (hız sınırlayıcı basamak) bağlıdır. Dezentegrasyon yöntemleri ile hidrolize edilebilir bileşiklerdeki kimyasal bağların bozulmasıyla, AÇÇ süreç verimi iyileştirilmektedir (Ahn vd., 2009).

Dezentegrasyon, birincil çamura, ABÇ'ye veya her ikisinin karışımına uygulanabilir. ABÇ'a kıyasla, kolaylıkla parçalanabilen bileşenlere sahip birincil çamurun dezentegrasyonu, AÇÇ sürecinde önemli verim yükselmesi sağlamamaktadır. Uzun KAS'de işletilen anaerobik çürütme sürecinde, karmaşık çamur yapısı nedeniyle ABÇ'nin çürütme verimi, birincil çamurun yaklaşık yarısı kadar olabilir. İkincil çamura göre birincil çamurun anaerobik çürütülmesi ile daha yüksek hacimde CH₄ gazı elde edilmektedir. Bu nedenle, ikincil çamurun dezentegrasyonu sonrası birincil çamurla karıştırılması, AÇÇ sürecinin verimini yükseltmektedir (Kor-Bicakci ve Eskicioğlu, 2019).

Dezentegrasyon süreci, fiziksel, kimyasal, biyolojik ve termal tekniklere veya bunların bir kombinasyonuna dayanmaktadır (Alhraishawi vd., 2020; Carlsson vd., 2012; Hasegawa vd., 2000; Thomas vd.,1993). ABÇ'un dezentegrasyonunda uygulanan tüm yöntemlerin, katıların parçalanmasında verimleri yüksektir. Mikrobiyal hücrelerin çözündürülmesinde, mekanik dezentegrasyon süreçlerinin verimleri yüksek olmasına rağmen süreçler karmaşık ve maliyeti yüksektir (Weemaes vd., 1998). Mekanik dezentegrasyon yöntemleri, çamur yüzey alan artışına neden olduğundan, ABÇ susuzlaştırılması bozulmaktadır. Ayrıca AÇÇ'den sonra çamur susuzlaştırma için polimer gereksiniminde yükselmeye neden olmakta (Muller vd., 1998; Muller vd., 2001) ve toplam ve fekal koliform azaltımında etkisi bulunmamaktadır (Muller vd., 2003). Yüksek sıcaklık ve basıncın bir arada uygulandığı yüksek asidik veya bazik koşullar altında gerçekleştirilen kimyasal ve termokimyasal dezentegrasyon işlemleri çok başarılı olmakla birlikte, agresif reaksiyon koşulları, özel yapılmış malzemelerin kullanımını gerektirmektedir (Tanaka vd., 1997). Sonikasyon yöntemi, çamur hücrelerinin %70-100 elimine edilmesinde etkin olmakta, ancak süreç enerji yoğun yaklaşım olarak tanımlanmaktadır (Hong vd., 2004).

MD radyasyonu ile çamur dezentegrasyonu, termal yöntemlerden birisidir. MD radyasyonu, hızlı ısıtma sağlamakta ve geleneksel ısıtmadan daha düşük güç gerektirmektedir. MD reaksiyon süresine göre patojenler yok edilebilmektedir. MD, kontrolü basit, kompakt ve düşük maliyete sahip bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Jones vd., 2002; Kennedy vd., 2007; Park vd., 2010). Çevre mühendisliğinde, MD radyasyonu, kirli toprak ıslahı, atık bertarafı, mineral işleme, aktif karbon rejenerasyonu (Jones vd., 2002) ve metal içerikli çamurların stabilizasyonunda (Chen vd., 2007; Hsieh vd., 2007; Kuan vd., 2008) uygulanmaktadır. MD ayrıca, organik bozunması, medikal atık sterilizasyonu ve gıda, hayvan gübre atıkları ve toprak patojenlerini yok etmek amacı ile kullanılmaktadır (Hong vd., 2004). MD dezentegrasyonu, gaz üretimini yükseltmenin yanı sıra KOI'nin çözünürlüğünü artırarak çamurun özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilen geleneksel ısıl işleme alternatif bir yöntemdir (Appels vd., 2013). Örneğin, 60-70 °C sıcaklıklarda MD dezentegrasyonu sonrası AÇÇ süreci CH₄ üretiminde % 41-52 oranında yükselme, çamur çözünürlüğündeki artış ile ilişkilendirilmektedir (Carrère vd., 2008; Mottet vd., 2009).

4. Mikrodalga Radyasyonu ile Biyoçamurların Dezentegrasyonu (Disintegration of Biosludges by Microwave Radiation)

Klasik ısıtma'da, ısıtma aparatından ortama ısı transferi, ısıtma performansına, termal iletkenliğe, malzeme boyunca sıcaklık farkına ve konveksiyon akımlarına bağlıdır (Plazl vd., 1995). MD fırınında ise tüm numunenin ısıtılması aynı anda gerçekleşir ve çözelti sıcaklığı, çok hızlı bir şekilde kaynama noktasına ulaşır. Hızlı ısıtma nedeniyle, MD sisteminde ısıtılan matriste, daha yüksek sıcaklık bölgeleri gözlemlenebilir. Bu sıcak noktalar, MD

ısıtma uygulamalarının çoğunda gözlemlenen homojen olmayan sıcaklık profillerinin sebebidir (Eskicioğlu vd., 2007b).

Termal hidrolizde önemli faktör, reaksiyon sıcaklığına ulaşmak için gereken enerji ihtiyacının en aza indirilmesi ve ayrıca işlenen ABÇ miktarını ve sıcaklığını optimize etmektir. ABÇ, sudan daha düşük özgül ısı kapasitesine sahip olduğundan (Xu ve Lancaster, 2009), içeriğindeki kuru katı madde derişiminin yükseltilmesi, doğal olarak enerji gereksinimlerini azaltmaktadır (Barber, 2016).

Termal hidroliz reaksiyon sıcaklığının, optimum sıcaklık aralığına yükseltilmesi; ABÇ'un anaerobik çürütülebilirliğini iyileştirmekte, görünür vizkoziteyi azaltmakta, lipidlerin çözünürlüğünü ihmal edilebilir düzeyde artırmaktadır. Ayrıca, karbonhidratların, proteinlerin çözünürlüğünü artırmakta, ortalama partikül boyutlarını azaltırken, refrakter bileşik oluşum (KOİ, azot, renk) potansiyelini yükseltmekte, çamur susuzlaştırılmasını daha da iyileştirmektedir (Barber, 2016).

4.1. Mikrodalga Radyasyonu (Microwave Radiation)

MD radyasyonu, dalga ve parçacık özelliğine sahiptir. Elektromanyetik dalgalar foton adı verilen enerji birimleri halinde emilmektedir. Bir fotonun taşıdığı enerji, yayılmanın dalga boyu ve frekansına bağlıdır. MD ışın dalgaları gibi hareket ederek, metallere yansır, bazı dielektrik materyaller tarafından absorbe edilir ve bazı dielektrik materyallerden önemli bir absorpsiyon etkisinde kalmadan geçebilir (Büyükkoyuncu, 2012).

MD, 300 MHz-300 GHz salınım frekans aralığında 1 m'den 1 mm'ye kadar bir dalga boyu aralığına karşılık gelen elektromanyetik radyasyon ile dezentegrasyon için bir seçenektir (Banik vd., 2003). Genel olarak, evsel ve endüstriyel MD fırınları, 12,2 cm dalga boyuna ve $1,02 \times 10^{-5}$ eV enerjiye karşılık gelen 2,45 GHz frekansında çalışır (Jacob vd., 1995).

MD ile üretilen elektromanyetik alan, dipol dönüş olarak tanımlanan polarize moleküllerin hizalanmasına neden olur. Elektromanyetik alandaki azalma, düzensizliğin restorasyonuna yol açar ve termal enerji açığa çıkar. MD ışınlanması, hem termal hem de atermal (termik olmayan) molekül oryantasyon etkilerinden, hızlı odaklanmış ısıtma etkileri üretebilir. Atermik etkiler, polar moleküllerin dipol dönüşü nedeniyle karmaşık organik moleküllerin üçüncül ve dördüncül yapısının bozulmasına neden olabilir. MD'nin termal ve yönelim etkilerinin birlikte, zayıf hidrojen bağlarının kopmasına neden olduğu, karmaşık organik moleküllerin bozulmasına ve açılması ile daha küçük biyolojik olarak parçalanabilir organik moleküller ve parçacıklara yol açtığı varsayılmaktadır. Biyolojik sistemler üzerinde MD radyasyonunun atermal bir etkisinin (dipol oryantasyonu nedeniyle) olup olmadığı konusunda fikir birliği olmamasına rağmen MD radyasyonu, biyokimyasal ve kimyasal sistemlere, enerji sağlamanın alternatif bir yöntemi olarak kabul edilmektedir. Malzemelerin doğrudan MD'ler tarafından içten ısıtılması nedeniyle, konveksiyon ve iletim yoluyla ısı kaybı en aza indirilebilir. Güç kaynağı aplikatörden uzak olduğu için temiz bir ısıtma ortamı elde edilebilir (Toreci vd., 2010).

4.2. Biyoçamurdan Çözünmüş Organik Madde Salınımına MD Radyasyonu Etkisi (Effect of MD Radiation on the Release of Dissolved Organic Substance from the Biosludge)

ABÇ, dielektrik özellikleri ve yüksek su içeriği nedeniyle MD ışınlanmasının uygulanabileceği bir absorblayıcı olarak tanımlanmaktadır (Wojciechowska vd., 2005). ABÇ içeriğindeki su, proteinler, belirli lipidler veya diğer kompleks polar moleküller, MD uygulaması ile radyasyona uğrar. MD elektrik alanıyla, bu moleküller dönmeye başlar ve sonuçta ortaya çıkan moleküler dönme, sürtünme ısısının enerjisi, çamura yaymasına neden olur (Kennedy vd., 2007; Park vd., 2010). Sürtünme ısısı nedeniyle, ABÇ'a uygulanan MD ışını, suyun buharlaşması ile genleşme, hücre içinde basınç artışına neden olur ve mikrobiyal hücre parçalanır (Acquisto vd., 2006; Golmakani vd., 2008; Pino-Jelicic vd., 2006). MD ışınlama ile lipidler, palmitik asit, stearik asit ve oleik aside; proteinler, doymuş ve doymamış asitler dizisi yolu ile amonyak ve karbon dioksite; karbonhidratlar ise daha düşük moleküler ağırlıklı polisakkaritlere ve muhtemelen basit şekerlere hidrolize edilir (Brooks vd., 1970; Wojciechowska vd., 2005). Mikrobiyal hücrelerin parçalanması, hücre dışı ve hücre içi materyallerin sıvı ortama salınmasına ve karmaşık organik moleküllerin, AÇÇ sürecinde daha kolay biyolojik parçalanabilir yapılara dönüşmesini sağlar.

MD dezentegrasyon sürecinde işletim koşulları (hedef sıcaklık, sıcaklık yükselme hızı vb.), ABÇ'un karmaşık flok sisteminin parçalanması ve hücre içi ve hücre dışı polimer bileşiklerin (proteinler, yağlar, karbonhidratlar ve hümitik asitler) çözünürlüğünü etkilemektedir. MD dezentegrasyonu, izole edilmiş partikül organik maddenin çamurdan çözünmesini, aynı zamanda aktif çamur floğunu oluşturan EPS matrisinin dengesizleşmesini ve parçalanmasını sağlamaktadır (Coelho vd., 2011; Toreci vd., 2010; Zhou vd., 2010).

ABC'nin MD ile dezentegrasyonunda 160-180 °C sıcaklık ve 30-60 dak uygulama süresi, optimum olarak belirtilmesine rağmen (Bougrier vd., 2007), yüksek sıcaklıklarda organik madde yapısının bozulması ile CH₄ veriminde azalma tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (> 80 °C), özellikle şeker derişimlerinin salınmasında karamelizasyon veya Maillard olarak tanımlanan reaksiyonlar sonucu organik madde derişiminde azalmalar görülmektedir (Labuza vd., 1992; Park vd., 2004). Aminoasitler ve indirgen şekerler arasındaki enzimatik olmayan kimyasal reaksiyonlarla, kahverenkli, yüksek moleköl ağırlıklı melanoidinleri içeren heterojen polimerler (>10 kDa) olan Maillard ve Amadori ürünlerinin üretildiği bilinmektedir. Melanoid, 140-165 °C'de, tipik termal hidroliz reaksiyon aralığında oluşmaktadır. Melanoid üretimi sıcaklığa bağlı olduğundan, termal hidroliz reaksiyon sıcaklığını özellikle 160 °C'nin altına düşürmek, karamel üretimini önlemede etkili bir strateji olabilir (Barber, 2016). Termal hidroliz, şekerlerin ve proteinlerin çözünürlüğünü artırdığından, bu ürünlerin oluşumu beklenmelidir. Şekerler 160 °C'de karamelize olmaya başlar ve renk daha da koyulaşır (Barber, 2016). Yüksek derişimlerde hem şeker, hem de protein içeren atıklara termal hidroliz uygulandığında melanoid üretiminin artması AÇÇ sürecinde, biyogaz hacminde azalmaya neden olmaktadır. 175 °C sıcaklıkta ABC'nin çözünürlüğünde yükselme ve AÇÇ süreci ile biyogaz üretiminde artış gözlenmesine rağmen 180 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Maillard reaksiyonu nedeniyle metan üretiminde keskin bir düşüş meydana gelmektedir (Pinnekamp vd., 1988). 100 °C'den daha düşük MD sıcaklıklarında (50, 75 ve 96 °C) yapılan deneysel çalışmada, sıcaklık artışı ile sulu fazda protein ve şeker derişimleri kontrole göre daha yüksek seviyelerde tespit edilmiştir. 96 °C sıcaklıkta ise şeker derişiminin 75 °C'den daha düşük olması, tam olarak açıklanamamasına rağmen, azalmanın şeker yapısının bozulmasından veya yüksek sıcaklıkta diğer bileşiklere dönüşmesinden kaynaklanmış olabileceği belirtilmektedir (Eskicioglu vd., 2006a).

MD ile ısıtılan ABC örneklerinde protein çözünürlüğü ve indirgenmiş şekerler de tespit edilmesine rağmen derişimler kontrol örneklerinden daha düşüktür. Yükselen sıcaklık koşullarında partikül kinetik enerjisi artması ile vibrasyon etkisi sonucu bağlar kopmaktadır. Sonuç olarak, çözünür karbonhidratların derişimi yükselmekte ve ayrıca protein yapısında yeralan bazı hidrojen bağları ve polar olmayan hidrofobik bağlar çözülmeye başlayabilir (Hong vd., 2002, Madigan vd., 2005). 160 °C'de ABC'nin MD dezentegrasyonu ile karbonhidrat ve protein derişimi sulu çözeltide daha yüksek seviyelere çıkmaktadır (Doğan, 2008).

ABC'un MD ile dezentegrasyonu çamur hacminde % 70'in üzerinde azalma sağlamakta (Mawioo vd., 2016) ve kaynama noktasına kadar ısıtıldığında, toplam KOİ'nin % 22'sine kadar çözünmüş KOİ (çKOİ) salınımı görülmektedir (Park vd., 2004). çKOİ derişimindeki artış, aynı zamanda, karmaşık ABC flok yapısındaki önemli bir bozunmaya ve hücre dışı ve hücre içi biyopolimerlerin (proteinler ve şekerler) biyoçamurdan çözünür faza salınmasını göstermektedir (Eskicioglu vd., 2006a). Geleneksel ev tipi MD ile 100 °C'nin altında sıcaklıkta ABC'un çKOİ/TKOİ (toplam KOİ) oranında yükselme ve toplam biyogaz hacminde artış belirlenmiştir (Eskicioglu vd., 2007a). Kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında, MD dezentegrasyonu ile gram negatif bakteriden salınan çKOİ, 1,8-4,0 kat, çözünür protein derişiminde 1,1-1,8 kat ve çözünür karbonhidrat derişiminde 3,2-14,1 kat artış tespit edilmiştir. ABC, 0 ila 9 dakika arasında farklı ışınlama süreleri ile MD işlemine tabi tutulduğunda çKOİ, 0,14'ten 2,38 g/L'ye yükselirken, uygulama süresine göre kademeli olarak 72 kata kadar artmaktadır (Zhou vd., 2010). Toplam % 3 katı madde (TK) içeren ABC'un, 91,2 °C ve kaynama sıcaklığında MD dezentegrasyonu ile çKOİ derişiminde, % 19'dan % 22'ye artış belirlenmiştir. 72,5 °C gibi düşük sıcaklıklarda dahi, MD dezentegrasyonuna tabi tutulmuş % 4,1 TK içeren ABC'un parçalanması ile çKOİ % 8'den (kontrol) % 18'e önemli artış görülmektedir (Hong vd., 2006; Park vd., 2004). Susuzlaştırılmış ABC'un MD ile dezentegrasyonu ile kontrole göre % 143 ± 34 çKOİ artışı elde edilmiştir (Eskicioglu vd., 2006b).

MD'da, düşük yükselme hızlarında hedeflenen sıcaklığa ulaşılması, çKOİ derişiminde artış sağlamaktadır (Eskicioglu vd., 2007; Eskicioglu vd., 2008a; Koupaie vd., 2015; Park vd., 2009; Toreci vd., 2009; Toreci vd., 2010; Toreci vd., 2011). Düşük sıcaklık yükselme hızlarında olmak üzere, hedeflenen yüksek sıcaklıkta (> 96 °C) ABC'un, MD radyasyonuna tabi tutulması ile KOİ çözünürlüğünün % 25'e kadar arttığı görülmektedir. 2,9 °C/dak ve 17,1 °C/dak yükselme hızlarında hedef sıcaklık 52 °C ve 108 °C'ler için yapılan çalışmada en yüksek çözünme oranı, 2,9 °C/dak ve 108 °C işletim koşullarında belirlenmiş ve çözünürlük artışı %15,8 olarak hesaplanmıştır (Park vd., 2009). 3,75 °C/dak yükselme hızı ve hedef MD sıcaklığı 175 °C için TK içeriği %6 olan çamur için KOİ çözünürlüğü %10'dan % 46'ya yükselirken, %12 TK içeriğine sahip çamur için %7'den %57'ye artmıştır (Toreci vd., 2009).

Düşük sıcaklıklarda ise düşük sıcaklık yükselme hızları için çKOİ artışı daha sınırlı olduğu görülmektedir. Hedef sıcaklık 96 °C için sıcaklık yükselme hızı, 18 °C/dak'dan 1,2 °C/dak'ya düşürüldüğünde, çözünürlük yaklaşık olarak %17'den %22'ye yükselmiştir (Eskicioglu vd., 2007b). 75 °C için ise sıcaklık yükselme hızı 24,5'den 1,3°C/dak'ya düşürülmesi ile çKOİ derişimi artışı yaklaşık olarak %19 olarak açıklanmaktadır (Koupaie vd., 2015). Toreci vd., (2011) biyoçamurun MD ile dezentegrasyonunda, 3,75 °C/dak sıcaklık yükselme hızında çamur çözünmesinin, 7,5 °C/dak 'dan daha etkili olduğunu bildirmektedir. 3 °C/dak yükselme hızında çamur çözünürlüğünün 6 °C/dak ve 11 °C/dak'dan daha yüksek olduğunu tespit etmiştir (Koupaie vd., 2016). Sıcaklık yükselme hızlarına bağlı olarak çKOİ derişim artışı, Tablo 1' de sunulmuştur.

Uygulanan MD enerjisine göre ABÇ dezentegrasyonu deneysel çalışmalarda incelemiştir. Organik madde çözünme hızı, sağlanan toplam enerjiden etkilenir (Ahn vd., 2011; Rani vd., 2013). MD'ye uygulanan enerji, aşağıdaki eşitlikler (3-5) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\text{Spesifik enerji} \left(\frac{kJ}{kgTK} \right) = \frac{\text{güç (Watt)} \times \text{radyasyon süresi (sn)}}{\text{örnek ağırlığı (kg)}} \quad (3) \text{ (Passos vd., 2013)}$$

$$\text{Güç} \left(\frac{kJ}{L} \right) = \frac{\text{Magnetron gücü (kJ/sn)} \times \text{işılama süresi (sn)}}{\text{Örnek Hacmi (L)}} \quad (4) \text{ (Rani vd., 2013)}$$

veya

$$\text{Radyasyon enerjisi} = \frac{\text{güç (Watt)} \times \text{radyasyon süresi (sn)}}{\text{çamur kütlesi (g)} \times \text{yoğunluk} \left(\frac{g}{L} \right) \times \text{UK g/L}} \quad (5) \text{ (Yang vd., 2013)}$$

58 ila 493 sn süre, 700 watt veya 900 watt güç ve 60-70 °C sıcaklıklarda uygulanan MD dezentegrasyonu sonucu AÇÇ reaktöründe CH₄ gaz hacminde % 41-52'lik artış görülmüştür (Kuglarz vd., 2013). Çözünme hızı, 700 watt güçte 400 watt'tan daha etkili olurken, 400 W güçte çKOİ, 0,113 mg O₂/g TK iken 700 W'da, çKOİ 0,137 mg O₂/g TK olarak belirlenmiştir (Serrano vd., 2016). 14.000 kJ/kg TK spesifik enerji seviyesinde çKOİ'de % 28 artış elde edilirken, 14.000 kJ/kgTK enerji seviyelerinin üzerinde, KOİ çözünürlüğünde önemli derecede değişme görülmemekte, 45.000 kJ/kgTK enerji seviyelerinin üzerinde, kaynama sonucu organiklerin buharlaşması nedeni ile KOİ çözünürlüğü azalmaktadır (Ebenezer vd., 2015).

Çamurun MD ile dezentegrasyonu 96 kJ/kg'da, düşük substrat çözünmesi elde edilmesine rağmen 192 kJ/kg güçte çözünmede önemli iyileşme sağlanmıştır (Westerholm vd., 2016). 240 Watt'ın üzerinde güç uygulandığında çKOİ derişiminde önemli bir değişim görülmemektedir. 800 W gücünde ise ABC'un kaynamasına bağlı olarak çKOİ derişiminde net bir salınım olduğu belirtilmektedir (Jiang vd., 2018). MD gücünün artması ile ABC parçalanması ile çKOİ derişiminin, 381 mg/L'den 5.523 mg/L'ye yükseldiği görülmektedir (Ahn vd., 2011). Çıkış gücü ve maruz kalma süresi dikkate alınmadan, aynı özgül enerji için benzer çözünürlük artışı (64.400 kJ/Kg TK'de artış %800) elde edilmiş ve biyogaz üretim hızında yükselme gözlenmiştir (Passos vd., 2013). Artan MD enerji seviyesi ve uygulama süresi ile çKOİ/TKOİ oranı iyileşmektedir (Hephzibah vd., 2015). 100 kJ/g UK'ye kadar özgül enerji girdisi çözünürlükte doğrusal dik bir artış sağlarken, çKOİ'de % 2-%170 iyileşme görülmektedir. Ancak, 265-8.135 kJ/UK arasında daha yüksek özgül enerji girdisi, daha küçük eğimle daha düşük bir çözünürlük verimi ile % 1000 ile 2000 arasında çözünürlük verimi sağlamaktadır (Bozkurt vd., 2019). MD enerji seviyesine göre ABÇ çözünürlüğü Tablo 2'de organik madde derişim değişimi Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı sıcaklık yükselme hızlarında MD parçalanması ile biyoçamurun çKOİ değişimi (The SCOD variation of bioludges by MD disintegration at different temperature ramping rates).

| MD hedef sıcaklık (°C) | Yükselme hızı °C dak ⁻¹ /Toplam süre (dak) | çKOİ % | Kaynaklar |
|------------------------|---|--------|-----------------------|
| 91,2 | nv/7 | 17 | Park vd., 2007 |
| Kaynama noktası | nv/15 | 20 | |
| 72,5 | nv | 10 | Hong vd., 2006 |
| 96 | nv/5 | 15 | Eskicioglu vd., 2007a |
| Kaynama noktası | nv/15 | 20 | Ahn vd., 2009 |
| 96 | 14.4/6 | 14 | Miguel vd., 2011 |
| 120 | 5/10 | 12 | Eskicioglu vd., 2008b |
| 120 | nv/14.3 | 11 | Park vd., 2010 |
| 160 | 7.5/19.6 | 34.3 | Cella vd., 2016 |
| 108 | 10/nv | 14.7 | Park vd., 2009 |
| 96 | 1.2/nv | 22 | Eskicioglu vd., 2007b |
| 75 | 1.3/nv | 19 | |
| 175 | nv | 26 | Eskicioglu vd., 2008a |

nv: noksan veri

Tablo 2. MD enerji seviyesinin çamur çözünürlüğüne etkisi (Effect of MW energy level on the biosludge solubility)

| MD özgül Enerji ve/veya Güç | KOİ Çözünürlük | | çKOİ/TKOİ (%) | Kaynaklar |
|-----------------------------|----------------------------|---|--|----------------------|
| | Kontrol | MD | | |
| 8300 J/kg TK, 800 Watt | 3 ^a | 9.3 ^a | % 214, %6 ^a | Apples vd., 2013 |
| 1600 Watt | % 6,5 | % 17.5 | %11 | Park vd., 2010 |
| 30,000 J/g TK, 400 Watt | 8600 mg O ₂ /Kg | 11175 mg O ₂ /Kg | %30 (2575) mg O ₂ /Kg | Serrano vd., 2016 |
| 30,000 J/g TK, 700 Watt | 1835 mg O ₂ /Kg | 5620 ^a mg O ₂ /Kg | % 215 | |
| 14000 kJ/g TK çamur | %1 | %21 | % 20 | Ebenezer vd., 2015 |
| 3.49 kJ/g UK çamur | nv | | %60,6 | Akgul vd., 2017 |
| 700 Watt | 93 (mg O ₂)/L | 926 (mg O ₂)/L | 833(mg O ₂)/L > % 8,9 ^b | Machnicka vd., 2017 |
| 64 kJ/kg TK çamur, 700 Watt | % 1,5 | % 22,3 | % 20,8 | Ahn vd., 2011 |
| 1814 kJ/kg çamur, 900 Watt | % 4 | % 19 | %15 | Houtmeyers vd., 2014 |
| 800 Watt, % 90 | % 4 | % 13 | %11 | Rani vd., 2013 |

a: Ortalama değere göre hesaplanan; b: Kontrol çalışmasına göre hesaplanan % artış

Tablo 3. Farklı MD işletme koşullarında ABC'dan sulu faza salınan organik madde derişim değışimleri (Changes in the concentration of organic matters released from WBS to aqueous phase under different MD operating conditions)

| MD | | | | Derişim (Kontrol) | | | | Derişim (MD) | | | | Derişim artış (%) | | | | Kaynak |
|-------------------|--------|------------|----------------|-------------------|--------------|----------|------------|--------------|--------------|-----------|------------|-------------------|--------------|-------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Hedef Sıcaklık °C | °C/dak | Süre (dak) | Güç | Protein | Karbonhidrat | Şeker | Humik asit | Protein | Karbonhidrat | Şeker | Humik asit | Protein | Karbonhidrat | Şeker | Humik asit | |
| - | ----- | 9 | 700 W | 1,023 mg/L | 28 mg/L | nv | nv | 1,827 mg/L | 400 mg/L | Nc | nv | % 78 | %93 | nv | nv | |
| 96 | 1,2 | 20 | ----- | nv | | | | < 100 g/L | nv | 380 mg/L | nv | | | | Eskicioglu vd., 2006a ^b | |
| 75 | 1,3 | 20 | ----- | nv | | | | 450 mg/L | nv | 95 mg/L | nv | | | | | |
| 96 | ----- | ----- | ----- | 47 mg/L | nv | nv | nv | nv | nv | 177 mg/L | nv | % 2,8 | nv | %2,4 | nv | Woo vd.,2000 ^{a,c} |
| 75 | ----- | ----- | ----- | 47 mg/L | nv | nv | nv | nv | nv | 255 mg/L | nv | %1,08 | nv | %3,9 | nv | |
| 160 | ----- | 14 | 600 W | 17,4 mg/L | 8,1 mg/L | nv | nv | nv | 125 mg/L | nv | nv | %12,4 | % 14,4 | nv | nv | Doğan., 2008 ^{a,d} |
| 96 | ----- | 4 | 1000W | 22,5 mg/L | nv | nv | nv | 43 mg/L | nv | nv | nv | %0,91 | nv | nv | nv | Sherien vd.,2013 |
| 96 ±1 | ----- | 5 | 1250 W | 88 mg/L | nv | 80 mg/L | nv | 224 mg/L | nv | 91 mg/L | nv | %1,5 | nv | %0,13 | nv | Eskicioglu vd., 2006b |
| 180 | 2,5 | 30 | ----- | % 4,2 | nv | % 0,9 | %8,2 | % 39,4 | nv | 9,2% | %50,8 | %35,2 | nv | %7,3 | %4,6 | Kor-Bicakci vd.,2019 |
| 160 | 7,5 | ----- | 1200 W | % 4,8 | nv | %1,2 | %8,8 | %28 | nv | 31,5% | %23,5 | %23 | nv | %30 | %14,7 | Mehdizadeh vd., 2013 ^{a,c} |
| 110 | 3,75 | ----- | ----- | 480 mg/L | nv | 333 mg/L | nv | 885 mg/L | nv | 1255 mg/L | nv | %0,8 | nv | %2,8 | nv | Toreci vd., 2009 ^{a,c} |
| 150 | | ----- | ----- | 480 mg/L | nv | 333 mg/L | nv | 1168 mg/L | nv | 1068 mg/L | nv | %1,4 | nv | %2,2 | nv | |
| 175 | | ----- | ----- | ----- | 480 mg/L | nv | 333 mg/L | nv | 1571mg/L | nv | 1009 | nv | %2,3 | nv | %2 | |
| 80 | 3 | ----- | 1200 W | %11 | nv | %1 | %12 | %23,5 | nv | % 6 | %22 | %12,5 | nv | %5 | %10 | Koupaie vd., 2015 ^{c,d,f} |
| 120 | | ----- | ----- | %11 | nv | %1 | %12 | %26,5 | nv | %7,5 | %24,5 | %15,5 | nv | %6,5 | %12 | |
| 160 | | ----- | ----- | ----- | %11 | nv | %1 | %12 | % 30,5 | nv | %12,5 | %34,5 | %19,5 | nv | %11,5 | |
| 110 | ----- | 20 | 18600 Kj/Kg TK | 39,7 mg/L | 5 mg/L | nv | nv | 750 mg/L | 450 mg/L | nv | nv | %17,8 | % 89 | nv | nv | Eswari vd., 2016 ^{a,c,e} |
| 80 | 30 | 5 | 4933 Kj/Kg TK | 379 mg/L | 147 mg/L | nv | 361 mg/L | 435,8 mg/L | 207,27 | nv | 469,3 mg/L | 15% | % 41 | nv | %30 | Yi vd., 2014 |

a: % artış kontrole göre hesaplanmıştır

b: Örnek oranları veri noksan (Kontrol).

c: Oranlar şekillerden alınmıştır.

d: En iyi sıcaklık yükselme hızı şekilden alınmıştır

e: En iyi sıcaklık ve özgül enerji değeri şekilden alınmıştır

f: En yüksek oran 160 °C ve 80 °C için şekilden alınmıştır

4.3. Biyoçamurdan Nutrient Salınımı (Nutrient Release from the Biosludge)

ABC, özellikle protein içeriğinde fosfor (% 0,5-0,7 TK) ve azot (%2,4-5,0 TK) olmak üzere önemli miktarlarda nutrient içermektedir (Kor-Bıçakcı vd., 2017). ABC içeriğindeki biyokütlenin parçalanması ve çözünmesi ile açığa çıkan amonyak ve fosfat, doğrudan toprak uygulamasında veya magnezyum amonyum fosfat (MAP) gibi bitki gübrelere üretiminde potansiyel olarak kullanılabilir bileşikler elde edilebilir (Cid vd., 2001; Jamali vd., 2009; Xia vd., 2000).

MD ısıtması ile ABC parçalanması, ortamda azot, fosfor vd. inorganik bileşiklerin açığa çıkmasını sağlamaktadır (Dogan vd., 2009; Jones vd., 2002; Liao vd., 2003; Ray vd., 1990). 24 saat uygulama süresinde, 100 °C'nin üzerindeki MD sıcaklığında, çözelti içeriğindeki fosfat ve amonyak derişimi iki kattan fazla artmaktadır (Liao vd., 2005a). 5 dak MD uygulama süresinde, 900 watt güç ve 100 °C'den daha düşük sıcaklıkta, süpernatanttaki toplam azot 40,5 mg/L'den, 143,8 mg/L'ye, toplam fosfor derişimi ise 7,0 mg/L'den 25 mg/L'ye yükselmektedir (Chen vd., 2020). İleri oksidasyon süreci (İOS) ile birlikte 170 °C'de, 5 dak MD maruziyet süresinde toplam fosforun %84'den fazlası ortama salınmaktadır (Liao vd., 2005b). H₂O₂ ve 5 dak MD uygulama süresi ile 100 °C ve 120 °C sıcaklıklarda toplam fosforun %61'i kadar ve TKN'nin ise %36'sı çözeltiye salınmaktadır (Wong vd., 2006). İOS ile birlikte 120 °C hedef sıcaklıkta MD uygulandığında ABC'dan, yaklaşık % 70 fosfor ve % 47 amonyak çözünmesi belirlenmiştir (Chan vd., 2007a; Chan vd., 2007b). 2 mL H₂O₂ ve 0,25 mL H₂SO₄ dozlarında, 200 °C MD sıcaklığında, biyokütle parçalanmasının iyileştirilmesi sonucu çözelti TP miktarı, toplam TP'nin % 95,3'ü olarak belirlenmiştir (Wong vd., 2007). MD radyasyonu ile birlikte İOS uygulanması, ABC'dan nutrient salınımı işletim koşullarına göre Tablo 4'de özet olarak sunulmuştur.

4.4. MD İşletim Koşullarında Biyogaz Üretimi ve Katı Giderimi (Biogas Production and Solid Removal at MW Operating Conditions)

Uçucu askıda katı (UAK) hidrolizi, katıların çözünürlük artışında etkindir. UAK'lar genel olarak ana organik hidroliz ajanı olarak görülmektedir (Pino-Jelcic vd., 2006). Yüksek sıcaklık ve MD sürelerinde UAK'ların bozunmaları artmaktadır. Örneğin, Cambi yöntemiyle 170 °C'de ABC ısıtıldığında, UK uzaklaştırma yaklaşık % 40'tan %60'a çıkmaktadır (Kepp vd., 2000). MD ile 170 °C sıcaklık ve 30 dak uygulama süresinde en yüksek UAK çözünmesi %36,4 elde edilmiştir (Qiao vd., 2010). Isıl işlem ve anaerobik kesikli reaktör serisinin kombinasyonu ile sıcak çamurun çökeltme veriminde ve UK giderme oranında % 60'a ulaşan iyileşme görülmektedir (Wang vd., 2006). 96 °C MD sıcaklığında, ABC biyogaz veriminde %17 artış belirlenmiştir (Serrano vd., 2016; Wojciechowska vd., 2005). Ortalama sıcaklık ve dalga yoğunluğuna göre gaz ve CH₄ üretimi farklılık göstermektedir. MD işletim koşullarına göre ABC'dan biyogaz üretim verimleri Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 4. MD ve AOP birleşik sistem uygulanmasında koşullara göre AÇ'den çözeltiyeye salınan amonyak ve fosfor derişimleri (According to the operational conditions of the MD and AOP combined systems Ammonia and phosphorus concentrations released from the WBS to the aqueous solution)

| MD işletim koşulları | | | İOS | Derişim ve % | Kaynaklar |
|----------------------|---------------------------------|------------------------|--|---|---------------------------------|
| Hedef sıcaklık °C | Sıcaklık yükselme hızı (°C/dak) | Maruziyet süresi (dak) | | | |
| 100 | 15 | 5 | 1 mL H ₂ O ₂ (% 30 kütle) | TN salınımı 143,4 mg/L; (artış %255) TP: 25 mg/L (artış: %25) | Chen vd., 2020 ^a |
| 100 | 15 | 5 | 1 mL H ₂ O ₂ (% 30 kütle) | Birleşik H ₂ O ₂ /MD Fosfat geri kazanım oranı %84 MD ile Fosfat geri kazanım oranı %65 | Liao vd., 2005 ^a |
| 100-120 | 5 | 10 | 2 mL H ₂ O ₂ (% 3) | MD sonrası, H ₂ O ₂ uygulaması ile çözünebilir orto-P hacmi artmakta. MD (120 °C) ile çözelti içeriğinde 108 mg NH ₃ -N/L Çözünmüş N : %38.8 TKN : % 36 TP : %61 | Wong vd., 2006 ^c |
| ≤80 | 5 | 8 | 2 mL H ₂ O ₂ (%3) | Yüksek H ₂ O ₂ derişimlerinde daha düşük derişimde çözünmüş ortho-P %1,5 H ₂ O ₂ , 80 °C'de etkin derişim Çözünmüş N: %30 | |
| ≤80 | - | - | 1 mL H ₂ O ₂ | En düşük orto-fosfat derişimi, 80 °C Çoğu P, polifosfat formunda TP: % 19-39 (H ⁺ eklenmeden) TKN: % 10 (H ⁺ eklenmeden) | Chan vd., 2007 ^{b,a,d} |
| 100-120 | - | - | 1 mL H ₂ O ₂ +0,5 mL H ⁺ | Sıcaklık artışı ile çözünmüş P NH ₃ artmakta. (H ⁺ eklenmesi ve yüksek sıcaklıkta polifosfatlar, orto-P'ye parçalanmakta TP: %57-70 (H ⁺ ile) TKN: % 13-47 | |
| 60-<130 | 5 | - | 2 ml H ₂ O ₂ + 0,5 mL H ⁺ | Minimum amonyak derişimi, düşük sıcaklıkta (H ₂ O ₂ eklenmeden) P çözünürlüğü H ₂ O ₂ ile artarken asit ile 60 °C'de azalmakta P çözünürlüğü: % 22,4 (H ₂ O ₂ ile) NH ₃ çözünürlüğü : % 12 (H ₂ O ₂ ve H ⁺) | Wong vd., 2007 ^b |
| 200 | 5 | - | | P çözünürlüğü: % 95 (H ₂ O ₂ +H ⁺) NH ₃ çözünürlüğü: %52 (H ₂ O ₂) | |

a :Yüksek ve düşük sıcaklık sonuçları alındı (60 dak); b: TK: % 0.64 ilk deneme ve TK: %0.61 ikinci deneme; c: Sıcaklık ve H₂O₂ yüzdesine bağlı olarak En yüksek değerler; d : H⁺: H₂SO₄

4.5. Hibrit Mikrodalga/İleri Oksidasyon Süreçleri ile Atık Biyolojik Çamurun Parçalanması (Disintegration of Waste Biosludges by Hibrit Microwave/Advanced Oxidation Processes)

ABC'un dezentegrasyon verimini arttırmak için hibrit yöntem, MD ile birlikte fiziksel veya kimyasal yöntem/yöntemler sırası ile uygulanmaktadır. Hibrit uygulama ile çamur yapısının daha kolay bozunması ve daha ekonomik bir yaklaşımın sağlanması hedeflenmektedir (Andreottola vd., 2006). Yapılan deneysel çalışmalarda en yüksek KOİ çözünmesine ulaşmak ve dolayısı ile AÇÇ'de CH₄ gaz verimini yükseltmek için hibrit yöntemde, kimyasal tür ve dozları ve MD işletim koşulları belirlenmeye çalışılmaktadır.

Yüksek molekül ağırlıklı maddeleri, düşük molekül ağırlıklı bileşiklere dönüştürmede hibrid MD/İOS'nin başarıyla kullanıldığını göstermektedir (Chan vd., 2007b; Kenge vd., 2009; Liao vd., 2007; Yawson vd., 2011). MD/İOS uygulamaları, H₂O₂ ile •OH radikalleri oluşturmak, atık çamur arıtımında verimli bir yöntem (Remya vd., 2011; Tyagi vd., 2013) olmasının yanında, nutrient geri kazanımı ve ABC'un hacminin azaltılmasında etkindir (Chan vd., 2010; Lo vd., 2018). ABC ayrışma hızını yükseltmek için oksidantlarla eşzamanlı olarak MD uygulanması, üretilen serbest radikallerin, MD için enerji gereksinimini düşürerek, işletim maliyetini azaltabilir (Bi vd., 2009; Clark vd., 2000).

MD ile karşılaştırıldığında, MD/K₂S₂O₈ ve MD/H₂O₂ hibrit uygulamalarında 4 dak.'da dimethoate'nun hemen hemen tamamen yok olduğu gözlenmiştir (Zhang vd., 2007). H₂O₂, 60 °C'den daha düşük sıcaklıklarda, çamur partikülleri ile reaksiyona girmeden önce yüksek derecede aktif katalaz tarafından tüketilebilir (Guwy vd., 1998; Guwy vd., 1999). Daha yüksek MD (80 °C) sıcaklıklarında H₂O₂ ilavesi, •OH radikallerine ayrışmasını arttırmakta ve ABC moleküllerinin oksidasyonunu ve ayrışmasını yükselterek, KOİ çözünürlüğü, fosfor ve amonyum gibi inorganik bileşenlerin salınımını iyileştirmektedir (Eskicioglu vd., 2008b ; Wang vd., 2015). Hibrit MD/H₂O₂ ile eşit MD sıcaklık ve işlem süresinde çözünür fosfor veriminde, toplam fosforun % 84'üne kadar artma görülmektedir (Liao et al. 2005b). 5 dak. süre ve 20 °C/dak sıcaklık yükselme hızlarında, 7 mL/L H₂O₂ ile TKOİ çözünürlüğünde %96'dan daha fazla artış belirlenmiştir (Liao vd., 2007). Ayrıca MD ile üretilen sülfat serbest radikalleri, refrakter organik kirleticileri daha iyi yok edebilen 2,6V'luk yüksek bir oksidasyon indirgeme potansiyeline (ORP) sahiptir (Liang vd., 2004). Hibrit ultrases ve MD işleminin (2,450 MHz, 800W ve 3 dak. MD, ardından 0,4 W/mL ve 10 dak. ultrases), sadece MD işleminden daha iyi AÇÇ performansı sağladığını göstermektedir (Yeneneh vd., 2013a). Hibrit MD/ultrases işlemde önemli seviyede çKOİ/TKOİ oranında artış görülmekte (Saifuddin vd., 2009) ve TK giderimi % 69,1 ve CH₄ üretimi %71 artmaktadır (Yeneneh vd., 2015). Alkali ortamda MD'nin, kimyasal ve moleküler reaksiyonların hızındaki artıştan ve MD-alkali sistemdeki protein çözünürlüğünün, sadece MD işletimine göre KOİ'nin çözünmesinde daha etkili olduğu bulunmuştur (Tyagi vd., 2014a). O₃ ve MD işlemlerini ayrı uygulamalarına kıyasla, birleşik MD/O₃ ile çözültide yaklaşık % 24 daha yüksek KOİ (Yin vd., 2007) ve fosfor salınımı sağlanmaktadır (Lo vd., 2015). MD/H₂O₂/O₃, İOS hibrit süreç ile TP, % 30 ve TKN % 20 salınım artışı belirlenmiş ve sadece MD'ye göre biyoçamurun TKOİ'sinde %37 artış sağlanmıştır (Yin vd., 2007). MD ve Fe₃O₄ nanopartikül (demir oksit nanopartiküller) ile kombinasyonunda, biyogaz hacmi en yüksek 328 mL olarak belirlemiştir (Zaidi vd., 2019). 700 watt MD gücü ve 30 san. MD uygulama süresinde, 0,5 g FeO'nun, diğer örneklerle kıyasla pentaklorofenol (PCP) gideriminde % 99,9'un üzerinde verime ulaşılmıştır (Jou, 2008). Tablo 6'da MD ile hibrit ABC'un dezentegrasyon çalışmaları sunulmuştur.

Tablo 5. MD işletim koşullarına göre AÇ çözünmesi ve biyogaz verimliliği (Solubility of WBS and biogas efficiency according to MW operating conditions)

| MD işletim koşulları | Açıklama | Reference |
|---|--|----------------------|
| 6% TS, 10 dak, 150 °C (MKAÇ) | Maksimum biyogaz üretimi 794 mL/gün, Toplam CH ₄ üretimi 260,25 mL/gVS, maksimum kümülatif CH ₄ verimi %73 | Wang vd., 2021 |
| %5,5 TK, 5 dak; 96 °C (MKAÇ) | çKOİ artışı % 143±34; kümülatif gaz üretimi: % 211±2 | Eskicioglu vd.,2006a |
| 1,2–1,4 °C /dak, 175 °C (MKAÇ) | %34 biyogaz üretiminde artış | Eskicioglu vd., 2009 |
| 7–8% TK, 1,2 dak, absorplanan enerji 0,54 kJ/ml, 1000 Watt (MKAÇ) | CH ₄ verimi 211 mL/gVS, % 15,4 CH ₄ üretiminde artış | Sólyom vd., 2011 |
| 4% TK; 1168 W; 90 °C (MKAÇ) | %37 çürütme hızında artış, CH ₄ üretiminde etki belirlenmedi | Zheng vd.,2009 |
| 14,2 ± 0,7 g TK/kg; 14.000 kJ/kg (MKAÇ) | biyogaz üretiminde % 570,7 artış | Ebenezer vd., 2015 |
| 2450 MHz, 900 W, 12 dak, 1814 kJ/L (11,66 g TK/L) (MSAÇ) | % 55'den daha yüksek biyogaz üretiminde ve %64'den yüksek UK giderimi | Rani vd., 2013 |
| (43,6 g TK/kg), 2,45 GHz, 800 W, 1 dak, 96 kJ/kg TK (MSAÇ) | + % 20 biyogaz üretiminde artış | Houtmeyers vd.,2014 |
| (40,8 g TK/kg), 96 kJ/kg TK, 800 W (MSAÇ) | Kuru katı giderim verim artışı = 1,7 Ortalama çKOİ artışı; % 214; CH ₄ üretim artışı; %50 | Apples vd ., 2013 |
| 336 kJ/kg TK,1250 W, 2450 MHz, 100% yoğunluk, (MSAÇ) | Biyogaz üretim artışı; % 106; En yüksek UK giderimi: % 53,1 | Coelho vd ., 2011 |
| TK %3, 30 dak, 175 °C ve 2000 kPa (MSAÇ) | Atıksuların MD ön arıtımı sonrası çözültide pratikte ihmal edilebilir seviyed; UK : % 54; CH ₄ : %69,1; biyogaz üretimi: 6,1 L | Siddique vd., 2017 |
| 130–230 °C ve2–5 dak | %41,3 CH ₄ üretim verimi (0,326 m ³ CH ₄ /kg UK), 190 °C, 4 dak. MD hidrolizi ile selüloz mikrofibrillerdeki gözenekli yapı | Kainthola vd., 2019 |
| 350 W, 20–30 dak; 2,45 GHz | UK giderimi; %34,6; TK giderimi: %72; biyogaz üretimi; % 67; çKOİ/TKOİ= %34 | Savoo S vd., 2018 |
| 2,45 GHz, 1,460 W | % 6.43 biyogaz ve 128.05 mL CH ₄ /g UK artışı, TK: %1; UK; %2; KOİ: 0,5 giderme verimi artışı | Deepanraj vd., 2017 |
| 300 Watt; 180 sn | CH ₄ üretimi= %70; kümülatif gaz üretimi = 500 mL/gUK | Yu vd., 2017 |

MKAÇ: Mezofilik Anaerobik Kesikli Reaktör; MSAÇ: Mezofilik Anaerobik Sürekli Reaktör.

Tablo 6. MD ile birleşik uygulanan ABC önarıtım verileri (Disintegration of WBS at various hybrid processes)

| Birleşik Önarıtım | İşletim koşulları | Açıklama | Kaynak |
|---|---|---|---|
| MD-Alkali | 160 °C; pH: 12(NaOH), 16 dak | çKOI/TKOI oranı pH ile artmakta; en yüksek çKOI/TKOI oranı pH-12+MD, en yüksek CH ₄ : % 19 | Dogan vd., 2009 |
| MD-Alkali | 60 meq NaoH/L; 170°C | Çözünürlük derecesi: %72; En yüksek UK giderimi: %62,4; KGÜ: 2,3-5,7 L/L | Jang vd., 2015 |
| MD-Alkali | 170°C; 1 dak; 0,005 g NaOH/g kuru katı ve 5 dak. reaksiyon süresi | UAK çözünürlüğü= 50%; Azot çözünmesi= %60 | Qiao vd.,2008 |
| MD-Alkali | pH= 12; MD: 600 W, 2 dak | KOI çözünürlüğü: %46 | Chang vd., 2011 |
| MD-Alkali | MD: 800W+pH:12; 300 sn | MD + pH-12; çCOD: %412; enyüksek biyogaz hacmi: 204 mL/gün | Zhen vd., 2011 |
| MD-Alkali | MD: 2,45 GHz (95 °C, 135 °C, and 175 °C); 3,5 °C/dak ve pH: 10 | MD 175 °C+ pH-10: CH ₄ : %137; çKOI: %2040 MD: 175 °C: çKOI: %2640 | Alqaralleh vd., 2019 |
| MD+ H ₂ O ₂ | H ₂ O ₂ (30%) 0,2 g/g TK, MD: T= 100 °C; 20 °C/dak (hedef sıcaklıkta ısıtma tamamlanmakta) | CH ₄ üretim artışı %40'dan yüksek UK azalma oranı ≅ %37 çKOI artış oranı ≅ % 900 Histeriziz alan azalması ≅ %32 EPS çözünmesi ≅ 2000 mg/L | Liu vd., 2016 |
| MD+ H ₂ O ₂ | g H ₂ O ₂ /g TK; MD; T= 160°C'de 15 dak. | MD: % 53 TK ve % 29 UK giderme verimi MD+ H ₂ O ₂ : %59 TK ve % 40 UK giderme verimi çKOI giderme: Kontrol= %14; MD=%74; MD+H ₂ O ₂ = %78 NH ₃ ≤ 1700 mg/L; UYA (VFA) ≤ 4000 mg/L CH ₄ verimi: MD= %64 ve MD+ H ₂ O ₂ = %38 | Chen vd., 2008; Franke vd., 2014; Koster vd., 1984; Lee vd., 2015; Özön vd., 2019 |
| H ₂ O ₂ + H ₂ O ₂ /MD | H ₂ O ₂ (%30, w/w); MD: 100 °C | H ₂ O ₂ / TKOI (0-4)= arttıkça TKOI ve TOK salınımı artmakta (MD-80 °C+ H ₂ O ₂ /TKOI=4): %382 | Gabbita vd.,1984; Guwy vd., 1998; Tyagi vd.,2013; Wang vd., 2009 |
| MD+ H ₂ O ₂ | H ₂ O ₂ (1 g H ₂ O ₂ /g TK); MD: 60-120 °C, 20°C/dak | T= 120 °C için MD+ H ₂ O ₂ KOI çözünürlüğü %24 Partikül boyut <0,45 mm HA= %37; Şeker = % 35 diğer örneklere göre yüksek MD; 100 °C diğer işletme koşullarına göre % 29 CH ₄ mL/g | Guwy vd., 1998; Kim vd., 2003; Penaud vd., 1999; Valo vd., 2004; Yin vd., 2007, |
| MD- Ultrasonik (US) | MD: 2,450 MHz, 800 W, 3 dak US: 0,4 Watt/ml; 48,000 J, % 90, 10 dak. (amplitude, 55/5 pulse) | Özgül CH ₄ verimi= 16,7 mL biyogas/g AÇ, 15,6 mL CH ₄ /g TKOI [MD:2 dak; US: 6 dak) Daha yüksek hücre parçalanması ve organik çözünürlüğü ile TK %63,5 ve UK%79,3 azalması. | Saha vd., 2011; Tiehm vd., 2001; Yeneneh vd.,2013a |
| MD- Ultrasonik(US) | MD: 2450 MHz; 3,2 Watt/mL yoğunluk, 10 dak (64 kJ/g TKOI) US: 0,4 Watt/mL yoğunluk, %90 amplitude (150 W), 55/5 pulse, 9 dak (3,2 kJ/g TKOI) | %70 biyogaz ve %18 CH ₄ üretimi yükselmesi Partikül boyut azalması Mikrobiyal aktivite ile CO ₂ seviye artışı çKOI/TKOI oranı MD'ye göre %47 daha yüksek TK %31 ve UK %21 giderim MD'ye göre daha yüksek KES değeri MD'nin MD+US' ye göre daha yüksek | Tyagi vd., 2014b; Yeneneh vd.,2015 |
| MD- Ultrasonik(US) | MD: 2450 MHz, 800 W, 3 dak. US: 0,4 Watt/mL, % 90 amplitude, 150 Watt, 55/25 pulses 6 dak. | Kümülatif CH ₄ üretimi (66,5 mL/g TKOI) diğer örneklere göre daha yüksek. Daha yüksek kapiler emme süresi (201 sn) | Yeneneh vd., 2013b |
| MD +Ozon+pH | O ₃ : 30 veya 60 dak, Q= 1 L/dak. MD: 250 Watt, 2,45 GHz, 5 veya 10 dak., acidik pH =2 | MD ve O ₃ etkisi ile BOI değeri %100' e kadar artış göstermekte Biyogaz çıkış hızı MD+O ₃ = 10 kat Biyogaz çıkış hızı MD + pH (2)= 25 kat | Beszédes vd., 2009; Bougrier vd., 2007 |
| MD+O ₃ +H ₂ O ₂ | MD:95 °C, 120°C (20 °C/dak), 5 dak, O ₃ ; H ₂ O ₂ %0,5 | O ₃ /(MD+H ₂ O ₂)(MD:95 °C ve 120 °C): çKOI artışı: % 381 | Lo vd., 2015 |
| MD+ Fe ₃ O ₄ NPs | MD: 600 W, 60 dak (sıvı:kati= 20:1), 10 mg NPs. | MW + Fe ₃ O ₄ NP: en yüksek toplan biyogaz artışı: %155 | Zaidi vd.,2019 |

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Biyolojik arıtım sonucu oluşan atık çamurlar, çevresel açıdan sorun oluşturduğundan uygun yöntemler ile bertaraf edilmelidir. ABÇ'ların, su içeriğinin azaltılması deponi alanlarında hacim gereksinmesini azaltmaktadır. Yüksek organik madde içeriği, ABÇ'ların anaerobik çürütülmesi ile CH₄ gazı elde edilmesini sağlamak ve tesis enerji gereksinimini düşürmektedir. Sürdürülebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi ve fosil yakıtların tüketiminde azalma ile sera gazı oluşumunu sınırlaması, küresel enerji ihtiyacı için ABÇ'ların çürütülmesi, uygulanabilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

ABÇ yapısında bulunan zor ayrışabilir organik maddeler, dezentegrasyon süreci ile biyolojik kolay parçalanabilir bileşiklere dönüşmekte ve sonuçta AÇÇ sürecinde CH₄ üretim verimi yükselmektedir. Ayrıca, çamur susuzlaştırma verimi iyileşmekte, çıkış suyu nutrient derişimi artmakta, katı madde ve patojen azalması sağlanmaktadır.

AAT'lerinde enerji yeterliliğinin sağlanmasında, atık çamurun artırılması ile kazanılan toplam enerjinin yükseltilmesi ve dolayısı ile dışsal enerji gereksiniminin azaltılması veya ortadan kaldırılması, işletim maliyeti açısından önemlidir. Bu çalışmada temel amaç, ABÇ'ların, bertarafı öncesi, enerji geri kazanım verimini yükseltmek için uygulanabilecek MD dezentegrasyon yöntem uygulamalarını ve işletim koşullarını değerlendirmektir.

MD ile ABÇ'ların dezentegrasyonunda, sıcaklık, sıcaklık yükselme hızı, çamur katı madde içeriği ve uygulama süresi önemli işletme parametreleridir. Düşük MD sıcaklıklarında ve yükselme hızlarında, ABÇ parçalanma verimi iyileşmekte ve ortama salınan çKOİ ve nutrient derişiminde artış sağlanmaktadır. ABÇ dezentegrasyonu ile AÇÇ sürecinde üretilen CH₄ hacmi artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (≥ 180 °C) ise organik madde yapısının bozulması, AÇÇ sürecinde CH₄ üretim veriminde azalmaya neden olmaktadır.

ABÇ parçalanmasında tek bir dezentegrasyon yöntemine göre hibrit uygulamaların daha etkin olduğu görülmektedir. Hibrit sistemlerin iyileştirilmesinde, dezentegrasyon yöntemlerinin sıralaması, uygulama süresi, hedef sıcaklık ve kimyasal madde dozlarının, çalışılan çamur özelliklerine göre belirlenmesi daha ekonomik bir yaklaşıma ulaşılmasını sağlayacaktır.

Enerji gereksinmesinin önemli kısmının atık maddelerden sağlanması ve ayrıca arıtma sonucu oluşan atıkların farklı alanlarda kullanılabilirliği, ekonomik yöntemlere ulaşılabilmesi ile mümkündür. MD dezentegrasyonu, ABÇ'ların dezentegrasyonunda etkin bir yöntem olmasına rağmen sınırlı enerji verimliliği ile yüksek maliyetli bir teknoloji olarak görülmektedir. MD ile birlikte uygulanabilecek yöntemlerin ABÇ dezentegrasyon verimini yükseltmesi, AÇÇ enerji verimini artırmaktadır.

Daha ekonomik hibrit uygulamalara ulaşılması için;

- Enerji verimliliği,
- AÇÇ sonucu oluşan nutrient içeriği yüksek atıkların değerlendirebildiği alanlar,
- Çamur susuzlaştırma verimindeki yükselme,
- AÇÇ süreci sonucu oluşan atık katı maddenin hacminin düşmesi ile deponi hacim azalması,
- Sera gazı oluşumunu azaltılmasına katkısı, birlikte değerlendirilerek çalışmalar yapılmalıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Acquisto, B. A., Reimers, R. S., Smith, J. E., Pillai, S. D., 2006. Factors Affecting Disinfection and Stabilization of Sewage Sludge. Proceedings of the Water Environment Federation, (7), 5345-5361.
- Ahn, J. H., Shin, S. G., Hwang, S., 2009. Effect Of Microwave Irradiation on the Disintegration and Acidogenesis of Municipal Secondary Sludge. Chemical Engineering Journal, 153(1-3), 145-150.
- Ahn, J. H., Shin, S. G., Park, B. C., Hwang, S., 2011. Comparison of Municipal and Coke Wastewater Sludges in Disintegration and Acidogenesis by Microwave. Journal of Environmental Engineering, 137(8), 740-745.
- Akgul, D., Cella, M., Eskicioglu, C., 2017. Influences of Low-Energy Input Microwave and Ultrasonic Pretreatments on Single-Stage and Temperature-Phased Anaerobic Digestion (TPAD) of Municipal Wastewater Sludge. Energy, 123(None), 271-282.
- Alhraishawi, A. A., Alani, W. K., Chaichan, M. T., Jawad, R. S., 2020. Performance of Oil on Bio-Methane Creation Under Anaerobic Co-Fermentation Condition. Review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 881, No. 1, P. 012189.

- Alqaralleh, R. M., Kennedy, K., Delatolla, R., 2019. Microwave vs. Alkaline-Microwave Pretreatment for Enhancing Thickened Waste Activated Sludge and Fat, Oil, and Grease Solubilization, Degradation and Biogas Production. *Journal of Environmental Management*, 233, 378-392.
- Andreottola, G., Foladori, P., 2006. A Review and Assessment of Emerging Technologies for the Minimization of Excess Sludge Production in Wastewater Treatment Plants. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41(9), 1853-1872.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., Dewil, R., 2008. Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
- Appels, L., Houtmeyers, S., Degrève, J., Van Impe, J., Dewil, R., 2013. Influence of Microwave Pre-Treatment on Sludge Solubilization and Pilot Scale Semi-Continuous Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 128, 598-603.
- Baier, U., Schmidheiny, P., 1997. Enhanced Anaerobic Degradation of Mechanically Disintegrated Sludge. *Water Science and Technology*, 36(11), 137-143.
- Banik, S. B. A. S. G. S., Bandyopadhyay, S., Ganguly, S., 2003. Bioeffects of Microwave—A Brief Review. *Bioresource Technology*, 87(2), 155-159.
- Barber, W. P. F., 2012. Comparison of Thermal Destruction Technology for Complete Biosolids Processing, https://www.waternz.org.nz/article?action=view&article_id=584.
- Barber, W. P. F., 2014. Influence of Wastewater Treatment on Sludge Production and Processing, *Water and Environment Journal*, 28, 1-10.
- Barber, W. P. F., 2016. Thermal Hydrolysis for Sewage Treatment: A Critical Review. *Water Research*, 104, 53-71.
- Beszédes, S., Kertész, S., László, Z., Szabo, G., Hodur, C., 2009. Biogas Production of Ozone and/or Microwave-Pretreated Canned Maize Production Sludge. *Ozone: Science & Engineering*, 31(3), 257-261.
- Beszédes, S., László, Z., Horváth, Z., Szabó, G., Hodúr, C., 2011. Comparison of the Effects of Microwave Irradiation with Different Intensities on the Biodegradability of Sludge from the Dairy- and Meat Industry. *Bioresource Technology*, 102(2), 814-821.
- Bi, X., Wang, P., Jiao, C., Cao, H., 2009. Degradation of Remazol Golden Yellow Dye Wastewater in Microwave Enhanced Clo₂ Catalytic Oxidation Process. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 895-900.
- Bougrier, C., Battimelli, A., Delgenes, J. P., Carrere, H., 2007. Combined Ozone Pretreatment and Anaerobic Digestion for the Reduction of Biological Sludge Production in Wastewater Treatment. *Ozone: Science and Engineering*, 29(3), 201-206.
- Bozkurt, Y. C., Apul, O. G., 2019. Critical Review for Microwave Pretreatment of Waste-Activated Sludge Prior to Anaerobic Digestion. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 14, 1-9.
- Brooks R., 1970. Heat Treatment of Sewage Sludge. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 69(2), 221-31.
- Büyükkoyuncu, D., 2012. Mikrodalga'nın Hacim İçerisinde Dağılımının Sıcaklık Profiline Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 157s.
- Canales, A., Pareilleux, A., Rols, J. L., Huyard, A., 1994. Decreased Sludge Production Strategy for Domestic Wastewater Treatment. *Water Science and Technology*, 30(8), 97..
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F., 2012. The Effects of Substrate Pre-Treatment on Anaerobic Digestion Systems: A Review. *Waste Management*, 32(9), 1634-1650.
- Carrère, H., Bougrier, C., Castets, D., Delgenès, J. P., 2008. Impact of Initial Biodegradability on Sludge Anaerobic Digestion Enhancement by Thermal Pretreatment. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 43(13), 1551-1555.
- Cella, M. A., Akgul, D., Eskicioglu, C., 2016. Assessment of Microbial Viability in Municipal Sludge Following Ultrasound and Microwave Pretreatments and Resulting Impacts on the Efficiency of Anaerobic Sludge Digestion. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(6), 2855-2868.
- Chan, W. I., Liao, P. H., Lo, K. V., 2010. Effects of Irradiation Intensity and pH on Nutrients Release and Solids Destruction of Waste Activated Sludge Using the Microwave-Enhanced Advanced Oxidation Process. *Water Environment Research*, 82(11), 2229-2238.
- Chan, W. I., Lo, K. V., Liao, P. H., 2007a. Solubilization of Blood Meal to be Used as a Liquid Fertilizer. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 42(4), 417-422.
- Chan, W. I., Wong, W. T., Liao, P. H., Lo, K. V., 2007b. Sewage Sludge Nutrient Solubilization Using a Single-Stage Microwave Treatment. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(1), 59-63.
- Chang, C. J., Tyagi, V. K., Lo, S. L., 2011. Effects of Microwave and Alkali Induced Pretreatment on Sludge Solubilization and Subsequent Aerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 102(17), 7633-7640.
- Chen, S.L., Lo, S.L., Chiueh, P.T., Kuan, W.H., Hsieh, C.H., 2007. The Assistance of MW Process in Sludge Stabilization with Sodium Sulfide and Sodium Phosphate. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 930-937.
- Chen, J., Li, J., Zhang, X., Wu, Z., 2020. Pretreatments for Enhancing Sewage Sludge Reduction and Reuse in Lipid Production. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1), 1-10.
- Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S., 2008. Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064.
- Christodoulou, A., Stamatelatos, K., 2016. Overview of Legislation on Sewage Sludge Management in Developed Countries Worldwide. *Water Science and Technology*, 73(3), 453-462.
- Cid, B. P., Alborés, A. F., Gómez, E. F., López, E. F., 2001. Use of Microwave Single Extractions for Metal Fractionation in Sewage Sludge Samples. *Analytica Chimica Acta*, 431(2), 209-218.
- Clark, D. E., Folz, D. C., West, J. K., 2000. Processing Materials with Microwave Energy. *Materials Science and Engineering: A*, 287(2), 153-158.
- Coelho, N. M., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2011. Effect of Microwave Athermal and Thermal Radiation in Wastewater Sludge Properties. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 5(6).
- Colón, J., Alarcón, M., Healy, M.G., Namli, A., Ponsá, S., Dilek Sanin, F., Taya, C., 2017. Chapter 14: Producing Sludge for Agricultural Applications. J. M. Lema, S. Suarez Martinez (Edt.), *Handbook of Innovative Wastewater Treatment and Resource Recovery Technologies*, (P. 296-322). London, UK: IWA Publishing.

- David, H., Palanisamy, K., Normanbhay, S., 2014 . Pre-Treatment of Sewage Sludge to Enhance Biogas Production to Generate Green Energy for Reduction of Carbon Footprint in Sewage Treatment Plant (STP). In 2014 International Conference And Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE) (Pp. 1-5). IEEE.15).
- Deepanraj, B., Sivasubramanian, V., Jayaraj, S., 2017. Effect of Substrate Pretreatment on Biogas Production Through Anaerobic Digestion of Food Waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(42), 26522-26528.
- Desa, U., 2013. Population Division 2013. World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.228.
- Di Fraia, S., Massarottia, N., Vanoli, L., 2018. A Novel Energy Assessment of Urban Wastewater Treatment Plants. *Energy Conversion and Management*, 163, 304–313.
- Doğan, I., 2008. Combination of Alkaline Solubilization with Microwave Digestion as a Sludge Disintegration Method: Effect on Gas Production and Quantity and Dewaterability of Anaerobically Digested Sludge. Master's Thesis, Middle East Technical University, Turkey, 186p.
- Doğan, I., Sanin, F. D., 2009. Alkaline Solubilization and Microwave Irradiation as a Combined Sludge Disintegration and Minimization Method. *Water Research*, 43(8), 2139-2148.
- Duan, N., Dong, B., Wu, B., Dai, X., 2012. High-Solid Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Under Mesophilic Conditions: Feasibility Study. *Bioresource Technology*, 104, 150-156.
- Ebenezer, A. V., Arulazhagan, P., Kumar, S. A., Yeom, I., Banu, J. R., 2015. Effect of Deflocculation on the Efficiency of Low-Energy Microwave Pretreatment and Anaerobic Biodegradation of Waste Activated Sludge. *Applied Energy*, 145, 104–110.
- Elagroudy, S., El-Gohary, F., 2013. Microwave Pretreatment of Mixed Sludge for Anaerobic Digestion Enhancement. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, 5, 105-111.
- Eskicioglu, C., Droste, R. L., Kennedy, K. J., 2006a. Performance of Continuous Flow Anaerobic Sludge Digesters After Microwave Pretreatment. *Proceedings of the Water Environment Federation*, (13), 526-540.
- Eskicioglu, C., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2007a. Enhancement of Batch Waste Activated Sludge Digestion by Microwave Pretreatment. *Water Environment Research*, 79(11), 2304-2317
- Eskicioglu, C., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2008a. Initial Examination of Microwave Pretreatment on Primary, Secondary and Mixed Sludges Before and After Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, 57(3), 311-317.
- Eskicioglu, C., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2009. Enhanced Disinfection and Methane Production from Sewage Sludge by Microwave Irradiation. *Desalination*, 248(1-3), 279-285.
- Eskicioglu, C., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2006b. Characterization of Soluble Organic Matter of Waste Activated Sludge Before and After Thermal Pretreatment. *Water Research*, 40(20), 3725-3736.
- Eskicioglu, C., Prorot, A., Marin, J., Droste, R. L., Kennedy, K. J., 2008b. Synergetic Pretreatment of Sewage Sludge by Microwave Irradiation in Presence of H₂O₂ for Enhanced Anaerobic Digestion. *Water Research*, 42(18), 4674–4682.
- Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K. J., Droste, R. L., Hamoda, M., 2007b. Athermal Microwave Effects for Enhancing Digestibility of Waste Activated Sludge. *Water Research*, 41(11), 2457–2466.
- Eswari, P., Kavitha, S., Kaliappan, S., Yeom, I. T., Banu, J. R., 2016. Enhancement of Sludge Anaerobic Biodegradability by Combined Microwave- H₂O₂ Pretreatment in Acidic Conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 13467-13479.
- Franke-Whittle, I. H., Walter, A., Ebner, C., Insam, H., 2014. Investigation into the Effect of High Concentrations of Volatile Fatty Acids in Anaerobic Digestion on Methanogenic Communities. *Waste Management*, 34(11), 2080-2089.
- Fytli, D., Zabaniotou, A., 2008. Utilization of Sewage Sludge in EU Application of Old and New Methods—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116-140.
- Gabbita, K. V., Hzuang, J. Y., 1984 . Catalase Activity of Activated Sludge. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 8(2-3), 133-150.
- Golmakani, M. T. Rezaei, K., 2008. Comparison of Microwave assisted Hydro distillation with the Traditional Hydrodistillation Method in the Extraction of Essential Oils from *Thymus Vulgaris* L. *Food Chemistry*, 109, 925–930 .
- Guwy, A.J., Buckland, H., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., 1998. Active Biomass in Activated Sludge: Comparison of Respirometry with Catalase Activity Measured Using An On-Line Monitor. *Water Research*, 32(12), 3705-3709.
- Guwy, A.J., Martin, S.R., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., 1999. Catalase Activity Measurements in Suspended Aerobic Biomass and Soil Samples. *Enzyme Microb. Technol.*, 25(8), 669-676.
- Hasegawa, S., Shiota, N., Katsura, K., Akashi, A., 2000. Solubilization of Organic Sludge by Thermophilic Aerobic Bacteria as a Pretreatment for Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, 41(3), 163-169.
- Hephzibah, D., Kumaran, P., Saifuddin, N. M., 2015. Comparison of the Effects of Continuous Flow Microwave Pre-Treatment with Different Intensities on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge for Sustainable Energy Recovery from Sewage Treatment Plant. *International Journal of Bioengineering and Life Sciences*, 9(12), 1210-1214.
- Hong, S. M., Park, J. K., Lee, Y. O., 2004. Mechanisms of Microwave Irradiation Involved in the Destruction of Fecal Coliforms from Biosolids. *Water Research*, 38(6), 1615-1625.
- Hong, S. M., Park, J. K., Teeradej, N., Lee, Y. O., Cho, Y. K., Park, C. H., 2006. Pretreatment of Sludge with Microwaves for Pathogen Destruction and Improved Anaerobic Digestion Performance. *Water Environment Research*, 78(1), 76-83.
- Hong, S.M., 2002. Enhancement of Pathogen Destruction and Anaerobic Digestibility Using Microwaves. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin–Madison, USA.
- Houtmeyers, S., Degreève, J., Willems, K., Dewil, R., Appels, L., 2014. Comparing the Influence of Low Power Ultrasonic and Microwave Pre-Treatments on the Solubilisation and Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge. *Bioresource Technology*, 171, 44-49.
- Hsieh, C. H., Lo, S. L., Chiueh, P. T., Kuan, W. H., Chen, C. L., 2007. Microwave Enhanced Stabilization of Heavy Metal Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 139(1), 160-166.
- Iacovidou, E., Ohandja, D. G., Voulvoulis, N., 2012. Food Waste Co-Digestion with Sewage Sludge—Realising its Potential in the UK. *Journal of Environmental Management*, 112, 267-274.

- Jacob, J., Chia, L. H. L., Boey, F. Y. C., 1995. Thermal and Non-Thermal Interaction of Microwave Radiation with Materials. *Journal of Materials Science*, 30(21), 5321-5327.
- Jamali, M. K., Kazi, T. G., Arain, M. B., Afridi, H. I., Jalbani, N., Kandhro, G. A., Baig, J. A., 2009. Speciation of Heavy Metals in Untreated Sewage Sludge by Using Microwave Assisted Sequential Extraction Procedure. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 1157-1164.
- Jang, J. H., Ahn, J. H., 2015. High-Temperature Microwave NaOH Pretreatment of Waste-Activated Sludge for Anaerobic Digestion. *Journal of Environmental Engineering*, 141(8), 06015002.
- Jhansi, S.C. And Mishra, S.K., 2013. Wastewater Treatment and Reuse: Sustainability Options. *Journal of Sustainable Development*, 10, 1, 1 - 15.
- Jiang, H., Liu, T., Ding, J., Nie, H., Zhou, H., 2018. Optimization and Performance of Moderate Combined Alkali and Microwave Pretreatment for Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(2), 689-697.
- Jones, D. A., Lelyveld, T. P., Mavrofidis, S. D., Kingman, S. W., Miles, N. J., 2002. Microwave Heating Applications in Environmental Engineering—A Review. *Resources, Conservation and Recycling*, 34(2), 75-90.
- Jou, C. J., 2008. Degradation of Pentachlorophenol with Zero-Valence Iron Coupled with Microwave Energy. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 699-702.
- Kainthola, J., Shariq, M., Kalamdhad, A. S., Goud, V. V., 2019. Enhanced Methane Potential of Rice Straw with Microwave Assisted Pretreatment and its Kinetic Analysis. *Journal of Environmental Management*, 232, 188-196.
- Kenge, A. A., Liao, P. H., Lo, K. V., 2009. Treating Solid Dairy Manure Using Microwave-Enhanced Advanced Oxidation Process. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 44(6), 606-612.
- Kennedy, K. J., Thibault, G., & Droste, R. L., 2007. Microwave Enhanced Digestion of Aerobic SBR Sludge. *Water SA*, 33, 2, 261-270.
- Kepp, U., Machenbach, I., Weisz, N., Solheim, O. E., 2000. Enhanced Stabilisation of Sewage Sludge Through Thermal Hydrolysis—Three Years of Experience with Full Scale Plant. *Water Science and Technology*, 42(9), 89-96.
- Kim, D. H., Cho, S. K., Lee, M. K., & Kim, M. S., 2013. Increased Solubilization of Excess Sludge Does Not Always Result in Enhanced Anaerobic Digestion Efficiency. *Bioresource Technology*, 143, 660-664.
- Kim, J., Park, C., Kim, T. H., Lee, M., Kim, S., Kim, S. W., Lee, J., 2003. Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 95(3), 271-275.
- Kor-Bicakci, G., Abbott, T., Ubay-Cokgor, E., Eskicioglu, C., 2017. Effect of Microwave Pretreatment on Removal of Triclosan During Anaerobic Digestion of Wastewater Treatment Sludge. *Proceedings of the Water Environment Federation*, (9), 3062-3082.
- Kor-Bicakci, G., Ubay-Cokgor, E., Eskicioglu, C., 2019. Effect of Dewatered Sludge Microwave Pretreatment Temperature and Duration on Net Energy Generation and Biosolids Quality From Anaerobic Digestion. *Energy*, 168, 782-795.
- Koster, I. W., Lettinga, G., 1984. The Influence of Ammonium-Nitrogen on the Specific Activity of Pelletized Methanogenic Sludge. *Agricultural Wastes*, 9(3), 205-216.
- Koupaie, E. H., & Eskicioglu, C., 2016. Conventional Heating vs. Microwave Sludge Pretreatment Comparison Under Identical Heating/Cooling Profiles for Thermophilic Advanced Anaerobic Digestion. *Waste Management*, 53, 182-195.
- Koupaie, E. H., Eskicioglu, C., 2015. Below and Above Boiling Point Comparison of Microwave Irradiation and Conductive Heating for Municipal Sludge Digestion Under Identical Heating/Cooling Profiles. *Bioresource Technology*, 187, 235-245.
- Kuan, W., Chen C.L., Lo, S.L., 2008. Application of MW Energy on the Stabilization of Copper-Contained Industry Sludge. *Research Journal of Chemical and Environment*, 12(3):77-81.
- Kuglarz, M., Karakashe, D., Angelidaki, I., 2013. Microwave and Thermal Pretreatment as Methods for Increasing the Biogas Potential of Secondary Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plants. *Bioresource Technology*, 134, 290-297.
- Iacovidou, E., Ohandja, D. G., Voulvoulis, N., 2012. Food Waste Co-Digestion With Sewage Sludge—Realising its Potential in the UK. *Journal of Environmental Management*, 112, 267-274.
- Labuza, T. P., 1992. The Kinetics of Nonenzymatic Browning. *Physical Chemistry of Foods*.
- Lee, D. J., Lee, S. Y., Bae, J. S., Kang, J. G., Kim, K. H., Rhee, S. S., Seo, D. C., 2015. Effect of Volatile Fatty Acid Concentration on Anaerobic Degradation Rate from Field Anaerobic Digestion Facilities Treating Food Waste Leachate in South Korea. *Journal of Chemistry*, <https://doi.org/10.1155/2015/640717>.
- Liang, C., Bruell, C. J., Marley, M. C., Sperry, K. L., 2004. Persulfate Oxidation for in Situ Remediation of TCE. I. Activated by Ferrous Ion with and Without A Persulfate-Thiosulfate Redox Couple. *Chemosphere*, 55(9), 1213-1223.
- Liao, P. H., Lo, K. V., Chan, W. I., Wong, W. T., 2007. Sludge Reduction and Volatile Fatty Acid Recovery Using Microwave Advanced Oxidation Process. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(5), 633-639.
- Liao, P. H., Mavinic, D. S., Koch, F. A., 2003. Release of Phosphorus from BNR Sludges: A Study of Sludge Pre-Treatment Methods to Optimize Phosphorus Release for Subsequent Recovery Purpose. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2, 369-81.
- Liao, P. H., Wong, W. T., Lo, K. V., 2005a. Release of Phosphorus from Sewage Sludge Using Microwave Technology. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4(1), 77-81.
- Liao, P. H., Wong, W. T., Lo, K. V., 2005b. Advanced Oxidation Process using Hydrogen Peroxide/Microwave System for Solubilization of Phosphate. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(9), 1753-1761.
- Liu, J., Yu, D., Zhang, J., Yang, M., Wang, Y., Wei, Y., Tong, J., 2016. Rheological Properties of Sewage Sludge During Enhanced Anaerobic Digestion with Microwave-H₂O₂ Pretreatment. *Water Research*, 98, 98-108.
- Lo, K. V., Srinivasan, A., Liao, P. H., Bailey, S., 2015. Microwave Oxidation Treatment of Sewage Sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 50(8), 882-889.
- Lo, K. V., Tan, H., Tunile, I., Burton, T., Kang, T., Srinivasan, A., Liao, P. H., 2018. Microwave Enhanced Advanced Oxidation Treatment of Municipal Wastewater Sludge. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 128, 143-148.
- Lu, J., 2019. Carbon Footprint and Reduction Potential of Chinese Wastewater Treatment Sector. Master Thesis. University of Science And Technology of China, China (in Chinese).

- Machnicka, A., Nowicka, E., Grübel, K., 2017. Disintegration as a Key-Step in Pre-Treatment of Surplus Activated Sludge. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 39(1), 47-55.
- Madigan, M. T., J. M. M., Paul.V.D., David.P.C., 2005. *Brock Biology of Microorganisms*, 11th Edn. (International Edition).
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., Llabres, P., 2000. Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.
- Mawioo, P. M., Rweyemamu, A., Garcia, H. A., Hooijmans, C. M., Brdjanovic, D., 2016. Evaluation of a Microwave Based Reactor for the Treatment of Blackwater Sludge. *Science of The Total Environment*, 548-549, 72-81.
- Mehdizadeh, S. N., Eskicioglu, C., Bobowski, J., Johnson, T., 2013. Conductive Heating and Microwave Hydrolysis under Identical Heating Profiles for Advanced Anaerobic Digestion for Municipal Sludge. *Water Research*, 47(14), 5040-5051.
- Miguel, N., Coelho, G., Droste, R. L., Kennedy, K. J., 2011. Evaluation of Continuous Mesophilic, Thermophilic and Temperature Phased Anaerobic Digestion of Microwaved Activated Sludge. *Water Research*, 45(9), 2822-2834.
- Milieu, Wrc, RPA., 2010. Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on Land. Final Report, Part III: Project Interim Reports . DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r.
- Mottet, A., Steyera, J.P., Del Erisb, S., Vedrenneb, F., Chauzyc, J., Carr Ere, H., 2009. Kinetics of Thermophilic Batch Anaerobic Digestion of Thermal Hydrolysed Waste Activated Sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 46, 169-175.
- Müller, J. A., 2001. Prospects and Problems of Sludge Pre-Treatment Processes. *Water Science and Technology*, 44(10), 121-128.
- Müller, J., Lehne, G., Schwedes, J., Battenberg, S., Nèveke, R., Kopp, J., Hempel, D. C., 1998. Disintegration of Sewage Sludges and Influence and Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, 38(8-9), 425-433.
- Nascimento, A. L., Souza, A. J., Andrade, P. A. M., Andreote, F. D., Coscione, A. R., Oliveira, F. C., Regitano, J. B., 2018. Sewage Sludge Microbial Structures and Relations to Their Sources, Treatments, and Chemical Attributes. *Frontiers in Microbiology*, 3,9, 1462.
- Neis, U., 2000. Ultrasound in Water, Wastewater and Sludge Treatment. *Water* 21, 36-39 .
- Özön, E., Erdinçler, A., 2019. Effects of Microwave, H₂O₂/MW and H₂O₂/Heat Pre-Treatments on the Methane Production from Wastewater Sludges: Experimental and Modeling Approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35411-35421.
- Park, B., Ahn, J. H., Kim, J., Hwang, S., 2004. Use of Microwave Pretreatment for Enhanced Anaerobiosis of Secondary Sludge. *Water Science and Technology*, 50(9), 17-23.
- Park, W. J., Ahn, J. H., Lee, C. K., 2009. Effect of Temperature-Increase Rate and Terminal Temperature on the Solubilization of Sewage Sludge Using Microwave Irradiation. *Environmental Engineering Research*, 14(1), 48-52.
- Park, W., Ahn, J., Hwang, S., Lee, C., 2010. Effect of Output Power, Target Temperature, and Solid Concentration on the Solubilization of Waste Activated Sludge Using Microwave Irradiation. *Bioresource Technology*, 101(1), S13-S16.
- Parkin, G. F., Owen, W. F., 1986. Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. *Journal of Environmental Engineering*, 112(5), 867-920.
- Passos, F., Solé, M., García, J., Ferrer, I., 2013. Biogas Production from Microalgae Grown in Wastewater: Effect of Microwave Pretreatment. *Applied Energy*, 108, 168-175.
- Penaud, V., Delgenès, J. P., Moletta, R., 1999. Thermo-Chemical Pretreatment of a Microbial Biomass: Influence of Sodium Hydroxide Addition on Solubilization and Anaerobic Biodegradability. *Enzyme and Microbial Technology*, 25(3-5), 258-263.
- Pinnekamp, J., 1988. Effects of Thermal Pretreatment of Sewage Sludge on Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, 18-21 July, 97-108.
- Pino-Jelcic, S. A., Hong, S. M., Park, J. K., 2006. Enhanced Anaerobic Biodegradability and Inactivation of Fecal Coliforms and Salmonella Spp. in Wastewater Sludge by using Microwaves. *Water Environment Research*, 78(2), 209-216.
- Plazl, I., Leskovšek, S., Koloini, T., 1995. Hydrolysis of Sucrose by Conventional and Microwave Heating in Stirred Tank Reactor. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 59(3), 253-257.
- Qiao, W., Wang, W., Xun, R., Lu, W., Yin, K., 2008. Sewage Sludge Hydrothermal Treatment by Microwave Irradiation Combined with Alkali Addition. *Journal of Materials Science*, 43(7), 2431-2436.
- Qiao, W., Wang, W., Zhu, C., Zhang, Z., 2010. Biogas Recovery from Microwave Heated Sludge by Anaerobic Digestion. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 53(1), 144-149.
- Rani, R. U., Kumar, S. A., Kaliappan, S., Yeom, I., Banu, J. R., 2013. Impacts of Microwave Pretreatments on the Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Dairy Waste Activated Sludge. *Waste Management*, 33(5), 1119-1127.
- Ray, B. T., Lin, J. G., Rajan, R. V., 1990. Low-Level Alkaline Solubilization for Enhanced Anaerobic Digestion. *Research Journal of The Water Pollution Control Federation*, 81-87.
- Remya, N., Lin, J. G., 2011. Current Status of Microwave Application in Wastewater Treatment—A Review. *Chemical Engineering Journal*, 166(3), 797-813.
- Saha, M., Eskicioglu, C., Marin, J., 2011. Microwave, Ultrasonic and Chemo-Mechanical Pretreatments for Enhancing Methane Potential of Pulp Mill Wastewater Treatment Sludge. *Bioresource Technology*, 102(17), 7815-7826.
- Saifuddin, N., Fazlili, S. A., 2009. Effect of Microwave and Ultrasonic Pretreatments on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(1).
- Savoo, S., Mudhoo, A., 2018. Biomethanation Macrodynamics of Vegetable Residues Pretreated by Low-Frequency Microwave Irradiation. *Bioresource Technology*, 248, 280-286.
- Serrano, A., Siles, J. A., Martín, M. A., Chica, A. F., Estévez-Pastor, F. S., Toro-Baptista, E., 2016. Improvement of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Through Microwave Pre-Treatment. *Journal of Environmental Management*, 177, 231-239.
- Siddique, M. N. I., Munaim, M. S. A., Wahid, Z. B. A., 2017. The Combined Effect of Ultrasonic and Microwave Pre-Treatment on Bio-Methane Generation from Co-Digestion of Petrochemical Wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 145, 303-309.
- Sólyom, K., Mato, R. B., Pérez-Elvira, S. I., Cocero, M. J., 2011. The Influence of the Energy Absorbed from Microwave Pretreatment on Biogas Production from Secondary Wastewater Sludge. *Bioresource Technology*, 102(23), 10849-10854.

- Spinosa, L., Vesilind, P. A., 2001. Sludge into Biosolids. Handbook of Processing, Disposal, Utilization. Pp 394. IWA Publishing, London.
- Tanaka, S., Kobayashi, T., Kamiyama, K., N, M. L., Bildan, S., 1997. Effects of Thermochemical Pretreatment on the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge. *Water Science and Technology*, 35(8), 209–215.
- Thomas, L., Jun Thomas, L., Jungschaffer, G., Sprössler, B., 1993. Improved Sludge Dewatering by Enzymatic Treatment. *Water Science and Technology*, 28(1), 189-192.
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., Neis, U., 2001. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization. *Water Research*, 35(8), 2003-2009.
- Toreci, I., Droste, R. L., Kennedy, K. J., 2011. Mesophilic Anaerobic Digestion with High-Temperature Microwave Pretreatment and Importance of Inoculum Acclimation. *Water Environment Research*, 83(6), 549-559.
- Toreci, I., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2009. Evaluation of Continuous Mesophilic Anaerobic Sludge Digestion After High Temperature Microwave Pretreatment. *Water Research*, 43(5), 1273–1284.
- Toreci, I., Kennedy, K. J., Droste, R. L., 2010. Effect of High-Temperature Microwave Irradiation on Municipal Thickened Waste Activated Sludge Solubilization. *Heat Transfer Engineering*, 31(9), 766-773.
- TÜİK2018.Tuik.Gov.Tr/Prehaberbultenleri.Do?id=30667#:~:Text=At%C4%B1ksu%20ar%C4%B1tma%20tesisleri%20ile%20hizmet,%X%2C7%20olarak%20hesapland%C4%B1.&Text=Belediyeler%20taraf%C4%B1ndan%20kanalizasyon%20C5%9Febekesi%20ile,Miktar%C4%B1%20188%20litre%20olarak%20hesapland%C4%B1.
- TÜİK2021. <https://Data.Tuik.Gov.Tr/Bulten/Index?P=Adrese-Dayal%C4%B1-N%C3%Bcfus-Kay%C4%B1t-Sistemi-Sonu%C3%A7lar%C4%B1-2020-37210&Dil=1>.
- Tyagi, V. K., Lo, S. L., 2013. Microwave Irradiation: A Sustainable Way for Sludge Treatment and Resource Recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 288-305.
- Tyagi, V. K., Lo, S. L., Appels, L., Dewil, R., 2014b. Ultrasonic Treatment of Waste Sludge: A Review on Mechanisms and Applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(11), 1220-1288.
- Tyagi, V. K., Lo, S. L., Rajpal, A., 2014a. Chemically Coupled Microwave and Ultrasonic Pre-Hydrolysis of Pulp and Paper Mill Waste-Activated Sludge: Effect on Sludge Solubilisation and Anaerobic Digestion. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(9), 6205-6217.
- Valo, A., Carrère, H., Delgenès, J. P., 2004. Thermal, Chemical and Thermo-Chemical Pre-Treatment of Waste Activated Sludge for Anaerobic Digestion. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 79(11), 1197-1203.
- Verlicchi, P., Zambello, E., 2015. Pharmaceuticals and Personal Care Products in Untreated and Treated Sewage Sludge: Occurrence and Environmental Risk in The Case of Application on Soil—A Critical Review. *Science of the Total Environment*, 538, 750-767.
- Wainaina, S., Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., Taherzadeh, M. J., 2020. Resource Recovery and Circular Economy from Organic Solid Waste Using Aerobic and Anaerobic Digestion Technologies. *Bioresource Technology*, 301, 122778.
- Wang, C., Shao, Z., Qiu, L., Hao, W., Qu, Q., Sun, G., 2021. The Solid-State Physicochemical Properties and Biogas Production of the Anaerobic Digestion of Corn Straw Pretreated by Microwave Irradiation. *RSC Advances*, 11(6), 3575-3584.
- Wang, Y., Gui, C., Ni, X., Chen, M., Wei, Y., 2015. Multivariate Analysis of Sludge Disintegration by Microwave-Hydrogen Peroxide Pretreatment Process. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 856-864.
- Wang, Y., Wei, Y., Liu, J., 2009. Effect of H₂O₂ Dosing Strategy on Sludge Pretreatment by Microwave- H₂O₂ Advanced Oxidation Process. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 680-684.
- Wang, Z., Wang, W., Zhang, X., 2006. Integrated Process of Thermal Hydrolysis and Anaerobic Sequencing Batch Reactor for the Treatment of Sewage Sludge. *Acta Scientiarum Naturalium-Universitatis Pekinensis*, 42(6), 746.
- Weemaes, M. P., Verstraete, W. H., 1998. Evaluation of Current Wet Sludge Disintegration Techniques. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 73(2), 83-92.
- Westerholm, M., Crauwels, S., Geel, M. Van, Dewil, R., Lievens, B., Appels, L., 2016. Microwave and Ultrasound Pre-Treatments Influence Microbial Community Structure and Digester Performance in Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 5339–5352.
- Wojciechowska, E., 2005. Application of Microwaves for Sewage Sludge Conditioning. *Water Research*, 39(19), 4749-4754.
- Wong, W. T., Chan, W. I., Liao, P. H., Lo, K. V., Mavinic, D. S., 2006. Exploring the Role of Hydrogen Peroxide in the Microwave Advanced Oxidation Process: Solubilization of Ammonia and Phosphates. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(6), 459-465.
- Wong, W. T., Lo, K. V., Liao, P. H., 2007. Factors Affecting Nutrient Solubilization from Sewage Sludge Using Microwave-Enhanced Advanced Oxidation Process. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(6), 825-829.
- Woo, I. S., Rhee, I. K., Park, H. D., 2000. Differential Damage in Bacterial Cells by Microwave Radiation on the Basis of Cell Wall Structure. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(5), 2243-2247.
- Xia, D. K., Pickles, C. A., 2000. Microwave Caustic Leaching of Electric Arc Furnace Dust. *Minerals Engineering*, 13(1), 79-94.
- Xu, C. C., Lancaster, J., 2009. Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery. *Energy Recover. Nov. Sci. Publ. Inc., New.*
- Yan, Y., Chen, H., Xu, W., He, Q., Zhou, Q., 2013. Enhancement of Biochemical Methane Potential from Excess Sludge with Low Organic Content by Mild Thermal Pretreatment. *Biochemical Engineering Journal*, 70, 127-134.
- Yang, Q., Yi, J., Luo, K., Jing, X., Li, X., Liu, Y., Zeng, G., 2013. Improving Disintegration and Acidification of Waste Activated Sludge by Combined Alkaline and Microwave Pretreatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(6), 521-526.
- Yawson, S. K., Liao, P. H., Lo, K. V., 2011. Two-Stage Dilute Acid Hydrolysis of Dairy Manure for Nutrient Release, Solids Reduction and Reducing Sugar Production. *Natural Resources*, 2(04), 224.
- Yeneneh, A. M., Chong, S., Sen, T. K., Ang, H. M., Kayaalp, A., 2013a. Effect of Ultrasonic, Microwave and Combined Microwave-Ultrasonic Pretreatment of Municipal Sludge on Anaerobic Digester Performance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(5), 1-9.
- Yeneneh, A. M., Kayaalp, A., Sen, T. K., Ang, H. M., 2015. Effect of Microwave and Combined Microwave-Ultrasonic Pretreatment on Anaerobic Digestion of Mixed Real Sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(4), 2514-2521.

- Yeneneh, A., Sen, T., Chong, S., Ang, H. M., Kayaalp, A., 2013b. Effect of Combined Microwave-Ultrasonic Pretreatment on Anaerobic Biodegradability of Primary, Excess Activated and Mixed Sludge. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 2, 7-11.
- Yi, W. G., Lo, K. V., Mavinic, D. S., 2014. Effects of Microwave, Ultrasonic and Enzymatic Treatment on Chemical and Physical Properties of Waste-Activated Sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 49(2), 203-209.
- Yin, G., Liao, P. H., Lo, K. V., 2007. An Ozone/Hydrogen Peroxide/Microwave-Enhanced Advanced Oxidation Process for Sewage Sludge Treatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(8), 1177-1181.
- Yu, T., Deng, Y., Liu, H., Yang, C., Wu, B., Zeng, G., Nishimura, F., 2017. Effect of Alkaline Microwaving Pretreatment on Anaerobic Digestion and Biogas Production of Swine Manure. *Scientific Reports*, 7(1), 1-8.
- Zaidi, A. A., Feng, R., Malik, A., Khan, S. Z., Shi, Y., Bhutta, A. J., Shah, A. H., 2019. Combining Microwave Pretreatment with Iron Oxide Nanoparticles Enhanced Biogas and Hydrogen Yield from Green Algae. *Processes*, 7(1), 24.
- Zhang, L., Guo, X., Yan, F., Su, M., Li, Y., 2007. Study of The Degradation Behaviour of Dimethoate Under Microwave Irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 675-679.
- Zhang, Q. H., Yang, W. N., Ngo, H. H., Guo, W. S., Jin, P. K., Dzakpasu, M., Yang, S. J., Wang, Q., Wang, X. C., Ao, D., 2016. Current Status of Urban Wastewater Treatment Plants in China. 93, 11-22.
- Zhen, Z., Xu, Y., Bin, L., 2011. Effect and Mechanism of Microwave Irradiation and Alkaline Solubilization as a Combined Method on Sludge. *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering* (pp. 1135-1138) IEEE .
- Zheng, J., Kennedy, K. J., Eskicioglu, C., 2009. Effect of Low Temperature Microwave Pretreatment on Characteristics and Mesophilic Digestion of Primary Sludge. *Environmental Technology*, 30(4), 319-327.
- Zhou, B. W., Shin, S. G., Hwang, K., Ahn, J. H., Hwang, S., 2010. Effect of Microwave Irradiation on Cellular Disintegration of Gram Positive and Negative Cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(2), 765-770.



HABERLEŞME UYGULAMALARINDA UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİNİN KULLANIMI

Ümit Güler^{1*}, Mehtap ÖZENEN-KAVLAK², Müge DEMİR ÇAKIR³, Serhat AYDEMİR⁴, Hatice Selin AYDEMİR², Şeyma BERK ACET², Hakan Oktay AYDINLI⁵, Mahdi Hassan PASHAEİ²

¹ Türksat Uydu Haberleşme Kablo TV ve İşletme A.Ş., Gölbaşı, Ankara, Türkiye.

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye.

³ Müge Çakır Demir Mimarlık Hizmetleri, Eskişehir, Türkiye.

⁴ Osmangazi Elektrik Dağıtım A.Ş., Eskişehir, Türkiye.

⁵ BeSafe Danışmanlık, Çankaya, Ankara, Türkiye.

Anahtar Kelimeler

*Coğrafi Bilgi Sistemleri,
Haberleşme,
Uzaktan Algılama.*

Öz

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) yöntemleri çok uzun süredir tarım, haritacılık, hidroloji, jeoloji, madencilik, ormancılık, çevre, şehircilik, afet yönetimi ve arkeoloji gibi çok farklı faaliyet alanlarında, disiplinler arası iş birliğine dayalı olarak farklı yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. UA tarafında farklı mekânsal, spektral, radyometrik ve zamansal çözünürlüğe sahip algılayıcılardan elde edilen fotoğraflar kullanılarak çok çeşitli analizler yapılmakta, bunun sonucunda da planlama süreçleri yürütülmektedir. CBS alanında ise özel yazılım, donanım ve veri tabanı sistemleri kullanılarak coğrafi analizler yapılması noktasında her türlü bilginin birbiri ile ilişkilendirilmesi, işlenmesi, depolanması, analiz edilmesi ve değişiminin izlenmesi sağlanabilmektedir. Ancak haberleşme alanında UA ve CBS kullanımı incelendiğinde, dünya çapında yapılan örnekler bulunmakla birlikte Türkiye’de henüz yeni gelişmekte olan bir alan olduğu dikkat çekmektedir. Bu kapsamda düşünüldüğünde bu çalışmada literatürde Dünya ve Türkiye örneklerinin incelenmesi, UA ve CBS’nin haberleşme altyapı sistemlerinin tasarımı, planlanması, gerekli analizlerinin yapılması ve karar destek süreçlerine katkısının irdelenmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede alanında yapılacak olan çalışmalara altlık teşkil edecek örnek bir çalışma ortaya koyulacaktır.

UTILIZATION OF REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR TELECOMMUNICATION APPLICATIONS

Keywords

*Geographic Information System,
Telecommunication,
Remote Sensing.*

Abstract

Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) methods have been used for a long time in many different fields of activity such as agriculture, cartography, hydrology, geology, mining, forestry, environment, urbanism, disaster management, and archeology together with different methods based on interdisciplinary cooperation. Thanks to RS, a wide variety of analyzes are carried out using photographs obtained from sensors with different spatial, spectral, radiometric, and temporal resolutions, and as a result, planning processes are carried out. In the field of GIS, it is possible to process, store, analyze, monitor the change and associate with each other all kinds of information, at the point of geographical analysis by using special software, hardware, and database systems. However, when the use of RS and GIS in the field of telecommunication is examined, it draws attention that it is a newly developing field in Turkey, although there are

* İlgili yazar / Corresponding author: uguler@turksat.com.tr, +90-530-592-3436

examples from around the world. Considering in this context, , it is aimed in this study to examine the World and Turkey examples in the literature and to examine the contribution of RS and GIS to the design and planning of telecommunication infrastructure systems, making necessary analyzes and decision support processes. In this way, an exemplary study will be presented that will serve as a basis for the studies to be carried out in the field.

Alıntı / Cite

Güler, Ü., Özenen-Kavlak, M., Demir Çakır, M., Aydemir, H.S., Berk Acet, Ş., Aydın, H.O. ve Pashaei, M.H., (2022). Haberleşme Uygulamalarında Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 761-775.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ü. Güler, 000-0002-6376-9269
 M. Özenen-Kavlak, 0000-0002-5369-4494
 M. Demir Çakır, 0000-0002-6885-7188
 S. Aydemir, 0000-0001-5237-6083
 H.S. Aydemir, 0000-0002-7903-9535
 Ş. Berk Acet, 0000-0002-7903-9535
 H.O. Aydın, 0000-0001-9596-0079
 M.H. Pashaei, 0000-0003-4944-9979

Makale Süreci / Article Process

| | |
|---|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 25.09.2021 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date | 02.12.2021 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date | 11.12.2021 |
| Yayın Tarihi / Published Date | 30.06.2022 |

1. Giriş (Introduction)

CBS, konuma dayalı verilerin işlenmesi, düzenlenmesi, depolanması ve analiz edilebilmesi konularında karar vericilere eşsiz imkanlar sağlamaktadır. CBS alanında iletişim ve bilgi işleme kanalları özeline inildiğinde ise jeoinformatik kavramı ile karşılaşmaktadır. Jeoinformatik, yer bilimi verilerinin ve uygulamalarının entegrasyonu ve analizi yoluyla yeni bilgilerin keşfedilmesine yönelik bir bilişim çerçevesidir (Xue, Cracknell ve Guo, 2002). Burada UA, CBS, GPS, haritacılık, hidroloji, klimatoloji, hava fotoğrafçılığı ve fotogrametri konuları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır (Sinha vd., 2010). Son yıllarda iletişim, veri tabanı yönetimi, görüntü işleme mekanizmaları, uzman sistemler ve yapay zekâ gibi alanlarda gerçekleşen hızlı gelişmelere bağlı olarak konuma dayalı verinin işlenmesi ve analiz edilmesi konularında yeni ürün tasarımları ile teknolojik gelişmelerde bir atılım sağlanmıştır.

CBS'nin yaygınlığı araştırıldığında kullanımının planlama faaliyetlerinde sıklıkla tercih edildiği görülmektedir (Dennis Jr, 2006; Liang ve Liu, 2014; Stevens, Dragicevic ve Rothley, 2007). Çünkü planlama görevleri için çok çeşitli katmanlardan oluşan haritalar ve veri kaynaklarının aynı anda kendi nitelik ve niceliklerinin özellikleri dikkate alınarak analiz edilmesine ihtiyaç bulunmaktadır (Couclelis, 1991). Geçmişte kullanılan sistemlerde analize başlamadan önce gerekli tüm haritaların ve dokümanların (tapu kadastro, yerinde inceleme, toprak analizi, orman inceleme, vb.) farklı yerlerdeki farklı kaynaklardan toplanarak bir araya getirilmesi, farklı ölçeklerde ve projeksiyonlarda olabilen bu verilerin aynı ölçek ve projeksiyona sahip çalışma ortamına dönüştürülmeleri gerekiyordu (Karimi ve Motamed, 2003). El yordamı ile gerçekleştirilen bu süreçler çok maliyetli ve zaman alıcıydı. Günümüzde CBS yardımıyla haritalar sayısal ortamda dünya standartlarına göre koordinat sistemlerine uyumlu bir şekilde (metre veya feet) saklanmakta böylece ölçek dönüştürme ihtiyacı ortadan kalkmaktadır (Kainz, 2004). Buna ek olarak projeksiyon dönüşümleri bilgisayarlar yardımıyla kolaylıkla yapılabilmekte ve mekânsal analiz fonksiyonları planlanan görevler için uygulanabilmektedir. Böylelikle analiz yapma süreci hızlanmakta ve güncelleme, düzenleme ve depolama kabiliyeti artmaktadır.

Teknolojinin gelişimine bağlı olarak yaşanan bir diğer atılım da UA sektöründe gerçekleşmiştir. UA cisimlere temas etmeden, uzaktan algılama teknolojileri kullanılarak onların fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinilmesidir (Jia ve Stein, 2017). UA verisinin elde edilmesi için çoğunlukla uydu üzeri algılayıcılar kullanılsa da balon ya da uçak gibi hava araçlarına yerleştirilen algılayıcılar da kullanılabilir (Uça Avcı, Uça Güneş ve Çabuk, 2015). UA kullanılarak elektromanyetik spektrumun geniş bir bölgesinde bir veya birden fazla farklı bant aralıklarında ölçülen gözlem verileri ile cisimleri tespit etmek, ayırt etmek ve sınıflandırmak gibi amaçlara ulaşılması mümkün olmaktadır (Kennedy vd., 2009). UA ile elde edilen görüntülerde öne çıkan özellikler, mekânsal, spektral, radyometrik ve zamansal çözünürlük kavramlarıdır. Mekânsal çözünürlük bir sensör sisteminin anlık olarak algıladığı yer yüzeyini, spektral çözünürlük sensörlerin elektromanyetik spektrumda çalıştığı dalga boylarını, zamansal çözünürlük uydunun yer üzerinde belirlenmiş yörüngesi içerisindeki periyoditesini, radyometrik çözünürlük ise sensör sistemi tarafından elde edilen spektral tepkisini ölçmek için kullanılan sinyal yoğunluk aralığını ifade etmektedir (Walsh, Butler ve Malanson, 1998). Buradan yola çıkılarak çeşitli platformlardan elde

edilen yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve hava fotoğraflarının CBS ile entegre bir şekilde analiz edilebileceği UA yöntemleri geliştirilmiştir. Bu sayede farklı görüntüler işlenerek çeşitli disiplinlerde önemli kazanımlar sağlanmıştır (Kavzoğlu ve Çölkesen, 2011).

Bu çalışmanın amacı, UA ve CBS'nin haberleşme altyapı sistemlerinde kullanım olanaklarının araştırılması ve karar destek süreçlerine olan katkılarının ortaya konularak, haberleşme bilgi kaynakları yönetiminde etkin bir şekilde rol alıp alamayacağını irdelenmesidir. Bu kapsamda literatürdeki Dünya ve Türkiye örnekleri incelenerek mevcut durum ortaya konulacak, geleceğe dönük çözüm önerileri sunulacaktır.

2. CBS ve UA'nın Tarihi (The History of GIS and RS)

Dünya'nın en eski bilimlerinden birisi haritacılıktır. İlk çağda yaşayan ve öncelikli amacı yaşamak için beslenmek olan insanlar, avlanma ve beslenme bölgelerini, kendilerinin oluşturdukları ortak bir işaret dili ile kayalara oyarak, günümüzün modern haritacılığına dair temelleri atmışlardır. Yazının bulunmasından bile önce insanlar, temel harita figürlerini kullanmışlardır. Bugün bilinen en eski harita benzeri kalıntının tarihinin M.Ö. 6200 olarak belirlenmesi, buna karşın yazının tarihinin M.Ö. 3000 olarak kabul edilmesi bu görüşü destekleyici karakterdedir (Last, 1998).

18. ve 19 yüzyıllarda oluşturulan, çeşitli sorunların tespiti ve çözümü için kullanılan haritalar CBS'nin başlangıcı olarak adlandırılabilir. İlk örnekler olarak, 1781 yılında Louis-Alexandre Berthier tarafından yapılan Yorktown Savaşı Birlik Hareketleri Haritası, 1819 yılında Charles Dupin tarafından yapılan Fransa Nüfus Yoğunluğu ve Suç Haritaları ve 1854 yılında John Snow tarafından yapılan Londra Kolera Salgını-Su Kaynakları İlişkisi Haritası karşımıza çıkmaktadır (Waters, 1998). Dr. Snow, salgın yerleri, yollar, mülk sınırları ve su yollarını haritalamış, kolera vakalarının su yolları boyunca ortaya çıktığını ve su pompası etrafında yoğunlaştığını göstermiştir (Şekil 1). Coğrafya ile halk sağlığını birbirine bağlayan önemli bir gelişme olan bu harita, sadece mekânsal analizin başlangıcı olmakla kalmamakta, aynı zamanda epidemiyoloji alanının başlangıcı olma özelliğini de taşımaktadır. Bu açıdan Dr. Snow'un çalışması, CBS'nin, sorunları çözen bir araç olduğunu göstermektedir (GISGeography, 2021).



Şekil 1. Dr. John Snow'un kolera salgını haritası (Dr. John Snow's cholera epidemic map) (Geraghty, 2016)

20.yüzyıla gelindiğinde teknolojinin de gelişmesiyle birlikte haritalama teknikleri gelişmeye başlamıştır. İlk olarak 1950'li yıllarda Jacqueline Tyrwhitt tarafından ortaya konulan manuel çakıştırma (manuel map overlay) mantığı, 1960'lı yıllarda McHarg tarafından yeniden yorumlanmıştır (Değerliyurt ve Çabuk, 2015). Bu yorum, McHarg'ın Desing with Nature isimli çalışmasında CBS'nin temel mantığını oluşturan çakıştırma (map overlay) örneğinin verilmesi ile zenginleştirilmiştir (McHarg, 1969). Böylece CBS'nin oluşturulmasında da bu mantık kullanılmış ve katman işlevi ortaya çıkmıştır. Waldo Tobler, 1959 yılında MIMO (map in map out) olarak adlandırılan temel bir CBS modeli tasarlamıştır. MIMO sistemindeki amaç; verilerin koordinatlandırılması, saklanması, analiz edilmesi ve görüntülenmesi işlemlerinin bütünüdür (Tobler, 1959). İlk kez çalışan bir CBS programı, 1963 yılında Ottawa'da Federal Ormanlık ve Kırsal Kalkınma Bakanlığı'nca kurulmuştur. Bu program Dr. Roger Tomlinson tarafından geliştirilmiştir. Kanada Coğrafi Bilgi Sistemi (CGIS) adı verilen çalışmada, ziraat, topraklar, yaban hayatı,

su akışı, ormancılık ve arazi kullanımı ile ilgili bilgiler 1:50.000 ölçeğinde haritalandırılmıştır. Kırsal Kanada'nın arazi kabiliyetini tespit etmek amacıyla Kanada Arazi Envanteri (Canada Land Inventory) için toplanan verilerin saklanması, incelenmesi ve işlenmesi bu sistem ile gerçekleştirilmiştir. CGIS dünyadaki bu türden ilk sistem olup, yerleşim, ölçüm ve sayısallaştırma/tarama yeteneklerini sağladığı için harita uygulamalarında bir ilerleme olarak kabul edilmektedir (Tomlinson, 1967). 1966 yılında ise Edgar Horwood tarafından oluşturulan URISA (Kentsel ve Bölgesel Bilgi Sistemleri Kuruluşu) programı Berkeley konferansında resmen kabul edilmiştir. URISA'nın bilgi teknolojisi uygulaması ile kamu işleri, planlama, acil servisler, çevre sorunları vb. ile ilgili sorunları çözmek için çalışılmıştır (Urisa, 2021). Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Harvard Laboratuvarı ise CBS devriminin kıvılcımı olmuştur. Laboratuvardaki araştırmada, poligon (vektör) sınırları kullanarak katman oluşturma metodu geliştirilmiştir. 1970'lerde araştırmacıların Harvard Laboratuvarı'ndan ayrılmaya başlamaları ile CBS'nin özel sektörde yayılımı başlamıştır (Çömert vd., 2016). 1980'lerde bilgisayar ile yazılımlar üretilmeye başlanarak verilere hızlı ve basit ulaşım sağlanmıştır. Bu süreç sonucunda ise CBS temel araştırmalarda ve karar verme süreçlerinde kullanılan bir araca dönüşerek, bilgiyi öğrenen ve uygulayabilen akıllı yazılımlar geliştirilmeye başlanmıştır (Yomralıoğlu, 2000). Bugün mekânsal özelliği olan herhangi bir sorunsalın ortaya konmasında ve analiz edilmesinde CBS vazgeçilmez bir araç haline gelmiş, CBS'nin kullanım alanı ise oldukça genişlemiştir.

UA'nın tarihsel sürecine bakıldığında ise 1850'lerden itibaren balonlar ve uçurtmalar kullanılarak havadan fotoğraflar çekildiği, sonrasında güvercinlere sabitlenen fotoğraf makineleri ile hava fotoğrafları elde edildiği görülmektedir (Bilgi, 2007). Birinci Dünya Savaşında uçakların kullanılmaya başlanmasıyla hızlı bir gelişim göstererek, elde edilen hava fotoğrafları veri olarak kullanılmaya başlanmıştır (Aggarwal, 2004). 1957 yılında Sovyetler Birliği'nin ilk araştırma uydusu "Sputnik"i fırlatmasının ardından (Cracknell ve Varotsos, 2007), 1958'de Amerika Birleşik Devletleri NASA'yı kurmuş ve bu konuda bir rekabet başlamıştır (Heracleous, Yniguez ve Gonzalez, 2019). UA'nın literatüre girişi ise 1960 yılında olmuştur (Bilgi, 2007). 1972 yılında ise UA çalışmaları yapmak üzere Landsat-1 uydusu fırlatılmıştır (White ve Wulder, 2014). Bu tarihten itibaren teknolojinin gelişimine paralel olarak UA uydusu çözünürlükleri de artış göstermiştir (Bilgi, 2007).

UA konusunda Türkiye'deki durum incelendiğinde, uydusu teknolojileri üretim sürecinin 27 Eylül 2003 tarihinde BİLSAT uydusunun fırlatılması ile başladığı görülmektedir (Tubitak Uzay, 2020a). Bu uydusu projesi ile birlikte küçük uyduların tasarımı ve üretimi için gerekli altyapı ve bir yer istasyonu da Tubitak Uzay tesislerine kurulmuştur. BİLSAT uydusundan sonra sahip olduğumuz ikinci UA uydusu olan RASAT Türkiye'de tasarlanıp üretilen ilk yer gözlem uydusudur ve 2011 yılında fırlatılmıştır. 7,5 metre pankromatik ve 15 metre çok bantlı çözünürlüğe, pankromatik, mavi, yeşil ve kırmızı bantlara sahip yüksek çözünürlüklü optik görüntüleme sistemine sahiptir (Şekil 2) (Teke, Seyfioğlu, Ağçal ve Gürbüz, 2014). 2012 tarihinde fırlatılan 2,5 metre pankromatik ve 5 metre çok bantlı çözünürlüğe sahip GÖKTÜRK-2 uydusu, TSK ile kamu kurum/kuruluşlarının görüntü ihtiyacını karşılamak amacıyla üretilmiştir ve halen kullanımdadır (Tubitak Uzay, 2020). 2016 yılında askeri istihbarat amaçlı yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesi amacıyla fırlatılan GÖKTÜRK-1 uydusu projesi ile aynı zamanda gelecekteki gözlem ve haberleşme uydularının yurtiçinde üretilmesine yönelik kritik bir altyapı olan uydusu montaj, entegrasyon ve test merkezine de sahip olunmuştur (Tusaş, 2021). Halen devam etmekte olan İMECE Uydusu Sistemleri Alt Yapı Projesi ile BİLSAT, RASAT ve GÖKTÜRK-2 projelerinde elde edilen tecrübe kullanılarak metre altı uydularda kullanılabilecek uydusu alt sistemlerinin ülke içerisinde geliştirilmesi için gereken alt yapının oluşturulması hedeflemektedir (Tubitak Uzay, 2020b).



Şekil 2. RASAT uydu görüntüsü (RASAT satellite image) (Tubitak Uzay, 2021)

Günümüze gelindiğinde CBS ve UA uygulamalarının tarım, haritacılık, hidroloji, jeoloji, madencilik, ormancılık, çevre, şehircilik, afet yönetimi ve arkeoloji gibi çok çeşitli alanlardaki kullanımının hızla arttığı görülmektedir (Başarsoft, 2021; Kavzoğlu ve Çölkesen, 2011; Uça Avcı vd., 2015). CBS ve UA'nın disiplinler arası çalışmalarda karar destek sistemi olarak kullanıldığı pek çok sektör bulunmakla birlikte örnekleri Tablo 1'de verilmiştir (Kavzoğlu ve Çölkesen, 2011). Buna rağmen CBS kullanımı telekomünikasyon bilgi kaynakları (baz istasyonu gibi) yönetiminde oldukça yetersiz kalmaktadır (Shu, Li, Liu, Xie ve Zeng, 2011).

Tablo 1. Temel alanlarda konuma dayalı problemlerin çözümünde UA ve CBS'nin rolü (The role of RS and GIS in solving location based problems in key areas) (Kavzoğlu ve Çölkesen, 2011)

| Problem Alanı | UA | CBS |
|---------------|--|---|
| Haritacılık | Sayısal arazi modellerinin üretilmesi, yeryüzü deformasyonlarının izlenmesi, topoğrafik harita üretimi | Eğim ve bakı haritalarının üretilmesi, 3B şehir haritalarının üretilmesi, topoğrafik harita üretimi |
| Hidroloji | Su kalitesi analizleri, su kirliliği izleme, sel haritalaması ve izleme, kar dağılımını ve miktarını belirleme, buz erimesi ve buz hareketi gözlem, gemi atıklarını izleme | Su kaynakları yönetimi, Hidrolojik analizler, Kirliliğin etkilerinin belirlenmesi, Taşkın ve sel riski analizleri, Kar ve buz kütleleri için hacim hesabı |
| Tarım | Arazi kullanımının belirlenmesi, Bitki tipini ayırma, Ürün çeşitliliğinin belirlenmesi, Bitki canlılığının izlenmesi, Bitki gelişimini izleme, Rekolte tahmini, Toprak nemi ve türünü belirleme | Sürdürülebilir arazi yönetimi, Tarla planlama, Hassas tarım çalışmaları, Rekolte tahmini, Sulama ve drenaj ağlarının değerlendirilmesi, Haşere ve hastalık yönetimi |
| Jeoloji-Maden | Jeolojik yapı araştırmaları, fay, çizgisellik ve kırıkların tanımlanması, jeotermal araştırmalar, deprem araştırmaları, volkanik araştırma çalışmaları ve izleme, maden ve yeryüzü kaynaklarının aranması, petrol aramaları, kayaç tiplerinin tespiti, petrol sızıntılarının tespiti | Sayısal jeoloji haritası üretimi, eğim haritalarının üretilmesi, bakı haritalarının üretilmesi, havza alanlarının belirlenmesi, deprem senaryoları ve risk analizi, volkanik senaryolar ve risk analizi, doğal kaynak yönetimi ve planlaması, yer altı su seviyesi haritasının üretilmesi, maden çıkarma ve petrol arama planlaması |
| Ormancılık | Orman türlerinin haritalanması, ağaç hastalıklarının izlenmesi, ormansızlaşma ve çölleşme izleme, kereste üretimi tahmini ve planlaması, orman yangınlarının izlenmesi | Orman kaynaklarının yönetimi ve planlanması, habitat korunması, izlenmesi, orman kesiminin planlanması, orman yollarının planlanması, orman yangını için riskli alanlarının belirlenmesi |
| Çevre | Ekolojik gelişmelerin sürekli ve geniş, ölçekte izlenmesi, arazi örtüsü veya kullanımının haritalanması, akarsu, | Çevresel bilgi sistemi oluşturulması, su kaynakları yönetimi ve planlanması, kıyı değişimlerinin ve riskli bölgelerin analizi, |

| | | |
|-------------------------|--|---|
| | deniz ve göl su kirliliklerinin belirlenmesi, kıyı alanlarındaki değişimlerin izlenmesi, sanayi alanları ve çevresindeki değişimlerin izlenmesi, orman alanlarındaki değişimin izlenmesi | gürültü kirliliği haritalarının oluşturulması, katı atık yönetimi ve planlanması, orman envanter haritalarının yapımı |
| Şehircilik Faaliyetleri | Arazi örtüsü ve kullanımının belirlenmesi, şehirleşmedeki gelişimin izlenmesi, zaman içinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi, altyapı çalışmaları, kaçak yapılaşmanın tespiti, planlama çalışmaları, sayısal yükseklik modeli üretimi | Belediyecilik faaliyetleri, alt yapı sistemlerinin planlanması, şehir içi ulaşım, yol ağlarının analizi ve planlanması, kentsel gelişim alanlarının planlanması, kaçak yapıların tespiti, üç boyutlu şehir modellerinin üretilmesi, taşınmaz değer haritalarının üretilmesi |

3. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Haberleşme Sistemlerinde Kullanımı ve Uygulama Örnekleri (Utilization of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Communication Systems and Application Examples)

Bu bölümde UA'nın ve CBS'nin haberleşme sistemlerinde kullanımına ilişkin değerlendirmeler yapılmış, kullanım örnekleri makaleler ve çeşitli yayınlarda gözden geçirilmiş ve bu konuda yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir.

3.1. UA'nın Haberleşme Sistemlerinde Kullanımı (Utilization of RS in Communication Systems)

UA'nın haberleşme sistemlerinde kullanımı üzerine yapılan literatür araştırması, bu konuda yapılan çalışmaların çok az olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla beraber, SAR teknolojisi yardımıyla sinyal yayma modelleri oluşturulması, haberleşme ağlarındaki zayıf noktaların tespit edilmesi, baz istasyonu ya da iletişim kuleleri gibi altyapıların kurulacağı yerlerin belirlenmesi gibi amaçlarla kullanılma imkânı bulabilmektedir. Örneğin, Hassan, Snunu ve Shaweesh (2003), "Automatic Mobile Communications Network Planning Using Geographical Information System" isimli makalelerinde, Mobil Telekomünikasyon ağları için radyo baz istasyonunun yerini ve sayısını optimize ederek, GSM'in otomatik planlanması için ticari CBS ve UA yazılım araçlarının uygulanmasına dayanan minimum maliyeti göz önünde bulunduran bir çözüm sunmaktadır. Gereken minimum BTS yerleri belirlenirken arazi şartları ve yükseklikleri önemli olduğundan yüksek çözünürlüklü Dijital Yükseklik Modeli (DEM) verileri ve haritalama ve analizler için CBS ve UA yazılımları kullanılmıştır. SPOT 1A uydusu stereo görüntüleri ve uygun şekilde seçilen yer kontrol noktaları kullanılarak DEM verisi oluşturulmuştur. GSM telekomünikasyon sinyallerini yansıtabilecek veya zayıflatabilecek tüm engelleri bulmak için her bölgedeki maksimum yükseklik belirlenmiştir. Bu verilere dayanılarak yazılım sayesinde "Otomatik Hücre Planlama Modülü (ACP)" oluşturularak BTS için 42 alan ve 1 adet Mobil Anahtarlama Merkezi belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada geliştirilen ACP modülünün, yapılan çalışmayı otomatikleştirerek ve herhangi bir mobil iletişim ağı için ihtiyaç duyulan yüksek kaliteli hizmetleri garanti ederek zamandan ve emekten tasarruf sağlayacağı ifade edilmiştir. Musa (2007), "The use of remote sensing and geographic information system (GIS) in executing terrain analysis for siting global system for mobile communication (GSM) transmitting masts" adlı makalesinde GSM direklerinin yerlerinin çekim gücüne etkisinin incelenmesinde UA ve CBS'yi kullanmıştır. Üniversite alanında sinyal alışıının bazı bölgelerde sorunsuz olması, bazı bölgelerde kısmen kesintilerin olması ve bazı bölgelerde ise sinyal alınamamasının sebebinin araştırıldığı çalışmada ilk olarak çalışma alanı için DEM oluşturulmuştur. Mevcut direklerin görüş alanı belirlenerek bir görüntü analizi yapılmıştır. Görüş alanını etkileyen faktörlerin başında direklerin yakınında bulunan bir tepenin olduğu anlaşılmıştır. Sonrasında olası bir direk yeri belirlenerek yapılan analizler sonucunda üniversitenin sinyal çekiminin iyileşeceği görülmüştür. GSM direkleri yerleştirilmeden önce bu gibi analizlerin yapılmasının gerektiği vurgulanmıştır. Muralikrishnan, Muralikrishna, Manjunath ve Rao (2007) tarafından Hindistan Uzaktan Algılama uydusu IRS-1C verilerinin yüksek çözünürlüklü pankromatik stereo verilerinin kullanıldığı "Spatially Integrated Approach for Terrain Modelling and Analysis for Mobile Communication Applications" adlı çalışmalarında uzaktan algılama ve raster CBS kullanarak mobil iletişim amacıyla bir kule ağı kurmak için bir planlama stratejisi gösterilmiştir. UA'nın haberleşme sistemlerinde kullanımı konusunda diğer bir örnek, Çabuk, Karademirler, Uyguçgil ve İnceoğlu (2009) tarafından yapılan "GIS and RS Based Location Determination for GSM Transmitters to Minimize the Negative Effects of Electromagnetic Pollution for Improving Quality of Urban Places" adlı çalışmadır. Bu çalışmada en geniş kapsama alanına sahip olacak şekilde, gerekli baz istasyonlarını minimize edecek ve elektromanyetik kirliliği azaltacak şekilde GSM baz istasyonlarının kurulacağı en iyi ve uygun alanların tespit edilmesi amacı ile CBS ve UA destekli bir metot önerilmiştir. Bu metot sayesinde GSM operatörlerinin minimum sayıda GSM vericisi ile en yüksek çıkış seviyesi sağlayabilecekleri ve böylece ciddi oranda ekonomik kazanç sağlayabilecekleri, bu arada da GSM vericilerinden kaynaklanan insan sağlığı etkilerinin minimize edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Baz istasyonlarının halk sağlığına etkileri uzun zamandır güncelliğini koruyan bir araştırma konusudur. Adegbeyega, Oyetunji, Olajuyigbe ve Adesina (2017), Nijerya'nın Ibadan metropolünde sağlık etkilerini minimize ederken optimum sinyal kapsamını garanti edecek baz istasyonları yerleşimi üzerine çalışmışlardır. 30 metre çözünürlüğe sahip Sayısal Yüzey Modeli (Digital Surface Model, DSM), 0,5 metre çözünürlüğe sahip IKONOS uydusu görüntüleri, baz istasyonlarının coğrafi lokasyonları ve Ibadan idari haritasının kullanıldığı çalışmada, baz istasyonu sinyal gücü analizi, DEM ile baz istasyonu uygunluk analizi, eğim analizi ile baz istasyonu uygunluğu analizi, nehirlere yakınlık analizi, bina yoğunluğuna göre baz istasyonu uygunluğu analizi ve entegre uygunluk analizi yapılmıştır. Sonuçta yeni baz istasyonları için yer önerisinde bulunulmuş, 934 binada ikamet eden 13,387 kişinin baz istasyonlarına 10 metre mesafede olduğu, bu nedenle zararlı radyasyonun muhtemel sağlık tehlikelerine maruz kaldıkları tespit edilmiştir. Demetri vd. (2019), IOT (Internet of Things) için kullanılmak üzere geliştirilen ve LoRa (Long Range) olarak isimlendirilen uzun mesafe haberleşme hizmetinin kapsama alanını, kurulum ve yerinde ölçüm değerleri olmadan uzaktan algılamaya dayalı olarak tahmin eden otomatik bir yaklaşım önermişlerdir. LoRa uzun mesafe haberleşme imkânı vermekle birlikte, alıcı ve vericinin bulunduğu çevrenin özelliklerine bağlı olarak heterojen bir kapsama alanına sahiptir. Hedef bölge çok geniş olduğu için bu özelliklerin yerinde ölçümlerle elde edilmesi çok zordur. Çalışmada çok bantlı görüntüler kullanılmış, bu görüntülerdeki çevresel bileşenler makine öğrenmesine dayalı olarak sınıflandırılmış ve hatların paket alım oranları ile yüzey tipi arasında ilişki kurulmuştur. Okumura-Hata Modeli ve uzaktan algılama tabanlı geliştirilen aracın birleşimi ile yapılan doğrulama neticesinde mevcut modellerde 20-40 dBm hata ile elde edilen sinyal gücünün, kompleks şehir ortamında 10 dBm içerisinde bir hata ile tahmin edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Uydu ile telemetri, telekomut ve faydalı yük verisine ilişkin haberleşmeyi gerçekleştiren bir uydu yer kontrol istasyonunu çevreleyen binalar, dağlar, tepeler gibi fiziki engeller, uydu ile yer istasyonları arasındaki iletişimin süresini düşürebilir. Yer istasyonu için uygun yerin seçimi bir zorunluluk olduğundan bu engellerin analiz edilmesi gerekir. Rumadi, Kamirul, Armin, Bissa ve Prasetya (2020) tarafından Endonezya'nın Biak adasında bulunan yer istasyonu için gerçekleştirilen çalışmada, bu tür engellerin miktarını ölçen yeni bir yaklaşım tanıtılmıştır. Ortalama engel eğiminin hesaplandığı ve haritalandığı çalışmada kullanılan DSM veri seti, Japon ALOS (Advanced Land Observation Satellite) uydusunda bulunan PRISM (Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping) optik sensöründen elde edilmiştir. Yatayda 1 arcsec (yaklaşık 30 metre) çözünürlüğe sahip bu veri seti ile yapılan simülasyon sonuçları, LAPAN-A2 ve LAPAN-A3 uydu TT&C (Telemetry, Tracking and Commanding) log kayıtları ile hesaplanan değer ile kıyaslanmış, önerilen yaklaşımın %93,1 doğruluk değerine ulaştığı ifade edilmiştir.

3.2. CBS'nin Haberleşme Sistemlerinde Kullanımı (Utilization of GIS in Communication Systems)

CBS'nin haberleşme sistemlerinde kullanılmaya başlanması ise daha eskilere dayanmaktadır. Zira CBS'nin haberleşme sistemlerinde kullanımı bir zorunluluk olmuştur. CBS kullanımı sayesinde mevcut durum net bir şekilde ortaya konulabilirken, sorunların en kısa sürede çözümlenebilmesi, müşteri ihtiyaçları ve teknolojinin evrimi nedeni ile ihtiyaç duyulan karar alma süreçlerinin yürütülmesi ve genişleme ihtiyaçlarının tespiti kolaylaşmış, bu süreçte zaman, işgücü ve emek kaybının mümkün olduğunca önlenmesi amaçlanmıştır. CBS'nin haberleşme alanında kullanım alanları UA'ya göre daha fazladır.

Haberleşme alanında çözülmesi gerekli temel problemler, kapasite planlama, talep yönetimi, şebeke izleme ve sorunlara müdahale, kaynakların etkin kullanımı ve karar destekleridir. CBS türü sistemler olmadan bunlar çok fazla zaman, para, ekipman, inceleme ve işgücü gerektirecek süreçler olacaktır. Ayrıca eski verilere erişim zorlaşacak, verilerin depolanması için çok fazla yere ihtiyaç olacak, bakım sorunları meydana gelecek, başka birimlere ya da kurumlara veri aktarmak zorlaşacak, şebeke arıza tespiti ve onarımı zaman alacak, kaynakların etkin kullanıldığından ise emin olunamayacaktır. Bütün parametreler bilinmeden karar almak da mümkün olamayacaktır (Gupta, 2012). Bu noktada haberleşme alanında şebeke planlama ve genişletme, şebeke elemanlarının gösterimi, kablolama ve kanal haritalarının hazırlanması, bağlantı kabinlerini içeren kablolama çizimlerinin hazırlanması, bu bilgilerin düzenli olarak güncellenmesi, gerekli harita ve çizimlerin üçüncü şahıslar ile paylaşılması gibi amaçlarla kullanılan CBS'nin getirdiği avantajlar şu şekilde özetlenebilir (C Fry, 1999; Gupta, 2012; Navmart, 2020; Omogunloye, Qaadri, Omogunloye ve Oladiboye, 2013):

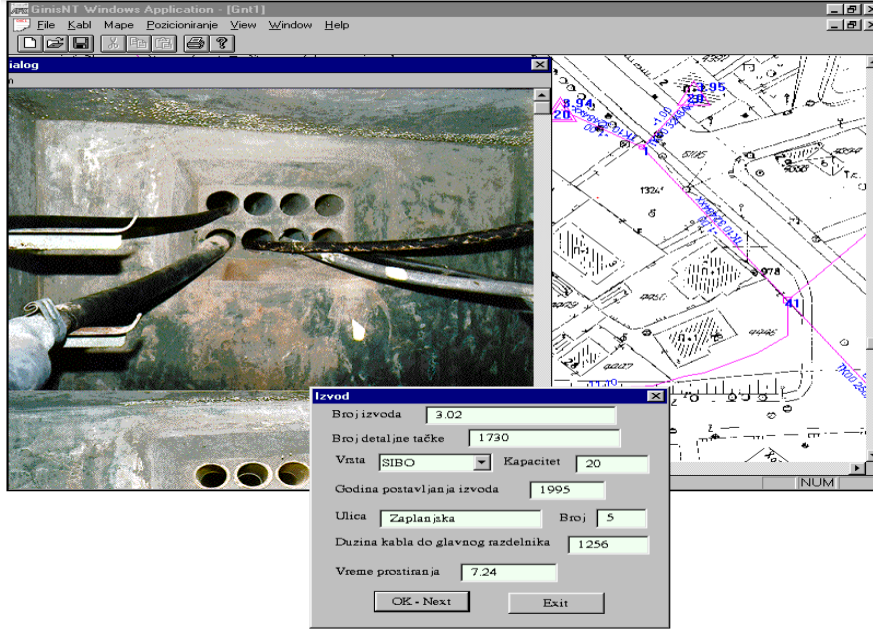
- Şebeke ihtiyaçları ile Pazar potansiyeli arasında ilişki kurulmasını sağlar,
- Kapasite analizi yapmak için mevcut şebeke yükü ile öngörülen talep artışını tanımlar,
- Sahada ihtiyaç duyulan ekipman sayısı anlık olarak gözlemlenebilir,
- CBS yazılım araçları ile haritalar kolaylıkla oluşturulabilir ve güncellenebilir,
- Tüm veriler sayısal ortamda tutulduğu için veri yönetimi kolaylaşır,
- Az bakım gerektirir,

- Herhangi bir verinin kurum içi ya da kurum dışı paylaşımı kolaylaştırır,
- Şebekenin herhangi bir yerinde hatanın ve lokasyonunun bulunmasını kolaylaştırır,
- Şebekenin ayağa kaldırılmasını kolaylaştırır,
- Kaynakların kullanımı ölçüldüğü için uzun vadeli planların yapılması kolaylaştırır,
- Yeni donanımın yerleştirileceği optimum noktanın belirlenmesi sağlanır,
- Müşterilerin geçmiş arıza kayıtlarına ulaşılabilirdiği için herhangi bir sorunda kaynak nedenin tespiti kolaylaştırır,
- Müşteri sorunları daha kısa sürede çözümlenir,
- Tüm katmanların üst üste çakıştırılabilmesi sayesinde kulelerin nerede olması gerektiği, fiber optik kablolar için en uygun rotanın ne olacağı gibi kararlar daha kolay alınabilir.

Dünya yüzeyi üzerinde bilginin katmanlar ile ifade edilmesi ve bunun nitelik verileri ile desteklenmesi, mühendisler şebekelerin modellenmesi ve herhangi bir yerden erişimi imkânı vermektedir. Bu zamandan ve emekten tasarruf da sağlamaktadır. CBS'nin güçlü otomasyon yetenekleri şebeke tasarım sürecinin hızlı ve doğru işlemlerini sağlamakta, hataları önleyerek zaman ve para kaybını yok denecek seviyeye indirgemektedir. CBS'nin kural bazlı özellikleri, maliyet veya en kısa rota için optimize edilmiş daha iyi ürünler ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Omogunloye vd., 2013).

CBS, telekomünikasyon sektörü için gerekli bir araçtır. Birçok kablosuz şebeke mühendisi, şu an kullanımda olan birçok kablosuz tasarım araçlarının belkemiği olarak CBS'ye aşınadır. DEM kullanarak ve sayısal yükseklik modelleri inşa ederek, kablosuz sistem mühendisleri şebeke kurulmadan kapsama alanlarına ulaşabilmekte, kapasite genişleme ya da kapsama ihtiyacı olan yerleri tespit edebilmekte ve şebeke ve uygulama performans eğilimlerini planlayabilmektedir. Pazarlama amacıyla nüfus verileri aktararak şebeke trafik ve kaynak kullanım hesaplamaları yapılabilmekte, binalar düzeyindeki nüfus verileri ile ön kapsama eğrileri çakıştırılarak, şebeke tasarımı başlamadan önce beklenen şebeke karmaşıklığı ve gerekli sermaye harcamaları hakkında istatistik veriler elde edilebilmektedir. Bu tür rakamlar, gerçek dünya modellerinden elde edildikleri için iş geliştirme tekliflerinde kullanıldığında son derece etkili olabilir (Omogunloye vd., 2013). Beşinci nesil 5G kablosuz haberleşmenin konuşulduğu günümüzde, yeni 5G şebeke lisansları ile gelecek olan yeni taleplere göre Telekom operatörlerinin şebekelerini yeniden tasarlamaları gerekecektir. Bu gibi ihtiyaçlar için de en iyi yöntem CBS sistemi kullanmaktır. CBS ile yapılacak ön analizlerde müşteri verileri, saha verileri ve arazi mülkiyeti bilgileri alınır ve potansiyel anten ve kule konumları tespit edilir. Bu konfigürasyon daha sonra kulelerden yayımlanan kablosuz kapsama alanının simüle edilmesi ile test edilir. Bu da optimum sonuç verdiyse bu sefer alanda testler yapılarak nihayetinde gerçek kurulum aşamasına geçilir. Bu şekilde çok pahalı olan alan testi ihtiyaçlarını azaltacak şekilde tek bir kule için gerekli olan tekrar sayısı düşer. Yani CBS kullanımı planlama ve tasarım maliyetlerini düşürmüştür (Navmart, 2020).

CBS'nin haberleşme sistemlerinde kullanımı için ilk örnekte, Stojanovic, Djordjevic-Kajan, Petkovic ve Stoimenov (1997), "Development and quality control of the spatial database for telecom network management GIS" adlı makalelerinde Sırbistan'ın Niş kentinde bulunan kamuya ait PTT Sırbistan için geliştirilen GeoTT coğrafi bilgi sisteminin temelini oluşturan konumsal veritabanı geliştirme süreçlerini aktarmışlardır. Kablo hatlarının izlenmesi, analiz edilmesi ve devamlılığının sağlanması amacı ile geliştirilen sistem için öncelikle coğrafi bilgi için gerekli ve önemli bilgiler toplanmış, analiz edilmiş, dönüştürülmüş ve raster haritalar elde edilmiş, böylece raster harita veri tabanı oluşturulmuştur (Şekil 3). Sonrasında şebeke veri tabanının oluşturulması amacı ile şebekeyi oluşturan telefon santralleri, kablo segmentleri, kablo kanalları, bağlantılar, bağlantı kutuları, menholler, terminal blokları vb. coğrafi nesnelerin geometrik, topolojik ve tanımsal karakteristiklerine ilişkin tüm bilgilerin toplanması gerekmiştir. Eksik olan bilgiler yerinde inceleme ve GPS teknolojisi kullanılarak toplanmıştır. Vektör ve raster formatta coğrafi veriler üretilmiş ve hibrit bir GIS uygulaması geliştirilmiştir. Sonraki süreçte zaman içerisinde değişen ve evrilen şebekenin idamesinin ve geçmiş durumunun analiz edilmesinin sağlanması için bu konumsal veri tabanının zamansal yetenekler ile genişletilmesinin amaçlandığı, bunun gelecek Telekom şebeke geliştirmelerinin planlanması, simüle edilmesi ve tasarlanmasını sağlayacağı, böylece değişik alternatiflerin önemli özelliklerinin karşılaştırılmasına dayanan karar alma süreçlerini de destekleyeceği ifade edilmiştir.



Şekil 3. Değişik tipte Telekom şebeke ve ekipman bilgileri (Different types of Telecom network and equipment information) (Stojanovic vd., 1997)

Carolyn Fry (1999), "GIS in telecommunications" adlı çalışmada, son yıllarda Telekom pazarının çok fazla büyüdüğü, sektördeki firma sayısının çok arttığı veya tekelleşmenin kırıldığı, bunun da mevcut organizasyonlar üzerinde şebekelerini yeniden tasarlayarak ya da süreçlerini gözden geçirerek daha verimli hale gelmek konusunda baskı oluşturduğu, yatırım maliyetlerinin azaltılması ve müşteriye elde etmek ve elinde tutabilmek noktasında bu süreçte şirket içerisinde değişik birimlerde ayrıık şekilde, dağınık, bazen hatalı ve hatta güncelliğini yitirmiş halde bulunan harita, çizim ve raporlar gibi bilgi varlıklarının yönetimi konusunu yeniden düşünmeye başladıkları ve gelinen noktada CBS'nin Telekom pazarında standart bir teknoloji olduğu ifade edilmiştir (Şekil 4). Çalışmada, bazı ülkelerdeki operatörlerin CBS sistemi kullanımlarına örnekler verilmiş, tüm verinin standartlaştırıldığı, yapısal veri tabanlarında saklandığı ve farklı birimlerin kullandığı farklı sistemler ile arayüzlere sahip sistemlerin trend haline geleceği, bu değişim hızının ülkeden ülkeye değişebileceği belirtilmiştir.



Şekil 4. Sinyal girişim temelli, baz istasyonlarının konumlanmasında CBS kullanımı (Use of GIS for positioning base stations based on signal interference) (C Fry, 1999)

Her ne kadar CBS son yıllarda hızla gelişmekte ve çeşitli sektörlerde uygulanmakta olsa da telekomünikasyon gibi bilgi kaynakları yönetiminde CBS'nin uygulanmasının diğer alanlardaki uygulamaların çok gerisinde kaldığı da burada not düşülmesi gereken bir husustur. Buna rağmen CBS'nin haberleşme sistemleri için kullanımı konusunda

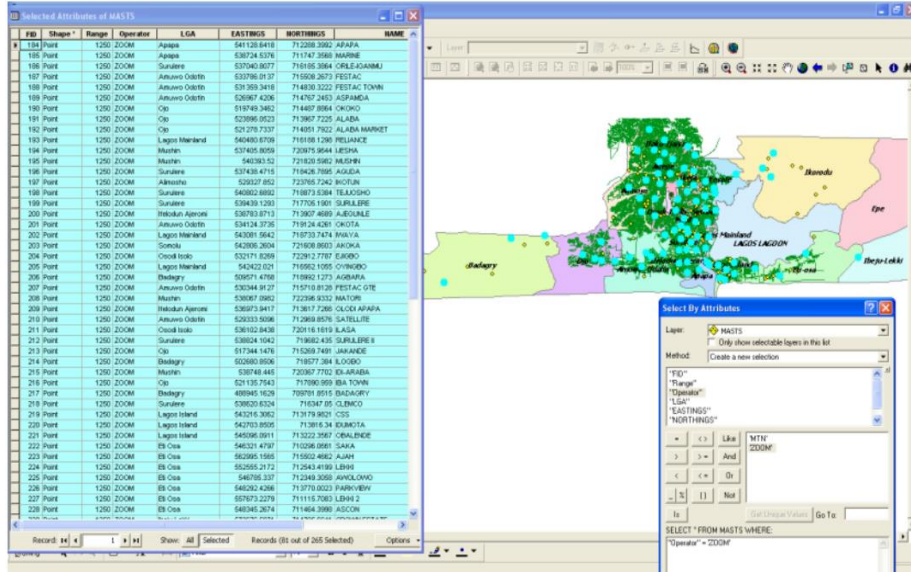
farklı çalışmalara da rastlanmaktadır. Shu vd. (2011) “Application of GIS in Telecommunication Information Resources Management” adlı makalelerinde Google Earth API kullanılarak haritada baz istasyonu gibi telekomünikasyon bilgi kaynaklarını işaretleme ve görüntüleme işlevi uygulamışlardır (Şekil 5). Bu tür uygulamaların, geliştirme zorluklarını ve maliyeti önemli ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5. Baz istasyonunun konumu ve bilgisi (Location and information of the base station) (Shu vd., 2011)

Literatürde, CBS'nin evrensel hizmet amacı ile verilecek hizmetlerin planlanması amacı ile kullanılmasına yönelik uygulamalara da rastlanmıştır. Khan ve Butt (2011), “GIS as a planning tool for the USF Co rural telecom and e-service project in Pakistan” adlı çalışmalarında, Pakistan Bilgi Teknolojiler Bakanlığının altında faaliyet gösteren evrensel hizmet vakfının, kırsal, uzakta veya küçük kırsal veya şehir bölgelerinde yaşayan ve haberleşme hizmeti alamayan veya az alan vatandaşlarına yönelik verilecek hizmetlerin planlanmasında, farklı operatörlerin kapsama alanlarını, demografik veriyi, mevcut altyapılara uzaklıkları ve sosyo-ekonomik ve gelişim faktörlerini CBS ve UA teknolojileri ile haritalayarak belirlediğini ifade etmiştir. Bu amaçla SUPARCO'dan alınan uydu verileri ile CBS katmanları kullanılarak ülke “hizmet alan”, “hizmet alamayan” ve “yetersiz hizmet alan” olarak üç kategoriye ayrılmış, Map Info V9, Arc GIS 9.x, Arc View 3.2 and Adobe Photoshop CS3 kullanılan çalışmada, değişik kaynaklardan topoğrafik haritalar, kılavuz haritalar, gelir yönetimi haritaları gibi raster verileri ve uydu görüntüleri toplanmış, tüm operatörlerin sabit ve hücresel haberleşme bilgileri alınmış, nüfus verileri toplanmış, “hizmet alan”, “hizmet alamayan” bölge sınırları tespit edilmiş, “hizmet alamayan” bölgelere düşen nüfus hesaplanmış ve bu verilere göre evrensel hizmet planlaması yapılmıştır. Çalışmada, CBS ve UA'nın kırsal Telekom ve e-hizmet projelerini daha başarılı hale getirdiği sonucuna varılmıştır.

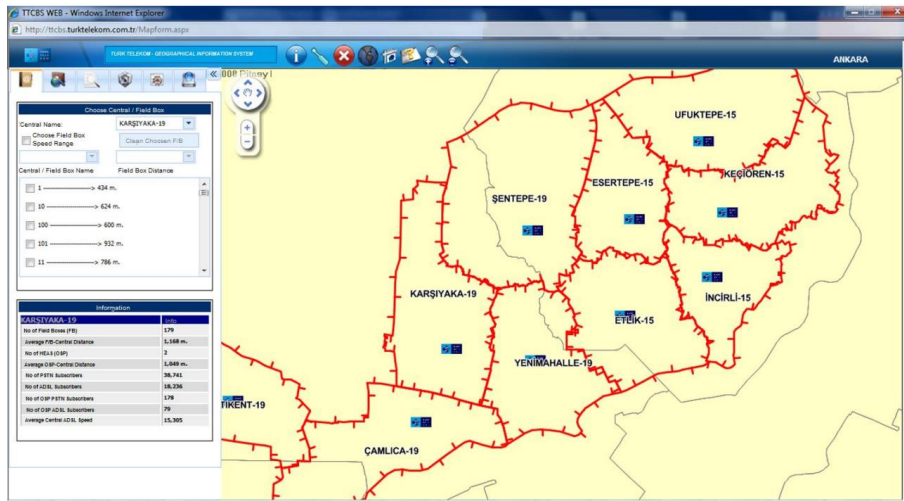
Omogunloye vd. (2013), “Analysis of Mast Management Distribution and Telecommunication Service Using Geospatial Technique” adlı çalışmada CBS sisteminin GSM telekomünikasyon sektöründe, özellikle şebeke planlaması ve yönetimi, karar ve operasyonel destek, pazarlama ve satış, müşteri hizmetleri ve katma değerli hizmetler alanlarında üretkenliği nasıl arttırabileceğinin göstermeyi amaçlamış (Şekil 6), proje sonucunda şebeke problemlerine müdahale süresinin geliştiği, yeni servis ve teknolojilerin kurulum ve desteğinin hızlandığı, müşteri ve şebeke davranışları konusundaki anlayışın geliştiği ve şebeke maliyetlerinin düştüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Query sonucu, mevcut kulelerin yerleri (Query result, locations of existing towers) (Omogunloye vd., 2013)

Geçmişte Telekom şirketleri kendi geliştirdikleri yazılımları kullanıyorlar ya da ihtiyaç duydukları bilgileri toplamak için sistemler satın alıyorlardı. Bu sistemler birbirleri ile çalışacak şekilde tasarlanmamışlardı. Firmalar, başka firmalar ile veri transferi yapmıyorlardı. Bugün ise farklı sistemlerin entegrasyonu, veri transferi, farklı operatörler tarafından kullanılan şebekelerin ortaklaştırılması gibi ihtiyaçlar nedeni ile CBS uygulamaları tüm Telekom operatörleri tarafından kullanılmaktadır (Navmart, 2020).

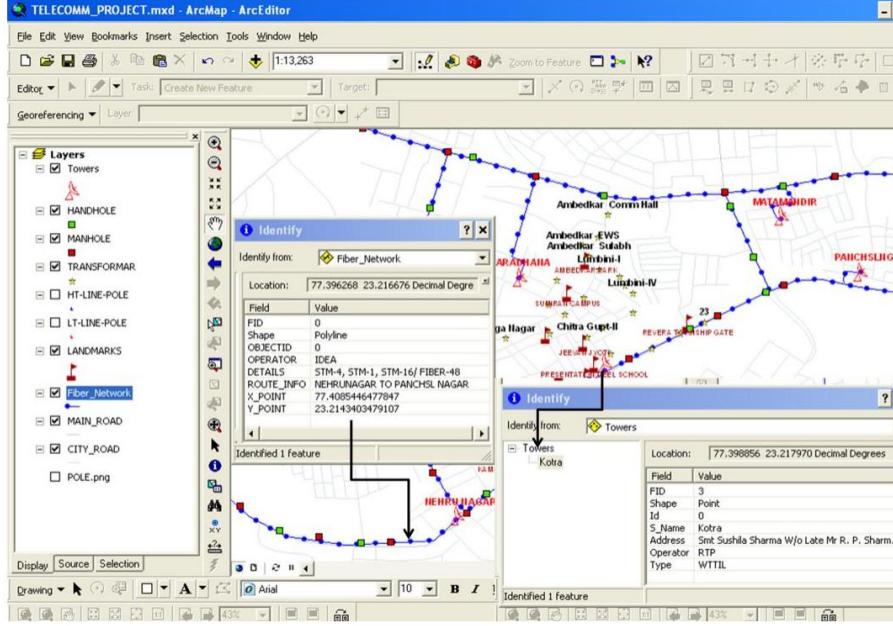
CBS'nin bir Telekom operatörü için kullanılmasına yönelik çalışmalardan biri ise ülkemizde Türk Telekom ile yapılan çalışmaları özetleyen Dabanlı (2010) tarafından yapılan "Developing A Spatial Decision Support System for Telecom Wireline Infrastructure of Ankara City" adlı çalışmadır. Burada Türk Telekom için kablo altyapılarının sayısallaştırılması, müşterilerin konum bilgilerinin izlenmesi ve bu bilgilerin paylaşımını, yatırımı da içeren bakım süreçleri gerektiren bölgelerin belirlenmesini içeren bir CBS sisteminin kurulması amaçlanmıştır (Şekil 7) Çalışmada MapInfo Pro 9.5 yazılımı kullanılmış, uygulamalar Orland Delphi v7 ve Visual Studio 2008 .NET Framework yazılımı ile geliştirilmiş, veri tabanı yönetimi için Oracle Spatial 10g sistemi seçilmiş ve 3^o UTM/GK projeksiyonu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, CBS'nin Türk Telekom altyapısında kullanılabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 7. ADSL Hız Analizleri (ADSL Speed Analysis) (Dabanlı, 2010)

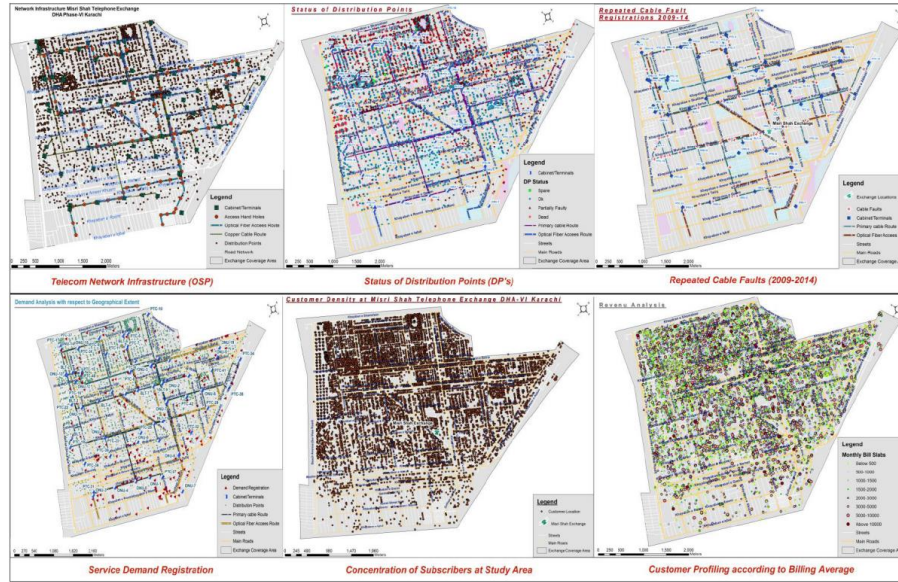
CBS'nin bir Telekom operatörü için kullanılmasına yönelik çalışmalardan bir diğeri Persai ve Katiyar (2013)'ün "GEO-Informatics and Infrastructure Management for Telecommunication Utilities" isimli makalesinde açıklanmaktadır. Burada yakın geçmişe kadar Telekom planları tarafından el yordamı ile üretilen ve kağıt ortamında tutulan veriler yerine, haberleşme hizmetlerinin planlanması ve karar destek süreçlerinin daha iyi hale

getirilmesi noktasında coğrafi olarak kodlanmış bilginin depolanması, geri çağırılması, işlenmesi ve görsel olarak sunulmasını sağlayan coğrafi veri tabanı oluşturulması ve idamesi amacıyla haberleşme sistemlerine yönelik coğrafi bilgi sisteminin gereksinimleri, hedefleri, çözümleri ve faydaları analiz edilmiş, kule, elektrik/telekom bağlantıları, fiber güzergahları, kablo kanallarına ilişkin veriler toplanmış, bu veriler ESRI ArcGIS 9.3 yazılımı ile CBS ortamına aktarılmış, Google haritaları da kullanılarak veri tabanları oluşturulmuş, çalışma sonucunda Telekom şebekelerinin yönetiminin CBS teknolojisi kullanılarak bütün yönetim aktivitelerinde yüksek performans, nitelik ve fayda ile yönetiminin net bir şekilde sunulduğu ifade edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Fiber şebeke ve kule konumları (Fiber network and tower locations) (Persai ve Katiyar, 2013)

İyi tasarlanmış CBS veri modelleri yalnızca standart CBS işlevlerini desteklemekle kalmaz, aynı zamanda Telekom ağını yetkin bir şekilde bağlantı noktası düzeyine kadar modelleyebilir. Harita üzerinde somutlaştırılan bu modeller, fiziksel Telekom ağının coğrafi bir temsili sağlar ve bunlar doğrudan müşteri iletişiminden, hizmet siparişinden, ağ planlamasından, mühendislikten ve diğer birçok işlevsel alandan çeşitli operasyonel ve iş işlevlerini destekler. Hussain, Kazmi ve Arsalan (2017)'in "Integration of Telecom Databases with Geodatabase Model for The Effective Telecom Network Management Through Geo-Informatics" adlı makalesinde, Pakistan'daki Telekom ağının etkin yönetimi için entegre bir coğrafi veri tabanı modeli verilmiş, pazar talepleri ve Telekom trendleri ile başa çıkabilmek için geleneksel planlama yaklaşımlarından uzun süreli stratejik şebeke planlama, şebeke yönetimi ve operasyon destek süreçlerine geçiş yapılmasının gerekliliği tespit edilmiştir.



Şekil 9. Telekom şebeke altyapısı, kablo arızaları, hizmet talepleri, dağıtım noktaları, müşteri yoğunluğu, müşteri getiri dağılım görünümüleri (Telecom network infrastructure, cable failures, service demands, distribution points, customer density, customer return distribution views) (Hussain vd., 2017)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada UA ve CBS'nin haberleşme sistemlerinde kullanımı üzerine bir araştırma yapılmıştır. Çok sayıda makale ve çeşitli yayınların gözden geçirilmesi ve bu konuda yapılmış olan çalışmaların incelenmesi sonucunda, literatürde haberleşme alanında UA ve CBS kullanım örneklerine rastlanılmış ancak Türkiye özelinde henüz geliştirilmeye açık ve yeni bir alan olduğu sonucuna varılmıştır. UA teknolojisi kullanılarak istasyonlarda sinyal yayma modelleri yapılabilmekte, optimum istasyon konumlandırılmalarının belirlenebilmesi, halihazırda bulunan baz istasyonlarının insan sağlığını etkileme düzeyinin saptanabilmesi ve bunların makine öğrenmesi vb. yöntemlerle otomasyon sistemlerinin kurulabilmesi mümkün olabilmektedir. CBS kullanılarak ise haberleşmede kullanılan altyapılar için en uygun yer analizi uygulamaları, istasyonlar arasındaki kule ağlarının konumuna yönelik analizler, kentsel genişleme alanlarının tespit edilerek ileriye dönük altyapı uygulamalarının tespiti, mevcut şebekelerin izlenmesi ve sorunlara anında müdahale, elektromanyetik dalgaların insan sağlığı üzerine olumsuz etkilerini en aza indirmek için uygun konumlandırma yapılabilmesi gibi pek çok destek hizmet sunulabilmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde yazarlar UA ve CBS'nin sayısız faydalarının ülkemizdeki mevcut haberleşme sektöründe de etkin bir şekilde kullanımına yönelik araştırmaların ve çalışmaların artırılması gerektiğini savunmaktadırlar. Bu sayede yüksek kaliteli hizmet sunma ve insan kaynaklarının daha optimize kullanılabilmesi ile hem zamandan hem de emekten fayda sağlanabilmesi mümkün olabilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu makale Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri A.B.D. bünyesinde yürütülen Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Stüdyosu IA. dersi kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar çalışma kapsamında emeği geçen sayın Prof. Dr. Saye Nihan Çabuk, Prof. Dr. Alper Çabuk ve Dr. Öğr. Üyesi Emrah Pekkan'a teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

Adegboyega, S. A.-A., Oyetunji, I. A., Olajuyigbe, A. E. ve Adesina, F. A., 2017. GIS-based site suitability and vulnerability assessment of telecommunication base transceiver station facilities in Ibadan metropolis, Nigeria. Applied Geomatics, 9(3), 205-217.

- Aggarwal, S., 2004. Principles of remote sensing. Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology, 23, 23-28.
- Başarsoft, 2021. Uzaktan Algılama. Erişim adresi: <https://www.basarsoft.com.tr/uzaktan-algilama/>).
- Bilgi, S., 2007. Fotogrametri ve uzaktan algılamada veri elde etme yöntemlerinin gelişimi ve kısa tarihçeleri. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi(96), 48-55.
- Couclelis, H., 1991. Requirements for planning-relevant GIS: a spatial perspective. Papers in regional science, 70(1), 9-19.
- Cracknell, A. P. ve Varotsos, C. A. (2007). Editorial and cover: Fifty years after the first artificial satellite: from sputnik 1 to envisat. In: Taylor & Francis.
- Çabuk, A., Karademirler, S. N., Uyguçgil, H. ve İnceoğlu, M., 2009. GIS and RS Based Location Determination for GSM Transmitters to Minimize the Negative Effects of Electromagnetic Pollution for Improving Quality of Urban Places. International Journal of Natural & Engineering Sciences, 3(3).
- Çömert, R., Bilget, Ö., Olcay, F., Aksoy, T., Şenöz, E. ve Çabuk, A., 2016. Geotasarımın tarihsel gelişimi ve coğrafi bilgi sistemleri ile ilişkisi. Doğu Coğrafya Dergisi, 21(35), 17-38.
- Dabanlı, A., 2010. Developing a spatial decision support system for telecom wireline infrastructure of Ankara city.
- Değerliyurt, M. ve Çabuk, S. N., 2015. McHarg'ın doğayla tasarımı ve geotasarım. The Journal of Academic Social Science Studies, 39, 293-306.
- Demetri, S., Zúñiga, M., Picco, G. P., Kuipers, F., Bruzzone, L. ve Telkamp, T. (2019). *Automated estimation of link quality for LoRa: A remote sensing approach*. Paper presented at the 2019 18th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN).
- Dennis Jr, S. F., 2006. Prospects for qualitative GIS at the intersection of youth development and participatory urban planning. Environment and Planning A, 38(11), 2039-2054.
- Fry, C., 1999. GIS in Telecommunications. Geographical information systems, 2, 819-826.
- Fry, C., 1999. GIS in telecommunications. In *Geographical Information Systems, Volume 2, Management Issues and Applications*: John Wiley & Sons, Inc.
- Geraghty, E. (Producer). (2016). Why Health is so Spatial. Erişim adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=3p70FICg9Ak>
- GISGeography, 2021. The Remarkable History of GIS. Erişim adresi: <https://gisgeography.com/history-of-gis/>).
- Gupta, A., 2012. Role of gis in telecommunications Erişim adresi: <https://www.slideshare.net/akhilgupta89/role-of-gis-in-telecommunications>).
- Hassan, M., Snunu, S. ve Shaweesh, M., 2003. Automatic Mobile Communications Network Planning Using Geographical Information System. Cartography, 32(2), 65-69.
- Heracleous, L., Yniguez, C. ve Gonzalez, S. A., 2019. Ambidexterity as historically embedded process: Evidence from NASA, 1958 to 2016. The Journal of Applied Behavioral Science, 55(2), 161-189.
- Hussain, A., Kazmi, J. H. ve Arsalan, M. H., 2017. Integration of Telecom Databases with Geodatabase Model for The Effective Telecom Network Management Through Geo-Informatics. Journal of Basic and Applied Sciences, 13, 272-280.
- Jia, P. ve Stein, A., 2017. Using remote sensing technology to measure environmental determinants of non-communicable diseases. International journal of epidemiology, 46(4), 1343-1344.
- Kainz, W., 2004. Geographic Information Science (GIS). Lecture Notes, Division of Cartography and Geoinformation, University of Vienna, Austria.
- Karimi, K. ve Motamed, N. (2003). *The tale of two cities: Urban planning of the city Isfahan in the past and present*. Paper presented at the 4th International Space Syntax Symposium.
- Kavzoğlu, T. ve Çölkesen, İ., 2011. Uzaktan algılama teknolojileri ve uygulama alanları.
- Kennedy, R. E., Townsend, P. A., Gross, J. E., Cohen, W. B., Bolstad, P., Wang, Y. ve Adams, P., 2009. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. Remote sensing of environment, 113(7), 1382-1396.
- Khan, S. ve Butt, U. F., 2011. GIS as a planning tool for the USF Co rural telecom and E-service project in Pakistan. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 19, 11-20.
- Last, J., 1998. A design for life: interpreting the art of Çatalhöyük. Journal of material culture, 3(3), 355-378.
- Liang, X. P. ve Liu, Q. (2014). *Research of Urban Planning and Design Based on 3D Visualization GIS*. Paper presented at the Applied Mechanics and Materials.
- McHarg, I. L., 1969. Design with nature: American Museum of Natural History New York.
- Muralikrishnan, S., Muralikrishna, I., Manjunath, A. ve Rao, K., 2007. Spatially integrated approach for terrain modelling and analysis for mobile communication applications. Geocarto International, 22(4), 297-307.
- Musa, A., 2007. The use of remote sensing and geographic information system (GIS) in executing terrain analysis for siting global system for mobile communication (GSM) transmitting masts. FUTY Journal of the Environment, 2(1), 63-71.
- Navmart, 2020. Using GIS in the telecom industry. Erişim adresi: <https://www.navmart.com/blog/gis-data-for-telecommunications/>).
- Omogunloye, O., Qaadri, J., Omogunloye, H. ve Oladiboye, O., 2013. Analysis of Mast Management Distribution and Telecommunication Service Using Geospatial Technique. IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and food Technology, 3(3), 58-75.
- Persai, P. ve Katiyar, S. K., 2013. Geo-informatics and infrastructure management for telecommunication utilities.
- Rumadi, R., Kamirul, K., Armin, F., Bissa, S. Y. C. ve Prasetya, S. (2020). *Quantification of Physical Blockage Based on Digital Surface Model (DSM) Dataset*. Paper presented at the 2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET).

- Shu, Z., Li, H., Liu, G., Xie, Q. ve Zeng, L. (2011). *Application of GIS in telecommunication information resources management system*. Paper presented at the 2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering.
- Sinha, A. K., Malik, Z., Rezgui, A., Barnes, C. G., Lin, K., Heiken, G., Thomas, W. A., Gundersen, L. C., Raskin, R. ve Jackson, I., 2010. Geoinformatics: transforming data to knowledge for geosciences. *GSA Today*, 20(12), 4-10.
- Stevens, D., Dragicevic, S. ve Rothley, K., 2007. iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 761-773.
- Stojanovic, D., Djordjevic-Kajan, S., Petkovic, M. ve Stoimenov, L., 1997. Development and Quality Control of the Spatial Database for Telecom Network Management GIS.
- Teke, M., Seyfioglu, M. S., Ağçal, A. ve Gürbüz, S. Z. (2014). *Optimal pansharpening of RASAT satellite imagery*. Paper presented at the 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU).
- Tobler, W. R., 1959. Automation and cartography. *Geographical Review*, 49(4), 526-534.
- Tomlinson, R., 1967. An introduction to the geo. information system of the Canada Land Inventory. Ottawa, Department of Forestry and Rural Development, ARDA.
- Tubitak Uzay, 2020a. BİLSAT. (11.04.2021). Erişim adresi: [https://uzay.tubitak.gov.tr/tr/uydu-uzay/bilsat#:~:text=SSTL%20\(Surrey%20Satellite%20Technology%20Limited,Eyl%C3%BCI%202003%20tarihinde%20y%C3%B6r%C3%BCn%20yerle%C5%9Ftirilmi%C5%9Ftir.\)](https://uzay.tubitak.gov.tr/tr/uydu-uzay/bilsat#:~:text=SSTL%20(Surrey%20Satellite%20Technology%20Limited,Eyl%C3%BCI%202003%20tarihinde%20y%C3%B6r%C3%BCn%20yerle%C5%9Ftirilmi%C5%9Ftir.)).
- Tubitak Uzay, 2020b. İMECE. (11.04.2021). Erişim adresi: <https://uzay.tubitak.gov.tr/tr/uydu-uzay/imece>).
- Tubitak Uzay, 2021. RASAT. (11.04.2021). Erişim adresi: <https://uzay.tubitak.gov.tr/tr/uydu-uzay/rasat>).
- Tusaş, 2021. GÖKTÜRK-1. (11.04.2021). Erişim adresi: <https://www.tusas.com/urun/gokturk-1>).
- Tubitak Uzay, 2020. GÖKTÜRK-2. Erişim adresi: <https://uzay.tubitak.gov.tr/tr/uydu-uzay/gokturk-2>).
- Uça Avcı, D., Uça Güneş, E. P. ve Çabuk, A., 2015. Uzaktan eğitim ile uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri eğitimlerinin verilmesine dair bir değerlendirme. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 53-68.
- Urisa, 2021. History. (11.04.2021). Erişim adresi: <https://www.urisa.org/about-us/history/>).
- Walsh, S. J., Butler, D. R. ve Malanson, G. P., 1998. An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. *Geomorphology*, 21(3-4), 183-205.
- Waters, N. (1998). Geographic Information Systems. In *Encyclopedia of Library and Information Science* (Vol. 63, pp. 98-125).
- White, J. C. ve Wulder, M. A., 2014. The Landsat observation record of Canada: 1972-2012. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39(6), 455-467.
- Xue, Y., Cracknell, A. ve Guo, H., 2002. Telegeoprocessing: The integration of remote sensing, geographic information system (GIS), global positioning system (GPS) and telecommunication. *International Journal of Remote Sensing*, 23(9), 1851-1893.
- Yomraloğlu, T., 2000. Coğrafi bilgi sistemleri: temel kavramlar ve uygulamalar. İstanbul: Akademi Kitapevi.