ISSN 1012-2354

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of the Institute of Science and Technology

Cilt (Vol.): 41 **Sayı (No): 1**

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ
Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology
ISSN: 1012-2354

Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Oktay ÖZKAN, Erciyes Üniversitesi

İmtiyaz Sahibi

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Baş Editör

Prof.Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

Editör

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr. Munise Didem DEMİRBAŞ, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörü

Dr. Arş. Gör. Hüseyin ÖZKAYA
Arş. Gör. Mehmet Uğur TÜRKDAMAR

Editörler Kurulu

Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK, Erciyes Üniversitesi, kbilisik@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES, Erciyes Üniversitesi, onses@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.edu.tr

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, msari@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, orhanb@omu.edu.tr

Prof. Dr. Hasan KÜÇÜKBAY, İnönü Üniversitesi, hasan.kucukbay@inonu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, akkurt@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East, tuncay.candan@aum.edu.kw

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, karaboga@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi, senel@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, dogani@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Burak UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, burak.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, nigmet.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Nuray ATEŞ, Erciyes Üniversitesi, nuraya@erciyes.edu.tr
Prof. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, mgokcek@ohu.edu.tr
Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU, Erciyes Üniversitesi, saracog@erciyes.edu.tr
Prof. Dr. Semih YILMAZ, Erciyes Üniversitesi, semihyilmaz@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Ömer AYDIN, Erciyes Üniversitesi, omeraydin@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Emrah TIRAŞ, Erciyes Üniversitesi, emrahtiras@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN, Erciyes Üniversitesi, ucaliskan@erciyes.edu.tr
Dr. Öğr. Üyesi Erhan KARAKAYA, Yozgat Bozok Üniversitesi, erhan.karakaya@bozok.edu.tr

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ
Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology
ISSN: 1012-2354

Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. TUNCAY CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJORGJİ, University of New York Tirana

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ
Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology
ISSN: 1012-2354

Cilt 41, Sayı 1, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Abdülkadir YAŞAR, Çukurova Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşe Dilek MADEN, Selçuk Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül İYİDOĞAN, Gaziantep Üniversitesi

Prof. Dr. Beşir ŞAHİN, Çukurova Üniversitesi

Prof. Dr. Canan Aksu CANBAY, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ, Konya Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ, Kayseri Üniversitesi

Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL, Akdeniz Üniversitesi

Prof. Dr. Gülden Gümüşburun AYALP, Hasan Kalyoncu Üniversitesi

Prof. Dr. Halis BİLGİL, Kayseri Üniversitesi

Prof. Dr. Hayri BABA, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim KOCABAŞ, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet DEMİR, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ, Ufuk Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KORKMAZ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KÖKÜM, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Metin AK, Pamukkale Üniversitesi

Prof. Dr. Murat KOÇ, Çağ Üniversitesi

Prof. Dr. Nihat AKGÜNEŞ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz ACAR, Kayseri Üniversitesi

Prof. Dr. Ömür GÖKKUŞ, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Selen Bilge KOÇAK, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Sema EKİCİ, Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi

Prof. Dr. Ulvi ULUSOY, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Tuncay YEŞİLKAYNAK, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. Abdullah Emre KELEŞ, Adana Alparslan Türkeş Üniversitesi

Doç. Dr. Adem YURTSEVER, Anadolu Üniversitesi

Doç. Dr. Alper AKAR, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Doç. Dr. Arzu Cılasun KUNDURACI, Yaşar Üniversitesi

Doç. Dr. Elmas SALAMCI, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Ertan KÖSEDAĞ, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih ŞAHİN, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih Doğan KOCA, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Fulya ZARALİ, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Hamdi MIHÇIOKUR, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan Bilgehan MAKİNECİ, Konya Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kamil ERKAN, Marmara Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN, İskenderun Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Melek Çöl AYVAZ, Ordu Üniversitesi

Doç. Dr. Melin ŞAHİN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muhammet Ali KARABULUT, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Doç. Dr. Öznur Begüm GÖKÇEK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Doç. Dr. Peyman MAHOUTİ, Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ulaş TEZEL, Boğaziçi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Abdülkadir BUDAK, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alper SOLMAZ, İskenderun Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Aynur DİKBAŞ, İstanbul Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Bekir Hüseyin TEKİN, Sakarya Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Cumhur AVŞAR, Sinop Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Çağlar SEVİM, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Demet Alıcı KARACA, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Erdinç ÖZ, Atatürk Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ADIGÜZEL, Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hale Akkocaoğlu ÇATMAKAŞ, Ostim Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Harun AKBULUT, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DUYSAK, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Korel İnanç DURMAZ, Gazi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet CANDAN, Anakara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Oğuz TAŞÇI, Atılım Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Musatafa ÜSTÜNER, Samsun Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sergen TÜMSE, Çukurova Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serkan TABAK, Aksaray Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman AKOCAK, Adıyaman Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tayyip ÖZCAN, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim OK, Atatürk Üniversitesi

Arş. Gör. Ökkeş Gökalp SÖKMEN, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Arş. Gör. Selim SOYLU, Aksaray Üniversitesi

Cilt: 41 Sayı: 1

Nisan 2025

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
1-19	Adsorbsiyon Uygulaması İçin Makine Öğrenmesi Destekli Web Tabanlı Yazılım Geliştirilerek Crystal Violet Boyası Giderimde Test Edilmesi	Araştırma Makalesi
20-42	Estimation on River Water Flow Rate Using Long Short-term Memory (LSTM) Neural Network and Adaptive Neuro-fuzzy Inference Systems (ANFIS)	Araştırma Makalesi
43-50	Yeni Tiyoüre Türevinin Sentezi, Karakterizasyonu, Termal Özellikleri ve Antibakteriyel Aktivitesi	Araştırma Makalesi
51-60	Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryaların Fiyat/Performans Analizleri: Alternatif Olarak Na-İyon Batarya Sistemleri	Araştırma Makalesi
61-74	Expression Variations of MBF-1, PKS and psbA Genes in Umbilicaria decussata Collected from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula) and the Southern Coast of Türkiye	Araştırma Makalesi
75-89	Geothermal Power Plant Design of Double-Flash Type using EES Numerical Analysis	Araştırma Makalesi
90-109	Aljinat/Sumak Mikroboncuklarından Metformin Salımı	Araştırma Makalesi
110-119	Çevre Kirliliği Artışının Azaltılması için Geri Dönüşüm Noktalarının Çok Boyutlu K-ortalamalar Algoritması ile Belirlenmesi	Araştırma Makalesi
120-132	Oil Spill Detection Using Sentinel-1 SAR Data	Araştırma Makalesi
133-142	İnşaat Anlaşmazlıklarının Önlenmesi ve Çözümünde Etkili Faktörler: Erken Aşamalarda ve Resmi Yargı Sürecindeki Rolü	Araştırma Makalesi
143-164	Tam Graflardan Türetilen Bazı Özel Grafların Wiener Tipinde Topolojik İndeksleri	Araştırma Makalesi
165-174	Design, Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulation Studies of Novel Pyridinecarboxamide Derivatives as Potent HDAC6 inhibitors	Araştırma Makalesi
175-189	Doğrusal Olmayan Sistem Durum Tahmini İçin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Tabanlı Yeni Bir Parçacık Filtresi	Araştırma Makalesi
190-206	Jeotermal Enerji ve Kalina Çevrim Tabanlı Entegre Sistemde Yeşil Hidrojen ve Amonyak, Tatlı Su ve Sıcak Su Üretiminin İncelenmesi	Araştırma Makalesi
207-216	Cost Effectiveness Analysis of Spare Parts Optimization for Fighter A/C	Araştırma Makalesi
217-228	Karbon-Aramid/Epoksi Reçine Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe ve Darbe Sonrası Davranış Mekanizmaları Üzerine Sayısal ve Deneysel Çalışma	Araştırma Makalesi
229-241	Metal İşleme Kaynaklı Yüksek Cr6+, Cu2+, Fe3+ Yüklü Atıksulardan Sülfidojenik Sabit Yataklı Biyofilmreaktörde Metal Gideriminin İncelenmesi	Araştırma Makalesi
242-253	Atıkların Transfer Öğrenme Yöntemi ile Sınıflandırılmasında Veri Artırımının Etkisi	Araştırma Makalesi
254-266	Optimization of Emulsification Parameters for Chasteberry (Vitex agnus-castus L.) Essential Oil Aqueous Nanoemulsions	Araştırma Makalesi
267-281	Galvanizli Çelik Boru Dirseklerinin Üretim Sürecine Bağlı Mekanik Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi	Araştırma Makalesi
282-317	Designing Climate-Responsive Learning Environments: Rethinking Educational Buildings Across Türkiye's Diverse Climatic Zones	Araştırma Makalesi
318-330	Empirical Mode Decomposition for Power Spectral Density Features in Radar-Based Fall Detection	Araştırma Makalesi
331-345	Linyit Sahalarının Çevresel Etkileri: Termik Santral Etkileri Üzerine Bir İnceleme	Araştırma Makalesi

346-369	Sürdürülebilir Kentsel Hareketliliğin İyileştirilmesi için Hibrit Bir Çerçeve: Paylaşımlı Bisiklet Sistemi İstasyon Yer Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme ve Maksimum Kapsama Probleminin Entegrasyonu	Araştırma Makalesi
370-383	Ölü Deniz Fay Zonu Yesemek Segmenti'nin Morfometrik Analiz Yöntemleriyle Araştırılması	Araştırma Makalesi

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Adsorbsiyon Uygulaması İçin Makine Öğrenmesi Destekli Web Tabanlı Yazılım Geliştirilerek Crystal Violet Boyası Giderimde Test Edilmesi

Alper SOLMAZ[1*], Efdal KAYA[2], Talip TURNA[3], Zeynel Abidin SARI[4], İbrahim UYANIK[5], Mesut KARTA[6], Ayşegül YÜCEL[7]

[1,7]İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, 31100, Hatay
[2*]İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 31100, Hatay
[3]Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, 21280, Diyarbakır
[4,6]İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 31100, Hatay
[5]Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri

(Alınış / Received: 25.06.2024, Kabul / Accepted: 24.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Adsorbsiyon,
Makine öğrenmesi,
Yazılım,
Aktif karbon,
Crystal Violet

Öz: Bu çalışmada R programlama dili içerisinde yer alan kütüphaneler kullanılarak makine öğrenmesi temelli bir web tabanlı yazılım geliştirilmiştir. Yazılım makine öğrenmesi algoritmalarından lineer regresyon analizine olanak tanırken aynı zamanda adsorbsiyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan Pseudo first order ve Pseudo second order kinetik modelleri ile Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modellerinin kullanımına izin vermektedir. Geliştirilen yazılımın ilk versiyonu olan Adsorb 1.0 içerisinde yazılımın testi için aktif karbon (AC) ile Crystal Violet (CV) boyasının sulu çözeltisinin kesikli adsorbsiyon testlerinin sonuçları kullanılmıştır. Ayrıca scanning electron microscope (SEM) ve energy dispersive X-ray (EDX) ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) analizleri yapılarak adsorbsiyon prosesi desteklenmiştir. Kesikli adsorbsiyon testlerinde başlangıç pH'ının (2-10) başlangıç boya derişiminin (5,0-1000 mg/L), değişken adsorbent miktarının (12,5-2000 mg), temas süresinin (0-60 dk) ve sıcaklığın (25, 35 ve 45 ^{0}C) etkisi araştırılmıştır. Geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçlara göre AC üzerine CV boyasının gideriminde en uygun kinetik ve izoterm modeller sırasıyla Pseudo second order (R^2:1) ve Langmuir (R^2:0,999) olduğu tespit edilmiş, ayrıca birim AC başına giderilen CV boyası miktarı ise 117,433mgCV/gAC olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan yazılım sayesinde MS-Excel ve benzeri uygulamaların kullanımın sırasında birbirine bağlı köprüler ve karmaşık formülasyonlar sebebiyle olabilecek hatalar ortadan kaldırılmış olunacaktır. Adsorb 1.0 yazılımına "https://iste.shinyapps.io/Adsorb/" adresinden üzerinden erişilebilmektedir.

Developing Machine Learning Supported Web-Based Software for Adsorption Application and Testing it in Crystal Violet Dye Removal

Keywords
Adsorption,
Machine learning,
Software,
Activated carbon,

Abstract: In this study, a web-based software based on machine learning was developed using libraries in the R programming language. While the software allows linear regression analysis from machine learning algorithms, it also allows the use of Pseudo first order and Pseudo second order kinetic models and Freundlich,

Crystal Violet

Langmuir and Temkin isotherm models, which are frequently used in adsorption applications. In Adsorb 1.0, the first version of the developed software, the results of batch adsorption tests of activated carbon (AC) and aqueous solution of Crystal Violet (CV) dye were used to test the software. Additionally, the adsorption process was supported by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray (EDX) and Fourier Transform Infrared (FTIR) analyses. In batch adsorption tests, initial pH (2-10), initial dye concentration (5.0-1000 mg/L), variable adsorbent amount (12.5-2000 mg), contact time (0-60 min) and temperature (25, 35 and 45 ^{0}C) effects were investigated. According to the results obtained from the developed software, the most suitable kinetic and isotherm models for the removal of CV dye on AC were determined to be Pseudo second order (R^2:1) and Langmuir (R^2:0.999), respectively, and the amount of CV dye removed per unit AC was calculated as 117.433mgCV/gAC. Thanks to the software created within the scope of this study, errors that may occur due to interconnected hyperlinks and complex formulations during the use of MS-Excel and similar applications will be eliminated. Adsorb 1.0 software can be accessed at "https://iste.shinyapps.io/Adsorb/".

*İlgili Yazar, email: alper.solmaz@iste.edu.tr

1. Giriş

Tarihsel olarak endüstri toplumunun ilerleme göstermesine müteakip üretimden kaynaklanan organik atıksular, sucul ekosistemde birçok çevre sorununa neden olmuştur [1]. Dünya genelinde su ekosistemleri üzerinde birçok tehdit varlığını kabul eden uluslararası toplum, bunların korunmasını ve muhafaza edilmesini amaçlayan özel politika hedefleri belirlemiştir [2]. Birleşmiş Milletler (BM) tarağından belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri incelendiğinde 6 ve 14 numaralı hedefler kapsamında su kıtlığı ile mücadele ve sucul ekosistemin mutkal suretle korunması hedeflenmektedir [3,4]. Belirlenen bu hedefleri sekteye uğratan en önemli kirleticilerin başında gelen boyalar günümüzde en yaygın çevresel kirleticilerden biridir. Susul ekosistemdeki boya kirleticilerinin varlığı sadece sudaki yaşamı değil, bunun yanında mutajenik ve kanserojen özellikleri nedeniyle insan sağlığını da olumsuz yönde etkilemektedir [5]. Endüstriyel olarak farklı sektörlerde yaklaşık 100.000 farklı türde sentetik boya ve pigment kullanılmakta ve yılda yaklaşık olarak 700.000 ton boya tüketilmektedir. Bu boyaların içerisindeki en önemli grup, bir, iki veya üç azo bağının (R_1–N=N–R_2) varlığıyla karakterize edilen ve tüm sentetik boyaların %60-70'ini oluşturan azo boyalardır [6]. Kullanılan sentetik boyaların yaklaşık %10 ile 15'i çevreye direkt deşarj edilerek ciddi oranda su kirliliğini artırmaktadır [7,8]. Sentetik organik boyaların dünya genelinde büyük ölçekli üretimi ve yaygın uygulama alanları olmasından dolayı ekosistemin değişik bölgelerinde bulunmaktadırlar. Özellikle sucul ekosistemlerde boya bileşiklerinin doğrudan ve dolaylı birçok kaynağı vardır. En önemli ve çok büyük miktarlarda su tüketen ve atıksu oluşturan sektörler, tekstil, tabakhane ve kâğıt üretim sektörleridir [9,10]. Çeşitli endüstrilerden kaynaklanan boya atıksularının açık deşarjı nedeniyle hem çevre hem de insan sağlığı zarar görmektedir. Bu nedenle boya içeren atıksu, çevre dostu arıtma teknolojilerin kullanılması ile uzaklaştırılmalıdır [11].

Katyonik trifenilmetan grubunun da yer alan CV boyası çok yoğun bir şekilde suya renk verir fakat bunun yanında anormal metafaz birikmesi ile mitotik zehirlenmelere sebep olur [12]. Bu boyalar sucul ekosistemin estetik kalitesini önemli ölçüde kötüleştirerek, oksijenin çözünürlüğünü ve suyun berraklığını azaltır. Ayrıca, fotosentez ve bitki büyümesinin dengesini bozar. Besin zincirine girerek, dirençlilik ve biyomagnifikasyon yolu ile [13] sucul ekosistemdeki canlılarda toksisiteyi, mutajeniteyi ve kanserojenliği artırır [14]. Sucul ekosistemde yaşayan türlerin büyümesinde ve gelişmesinde olumsuz rol oynayarak ekolojik dengesizliğe neden olur [15].

Çevreye son derece zararlı bu atıksuları arıtmak için çeşitli yöntemler üzerinde çalışılmaktadır [16]. Kimyasal, fiziksel ve biyolojik temellere dayanan farklı arıtma teknolojileri ile çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bunlar membran filtrasyon [17], elektrokimyasal yöntemler [18], UV-bozunum [19], biyolojik arıtma sistemleri [20], iyon değişimi [21], MBR (membran biyoreaktör) ve PMR (fotokatalitik membran reaktörü [22], koagulasyon-flokülasyon [23], nanopartikül [24] ve adsorbsiyon [25] gibi proseslerdir. Son yılarda adsorpsiyon prosesi basit ve anlaşılır olması, ölçeğinin büyütülmesi kolay olması ve eser miktardaki su kirleticilerinin giderilmesinde etkili olması nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmektedir [26]

Adsorbsiyon prosesini detaylı olarak incelediğimizde süreç hakkında bize en önemli bilgiyi kinetik ve izotermler vermektedir. Adsorpsiyon izotermleri, yüzey alanı, gözenek boyutu dağılımı ve kirletici-adsorbent etkileşimlerinin gücü dahil olmak üzere adsorban malzemenin doğası hakkında bilgiler verir [27]. Sürecin optimizasyonunda bu bilgiler oldukça önemlidir. Kirletici ile adsorbent malzeme arasında bulunan bu karmaşık ilişkinin net ifade

edilmesi için kinetik ve izoterm modellerin tespitinde günümüzde pek çok araştırmacı MS-Excel programından faydalanmaktadır. Ancak bu işlem araştırmacının iş yükünü artırmakla birlikte insan faktörü sebebiyle hata olasılığını yükseltmektedir. Birçok araştırmacı tarafından kullanılan kinetik ve izoterm kavramlarını WOS taramasında "adsorption activated carbon kinetics isotherm" olarak tarattığımızda 10.686 adet sonuç bulunmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda araştırmacıların yükünü azaltmak adına yeni bir program geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, AC ile CV boyasının sentetik atıksu ortamından uzaklaştırılmış ve elde edilen veriler ile literatürde sıklıkla kullanılan adsorpsiyon izotermleri için makine öğrenmesi yardımıyla web tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir. Ayrıca Excel ortamında karmaşık kullanım ve olası hataları ortadan kaldırmak için bu çalışma ile açık kaynak kodlu bir yazılım dili olan R ile WEB tabanlı bir uygulama geliştirilerek yapılan deneyler makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilmiştir. Ayrıca ham ve CV yüklü AC'nin SEM-EDX ve FTIR analizleri yapılarak adsorbsiyon olayı desteklenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan kimyasal maddeler

Laboratuvar çalışmalarında aktif karbon (C, 12,01 g/mol, Merck-05105), CV ($C_{25}H_{30}ClN_3$, 407.99 g/mol, ≥ 90.0%, Merck), sülfürik asit ($H_2(SO4)_3$, 98.08 g/mol, ≥ 99.99 %, Merck) ve pelet sodyum hidroksit (NaOH, 40.00 g/mol, ≥99.0%, Sigma-Aldrich), kullanılmıştır.

2.2. Kesikli adsorpsiyon testleri

Adsorbsiyon testlerinde CV boyasının stok çözeltisi (1000 mg/L) hazırlanmıştır. Çeşitli seyreltmeler yapılarak UV-Vis spektrofotometrede (Hach DR6000, Germany) 586 nm'de kalibrasyon eğrisi oluşturulmuş ve y:0,1871+0,0054 (R^2:0,9993) denklemi elde edilmiştir [28]. Adsorbsiyon testleri 200 rpm'de orbital karıştırıcıda (Heidolp, Unimax1010, Germany) gerçekleştirilmiştir. Deney bitiminde üst faz sıvısı 4500 rpm hızında santrifüj edilmiş ve spektrofotometrede belirtilen nm'de absorbansı ölçülüp elde edilen denklem kullanılarak derişim elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında elde edilen sayısal değerlerin yorumlanması için 1 ve 2 numaralı denklemlerden faydalanılmıştır.

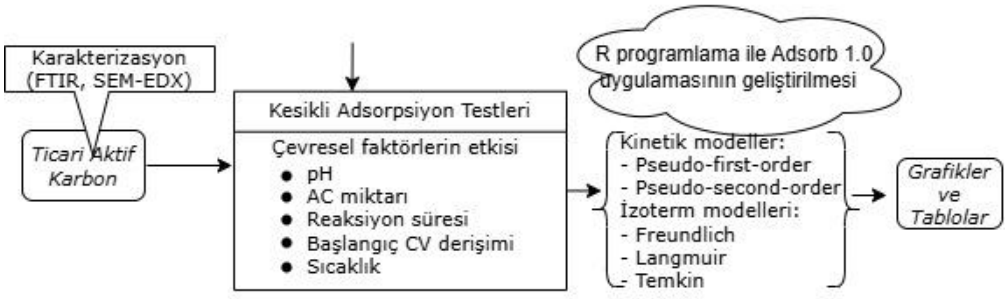
$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada R terimi % olarak giderim verimini ifade ederken C_0 ve C_e terimleri sırasıyla CV'nin başlangıç ve denge halindeki derişimini (mg/L) ifade etmektedir.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (2)$$

Burada q_e terimi denge durumunda birim adsorban başına giderilen CV miktarını (mg/g), m terimi adsorbent miktarını (g) ve V terimi ise çözeltinin toplam hacmini (L) temsil eder.

Deneysel yöntem Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi.

2.2.1. Kesikli adsorbsiyon testleri

2.2.1.1. pH'ın etkisi

Başlangıç pH'ının giderim verimine etkisini belirleyebilmek için 200 rpm'de oda sıcaklığında 24 saat süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Başlangıç CV derişimi 50 mg/L, çözelti hacmi 1 L ve AC miktarı 0,2 g olarak başlanan

deneylerde pH 2-10 arasında değişken pH'lar çalışılmıştır. Süre sonunda üst faz suyunda final CV derişimleri ölçülmüş ve optimum pH bulunmuştur.

2.2.1.2. Adsorbent miktarının etkisi

Aynı çevresel şartlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. pH değeri 7, başlangıç CV derişimi 50 mg/L olan 1 L'lik hacimli çözeltilere 0,0125 g ile 2,0 g aralığında değişken miktarlarda AC eklenmiş ve süre sonunda CV boya derişimleri ölçülerek optimum adsorbent miktarı bulunmuştur.

2.2.1.3. Başlangıç boya derişiminin etkisi

Yine aynı çevresel şartlarda gerçekleştirilen deneylerde pH 7,0, başlangıç AC miktarı 1,0 g ve 1 L'lik çözeltide başlangıç boya derişimi 5-1000 mg/L aralığında denemeler yapılmış, süre sonunda çıkış boya derişimleri ölçülerek optimum başlangıç boya derişimi bulunmuştur.

2.2.1.4. Temas süresinin etkisi

pH değeri 7, başlangıç AC miktarı 0,75 g ve başlangıç CV derişimi 50 mg/L olan 1 L hacimli çözeltide yapılan deneylerde 0-60 dk aralığında çeşitli zaman aralıklarında numuneler alınarak çıkış derişimleri ölçülmüştür.

2.2.1.5. Sıcaklığın etkisi

pH değeri 7, başlangıç AC miktarı 0,75 g ve başlangıç CV derişimi 50 mg/L olan 1 L hacimli çözeltilerde 3 farklı sıcaklıkta (25, 35 ve 45 ^{0}C) ve 0-60 dk aralığında belirli sürelerde numuneler alınarak çıkış derişimleri ölçülmüştür.

2.2.2. Adsorpsiyon kinetik ve izotermleri

CV boyasının AC üzerine adsorpsiyonunun kinetik açıdan değerlendirilebilmesi için pH 7,0'da başlangıç CV derişimi 50 mg/L ve AC miktarı 0,75 g olacak şekilde yapılan deneyde belirli sürelerde numuneler alınarak CV derişimleri ölçülmüştür. Kesikli adsorbsiyon deneyleri sonucunda elde edilen sayısal değerlerin yorumlanabilmesi için Pseudo first order ve Pseudo-second-order çeşitli kinetik modellerden yararlanılmıştır.

Yine CV boyasının AC üzerine adsorpsiyonunun izoterm açıdan değerlendirilebilmesi 1 L'lik hacimlerde pH 7,0'de başlangıç AC miktarının 1,0 g olduğu deneylerde farklı başlangıç CV derişimlerinde (5-1000 mg/L) denemeler yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinde elde edilen verilerin yorumlanabilmesi için Freundlich, Langmuir ve Temkin modelleri kullanılmıştır. Yararlanılan denklemler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Kinetik ve izoterm modelleri

	Model	Non linear form	Linear form	Referanslar
Kinetik modeller	Pseudo first order	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$	[29]
	Pseudo second order	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	[30]
İzoterm modelleri	Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$\log(q_e) = \log(k_F) + {}^1/_n \log(C_e)$	[31,32]
	Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$ $R_L = \frac{1}{1 + a_L C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} k_L} + \frac{C_e}{q_{max}}$	[33,34]
	Temkin	$q_e = B ln(A_T C_e)\ B = \frac{RT}{b_T}$	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(k_T) + \frac{RT}{b_T} \ln(C_e)$	[34,35]

Tabloda Pseudo first order kinetik modelinde q_e ve q_t terimleri denge ve herhangi bir t anında çözeltideki birim AC başına tüketilen CV miktarını (mg/g), C_e terimi çözeltide kalan CV derişimini (mg/L), K1 Pseudo first order reaksiyon sabitini temsil eder (1/min). Pseudo-second-order kinetik modelinde adı geçen K_2 terimi modelin reaksiyon sabitini ifade etmektedir (1/min). Freundlich izoterm modelinde adı geçen K_F ve n ise model sabitleridir. Langmuir izoterm modelinde adı geçen R_L terimi dispersiyon sabiti, K_L ve a_L terimleri model sabitleridir. Temkin izoterm modelinde adı geçen B terimi (J/mol) model sabitini, R terimi (8.314 j/mol.K) üniversal gaz sabitini, T ise (K) sıcaklığı temsil eder.

2.2.3. Web tabanlı yazılım

Çalışma kapsamında üretilen yazılımın ilk versiyonu Adsorb 1.0 olarak isimlendirilmiştir. Yazılımın arayüzü İngilizce olarak tasarlanmış olup, R programlama dili içerisindeki kütüphaneler kullanılmıştır. R Programlama dilinin esnek yapısı, içerisinde 10000'in üzerinde kütüphane bulundurması, öğrenilmesi kolay bir dil olması gibi özellikleri nedeniyle birçok bilimsel araştırma projesi için WEB tabanlı uygulama geliştirilebilmesine olanak sağlamaktadır [36,37].

Adsorb 1.0 yazılımının tasarımı sırasında dashboard yapısı benimsenmiştir. Bu yapıda menüler genelde sol tarafta yer alırken, üst kısımda açıklayıcı bilgiler ve ortada ise işlemlerin yapıldığı, yönetildiği alan bulunmaktadır. R programlama dili ile WEB tabanlı uygulama geliştirmek için çok fazla kütüphane bulunmaktadır. Bu kütüphanelerden bazılarına shiny, shinydashboard, shinydashboardplus, bs4Dash, argonDash, tablerDash örnek olarak verilebilir. Proje içerisinde kullanıcıların gördüğü arayüz için bir ui.R dosyası oluşturmuştur. Bu dosya içerisine kullanıcıların kolay bir şekilde işlemlerini yapabilmesi için menüler, butonlar, çıktı alanları gibi özellikler eklenmiştir. ui.R dosyası içerisinde toplam 849 satırlık kod yazılmıştır. Arka planda görünen arayüz içerisinde kullanılacak formüller, hesaplamalar için bir server.R dosyası oluşturulmuştur. Programa interaktiflik kazandırılabilmesi için kullanılan denklemlerin formülleri bu dosya içerisinde kodlanmıştır. server.R dosyası içerisinde toplam 1198 satırlık kod yazılmıştır. Yazılım içerisinde kullanılacak olan kütüphaneler ve küresel değişkenler için global.R dosyası oluşturulmuştur. Bu dosya içerisinde toplam 14 satırlık kod bulunmaktadır. Yazılım içerisinde 6 ana menü tasarımı yapılmıştır. Analysis sayfası içerisinde 7 adet alt sayfa oluşturulmuştur. Machine Learning sayfası içerisinde de 1 adet alt menüye ait sayfa oluşturulmuştur. Bu sayfalar;

- Home
- Analysis
    - Effect of pH
    - Effect of Adsorbent Amount
    - Effect of Initial Concentration
    - Effect of Time
    - Effect of Temperature
    - Isotherm Compute
    - Kinetic Compute
- Machine Learning
    - Lineer Regresyon
- About Us
- Project
- Help

Home sayfasında proje'de kullanılan denklem sayıları, araştırmacı sayısı gibi bilgiler yer almaktadır. Effect of pH sayfasında, pH değerinin deneylerde ki etkisi ölçülmektedir. Effect of Adsorbent Amount, adsorban miktarının deneylerde ki etkisi ölçülmektedir. Effect of Initial Concentration, başlangıç konsantrasyonunun deneylerde ki etkisi ölçülmektedir. Effect of Time, zamanla deneylerde ki değişimler izlenmektedir. Effect of Temperature, sıcaklığın deneylerde ki etkisi ölçülmektedir.

Isotherm Compute, izoterm denklemleri hesaplandıktan sonra sonuçlar aynı grafik üzerinde görselleştirilebilmektedir. Kullanıcılara izoterm denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Kinetic Compute, kinetik denklemleri hesaplandıktan sonra sonuçlar aynı grafik üzerinde görselleştirilebilmektedir. Kullanıcılara kinetik denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Lineer Regresyon, bu sayfada kullanıcılar verilerini yükledikten sonra regresyon analizi yapabilmektedir. Regresyon analizi sonuçları grafiklerle desteklenmiştir. Bu grafikler yardımıyla regresyon analizi sonuçlarını yorumlayabilmektedir.

About us sayfasında projede yer alan bilim insanları hakkında bilgiler verilmektedir. Project sayfasında, proje hakkında bilgiler verilmektedir. Help sayfasında, yazılımın nasıl kullanılacağı hakkında bilgiler yer almaktadır.

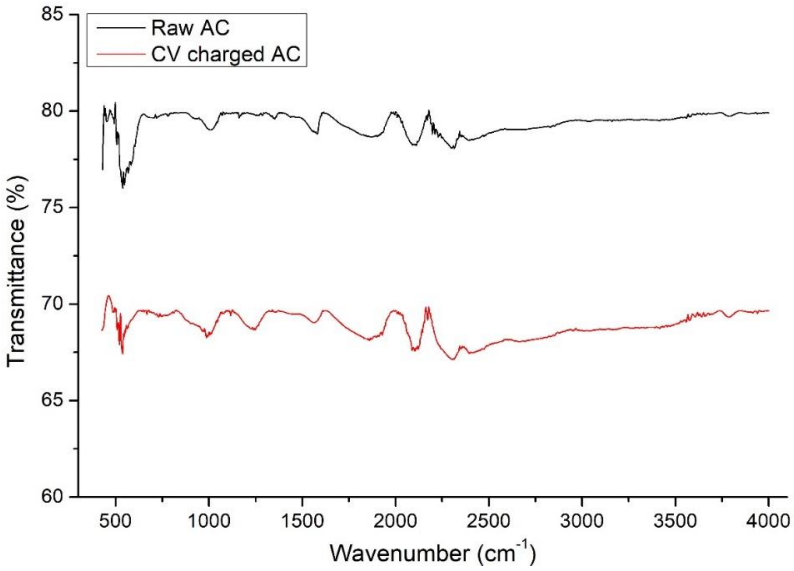
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Ham ve CV yüklü AC'nin karakterizasyonu

3.1.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR)

FTIR, tekli ve karma sistemlerde malzemeler ve kirleticilerin yüzeyindeki fonksiyonel gruplar arasındaki olası bağlanma etkileşimlerini açıklamak için kullanılmaktadır. 4000–400 cm^{-1} aralığındaki adsorbsiyon öncesi ve sonrası AC'nin FTIR spektrumu Şekil 2'de gösterilmiştir. 1645 ve 1524 cm^{-1}'deki pikler, C=O gerilme titreşimi

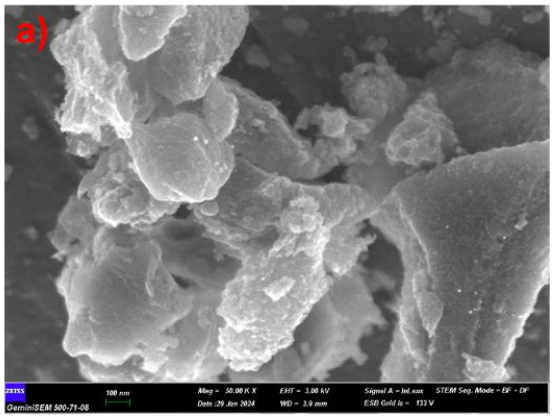
bantlarına ve amidin N-H bağının titreşen bandına veya C-N oluşumuna karşılık gelmektedir [38]. 1365 ve 1050 cm^{-1}'de meydana gelen pikler, karboksil ve P-OH gruplarının gerilme titreşimlerine atfedilmiştir. 1560 cm^{-1} bandında gözlenen pik ise C=C bağ yapısını işaret etmektedir. Ayrıca 821 cm^{-1}'deki zirvenin aromatik –CH'nin gerilmesini temsil ettiği belirlemiştir [39].

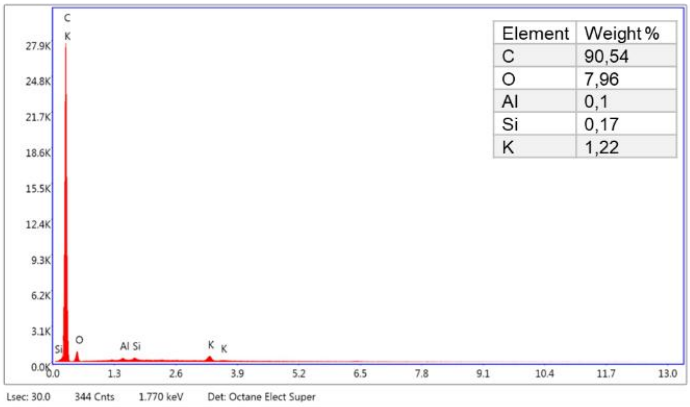


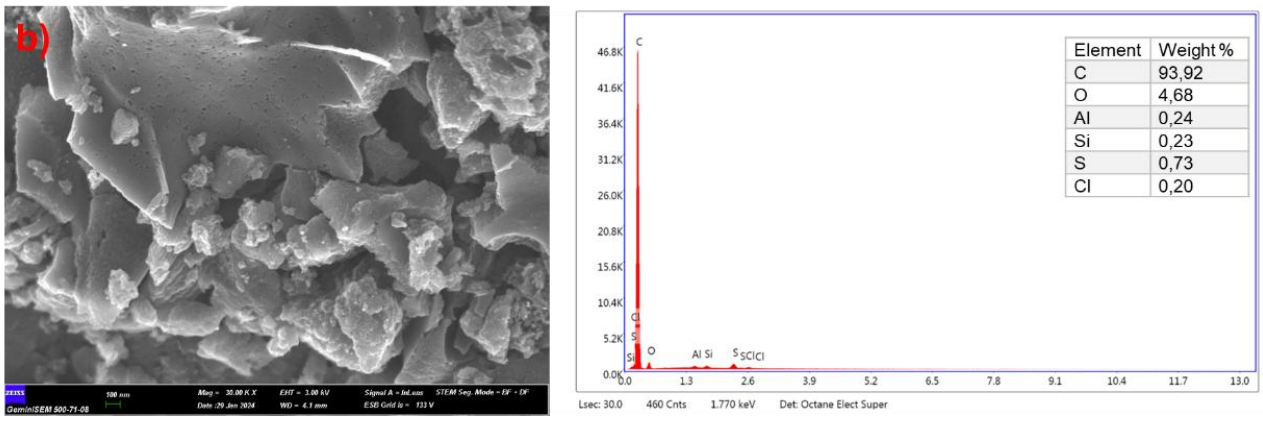
Şekil 2. Adsorbsiyon öncesi ve sonrası AC'nin FTIR spektrumu.

3.1.2. Scanning electron microscope (SEM) ve Energy dispersive X-ray (EDX)

Şekil 2'deki SEM görüntüleri, AC'nin adsorpsiyon öncesi ve sonrasında serbest tanelerin morfolojisini ortaya çıkarmaktadır. Şekil 3(a), hemen hemen pürüzsüz bir yüzeye sahip olan AC numunesini göstermektedir. Şekil 3(b)'deki fotoğraf ise, CV yüklü yüzey yapısına sahip AC fotoğrafına kıyasla tahrip olmuş ve dolu gözeneklerin olduğunu ifade etmektedir. Mikro fotoğrafların EDS analiz sonuçları karşılaştırıldığında ise CV bileşiminde bulunan C ve CI gibi elementlerden dolayı adsorpsiyon sonrası bileşimde bu iki elementin pik yoğunluğunun ve kütlece bileşiminin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca sadece AC yapısında CI elementine rastlanmazken, CV yüklü AC'nin bileşimde minör pikler halinde göründüğü saptanmıştır.





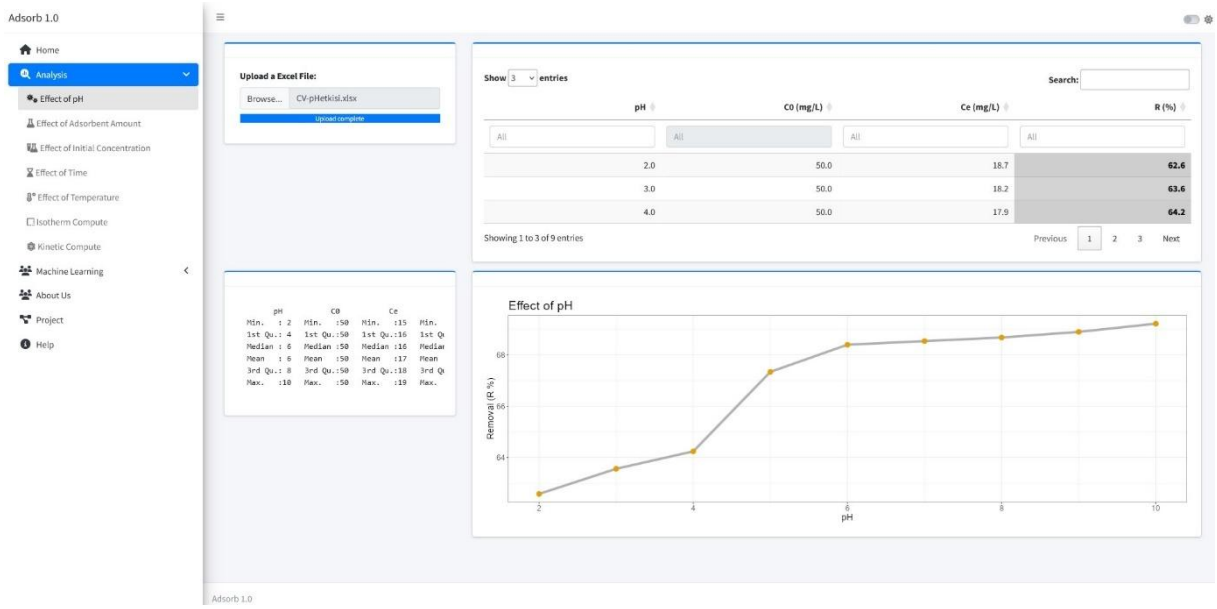


Şekil 3. Adsorbsiyon öncesi (a) ve sonrası (b) AC'nin SEM-EDS görüntüleri.

3.2. Adsorpsiyon çalışmaları

3.2.1 Başlangıç pH'ının Etkisi

pH'ın giderimi verimi üzerine etkisini belirlemek için yapılan çalışmalarında elde edilen sonuçlar Adsorb 1.0 yazılımına yüklenmiş ve elde edilen grafik Şekil 4'te sunulmuştur.

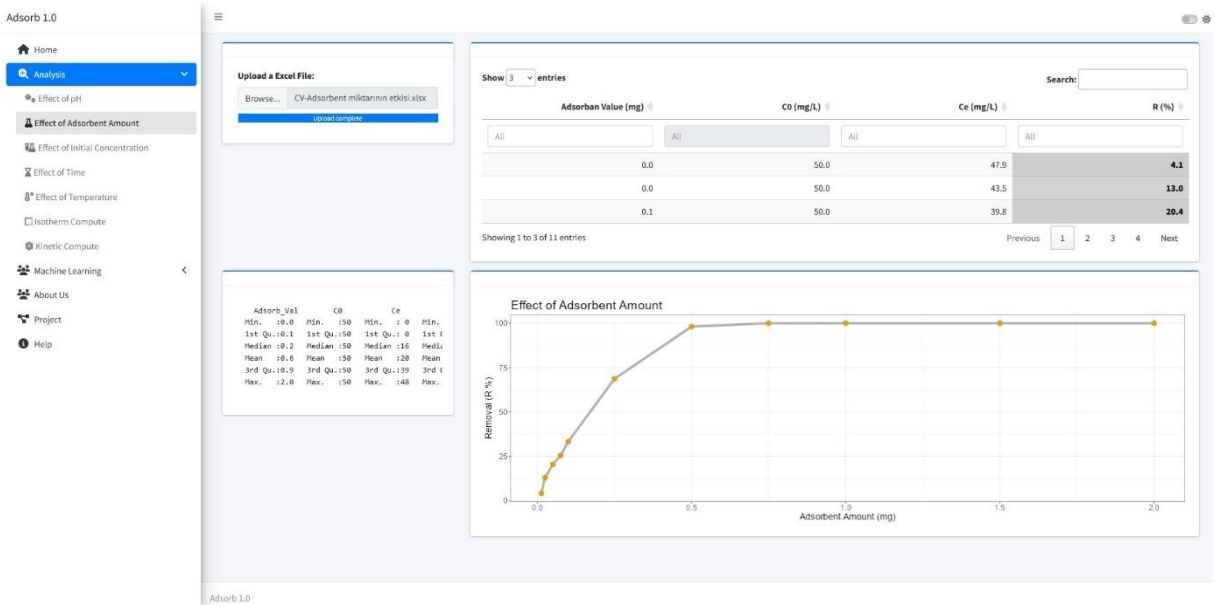


Şekil 4. Başlangıç pH değerinin CV boyası giderim verimine etkisi.

CV boyasında değişken pH'larda yapılan deneysel çalışmalar incelenecek olursa pH 2'de denge durumunda çözeltide kalan CV derişimi 18,71 mg/L olarak tespit edilmiş olup giderim verimi ise %62,58 olarak hesaplanmıştır. pH 4, 6, 8 ve 10 değerlerinde ise sırasıyla %64,24, 68,4, 68,68 ve 69,22 olarak hesaplanmıştır. pH'ın artması ile birlikte denge şartlarında çözeltide kalan boya derişiminde düşüş gözlemlenmiş olup bu değerlerden elde edilen giderim verimleri dikkate alındığında pH değeri arttıkça boya giderim veriminin arttığı açıkça ortadadır. Benzer çalışmalar da CV boyası giderimi yüksek pH'larda gerçekleşmiştir [40]. Ayrıca kümes hayvanları atıklarından elde edilen AC ile CV boyasının gideriminin yapıldığı çalışmada pH değerinin artması ile verimin arttığı tespit edilmiştir [41].

3.2.2. Adsorbent Miktarının Etkisi

AC miktarının giderimi verimi üzerine etkisini belirleyebilmek için yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Adsorb 1.0 yazılımına yüklenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur.

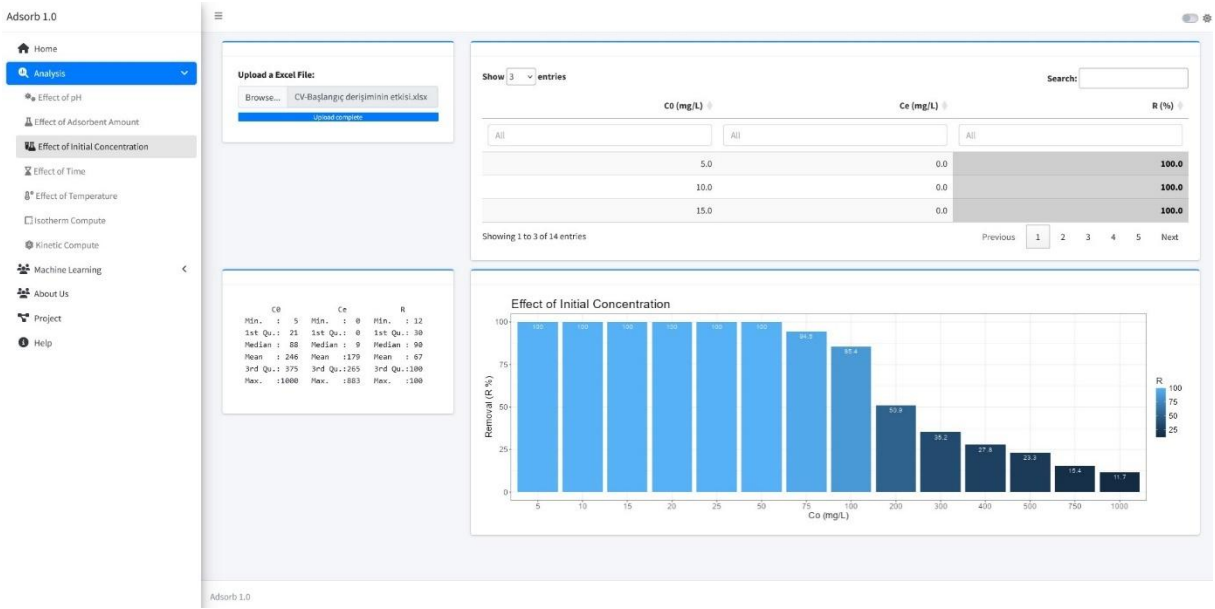


Şekil 5. Değişken adsorbent miktarının MB boyası giderimine etkisi.

50 mg/L sabit derişim sahip CV boyası üzerine litre başına 0,0125-2,000 g AC eklenerek deneyler yapılmıştır. 1 g/L ve üzeri AC derişimlerinde denge şartlarında çözeltide boya ölçülememiştir. AC derişi 0,75 g/L'ye düştüğünde denge şartlarında 0,02 mg/L CV ölçülmüş ve bu da %99'dan fazla giderim verimi olarak hesaplanmıştır. AC miktarları azaltıldıkça (0,5-0,0125 g/L) çözeltide kalan CV boyası derişiminde yükselme gözlemlenmiş, böylece giderim verimlerinde de düşüş gözlemlenmiştir. Literatür incelendiğinde *Moringa oleifera* atıklarından üretilen AC ile CV boyasının giderimi yapılmış ve buna göre adsorbent miktarının artması ile giderim veriminde artış olduğu tespit edilmiştir [42].

3.2.3. Başlangıç Boya Derişiminin Etkisi

CV boyasının derişiminin giderim verimi üzerine etkisinin tespit edilmesi için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar yazılıma yüklenmiş ve yazılımdan elde edilen çıktılar Şekil 6'da sunulmuştur.



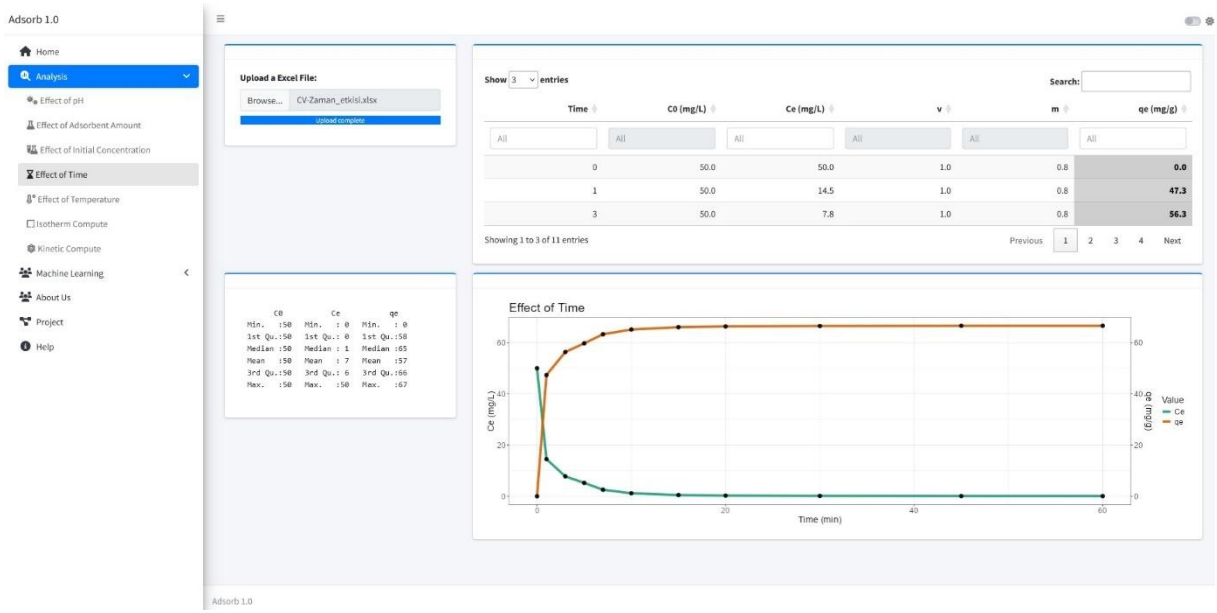
Şekil 6. Başlangıç boya derişimlerinin giderim verimine etkisi.

CV boyasının giderim verimi incelendiğinde 1 g/L AC varlığında 5-25 mg/L başlangıç CV derişimlerinde yapılan deneylerde denge şartlarında çözeltide boya ölçülememektedir. Dolayısıyla bu derişimlerde boyanın tamamen giderildiği açıktır. Fakat CV boyasının başlangıç derişimi 50 mg/L olduğunda ise denge durumunda çözeltide kalan CV derişimi 0,01 mg/L olarak ölçülmüş, bu şartlardaki giderim veriminin ise %99'dan büyük olduğu tespit edilmiştir. 75 mg/L, 100 mg/L ve 200 mg/L başlangıç derişimlerinde yapılan deneylerde çözeltide kalan CV

boyasının derişimleri sırasıyla 4,16, 14,6 ve 98,2 mg/L olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere başlangıç boya derişimi arttıkça çözeltide kalan CV derişimi artmaktadır. Literatür incelendiğinde şeker kamışı yaprağından üretilen AC ile CV boyasının gideriminin yapıldığı bir araştırmada başlangıç boya derişiminin artması ile giderim veriminde düşüş tespit edilmiştir [43].

3.2.4. Temas Süresinin (Zamanın) Etkisi

AC üzerine CV boyasının gideriminde zamanın etkisinin tespit edilebilesi için yapılan deneylerden elde edilen sayılar değerler oluşturulan yazılıma yüklenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7'de sunulmuştur.



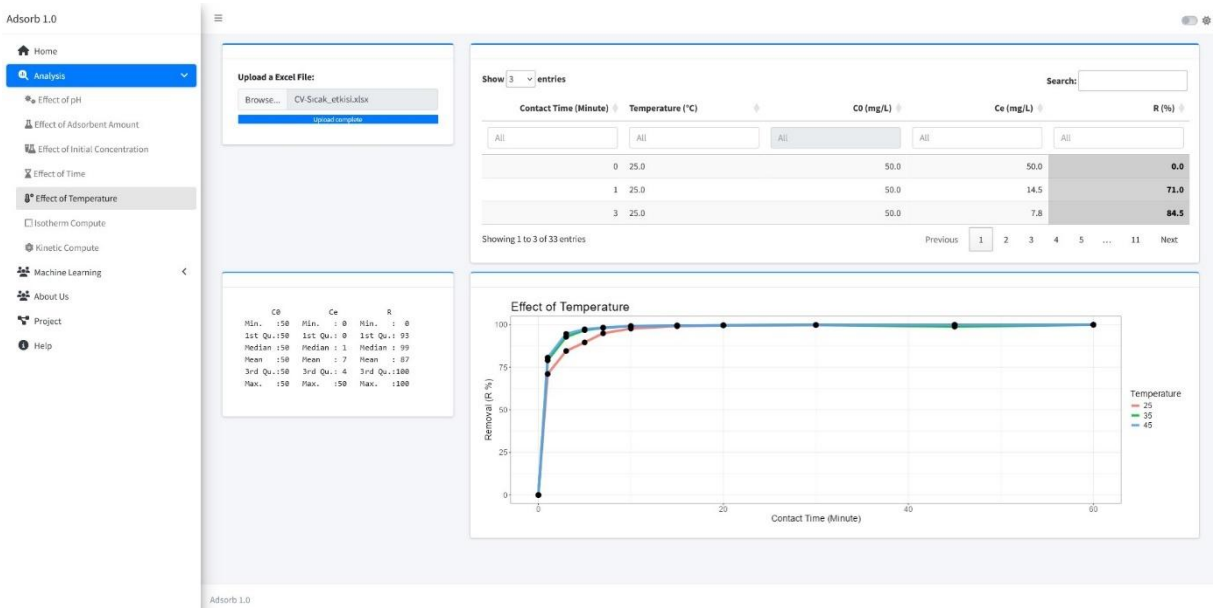
Şekil 7. Temas süresinin giderim verimine etkisi.

Yapılan deneylerde CV boyası üzerinde yapılan deneyler incelenecek olursa başlangıç derişimi 50 mg/L olan CV boyası üzerine 0,75 g AC eklenerek 0. dakikada ve ilerleyen dakikalarda numuneler alınmış ve boya derişimleri ölçülmüştür. Deneyin ilk dakikasında %71,0 giderim verimine ulaşılmış olup 3. 5. 7. ve 10. dakikalarda giderim verimi sırasıyla %84,5, 89,56, 94,90 ve 97,68 değerlerinde ulaşmıştır. 15. dakika ve sonrasında giderim verimi %99'un üzerine çıkmış ve 60.dakikadaki giderim verimi %99,88 olarak ölçülmüştür. Literatür incelendiğinde portakal kabuğu ve karpuz kabuğu atıklarının karıştırılarak AC üretiminin yapıldığı bir araştırmada CV boyasının giderimi yapılmış ve çalışmada temas süresinin artması ile giderim veriminde artış olduğu tespit edilmiştir [44].

3.2.5. Sıcaklığın Etkisi

Son olarak CV boyasının AC üzerine adsorpsiyonunda sıcaklığın etkisinin belirlenebilmesi için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Adsorb 1.0 yazılımına yüklenmiş yazılım çıktıları Şekil 8'de sunulmuştur.

Her 3 sıcaklıkta yapılan deneylerde 1.dakikada ölçülen CV derişimlerine bakıldığında 25 ^{0}C çözeltide kalan CV derişimi 14,5 mg/L, 35 ^{0}C'deki 10,5 mg/L ve 45 ^{0}C'deki 9,7 mg/L olarak ölçülmüştür. İlerleyen dakikalarda da her 3 farklı sıcaklıkta çözeltide kalan boya derişimlerine bakıldığında sıcaklık yükseldiğinde giderim veriminin arttığı görülmektedir. Buna göre literatürde yapılan benzer çalışmalarda irdelendiğinde reaksiyonun endotermik olduğu belirlenmiştir.



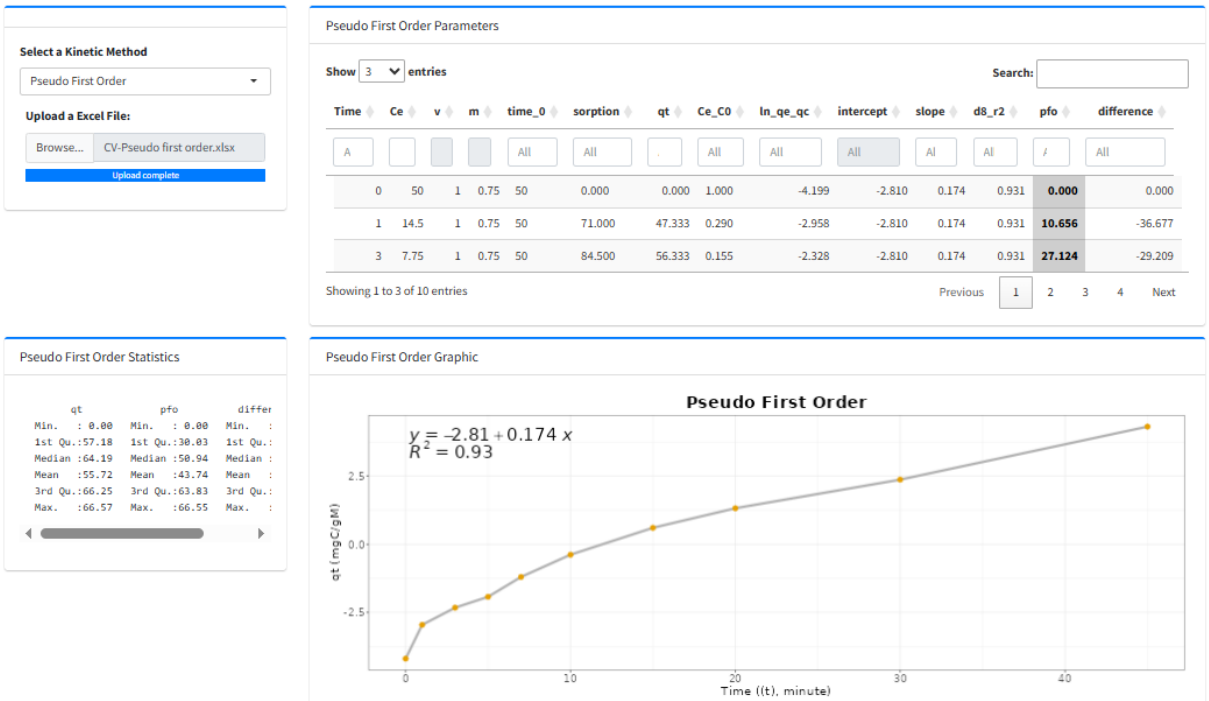
Şekil 8. Sıcaklık parametresinin CV boyası giderim verimine etkisi.

3.2.6. Adsorpsiyon kinetikleri

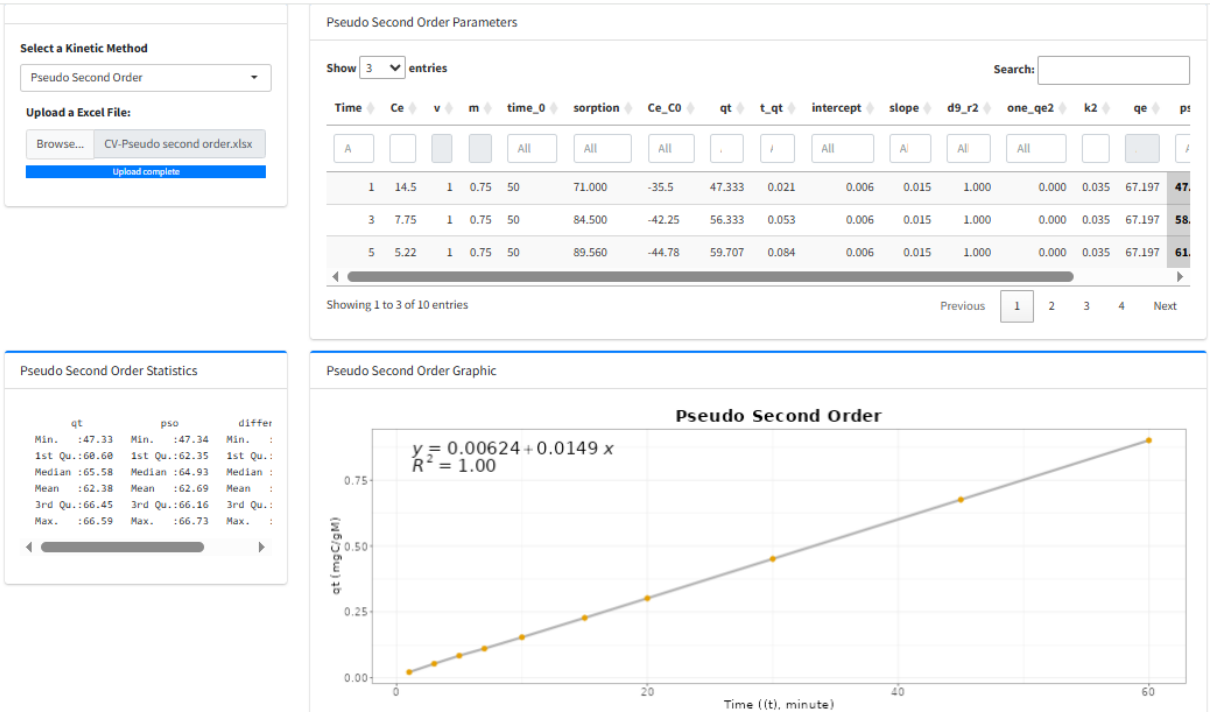
AC üzerine CV boyasının gideriminin kinetik açıdan değerlendirilmesi için yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar Adsorb 1.0 yazılımına yüklenmiştir. Yazılımdan elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca Pseudo first order kinetik modelinin linear halinden elde edilen grafik Şekil 9'da Pseudo second order için elde edilen grafik ise Şekil 10'da sunulmuştur. Diğer taraftan her iki model ve laboratuvar deneylerinde elde edilen q_t değerlerinin zamana karşı değişim grafiği ise Şekil 11'de sunulmuştur.

Tablo 2. CV'nin AC üzerine adsorbsiyonunda hesaplanan kinetik parametreler

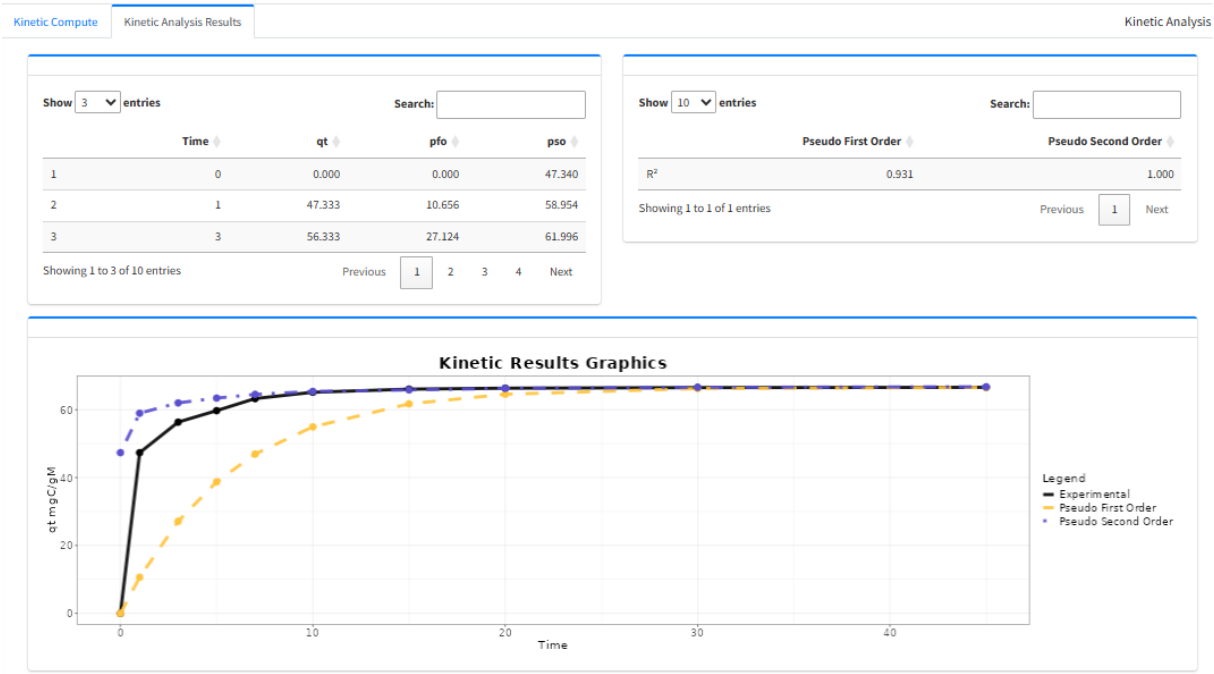
Kinetic models	Pseudo first order	Pseudo second order
Parameters	k_1 = 0,174	k_2 = 0,035
R^2	0,931	1,00



Şekil 9. Pseudo first order kinetik modelinden elde edilen regresyon eğrisi.



Şekil 10. Pseudo second order kinetik modelinden elde edilen regresyon eğrisi.



Şekil 11. Deneysel ve teorik q_t değerlerinin zamana karşı değişimi grafiği.

Adsorbsiyon prosesinde yapılan kinetik değerlendirme sayesinde CV boyasının AC üzerine tutunmasında zamanın etkisi tespit edilmeye çalışılır. CV boyası için hazırlanan tablolar irdelenecek olursa Pseudo first order ve Pseudo second order kinetik modellerin R^2 değerleri sırasıyla 0,931 ve 1,0 olarak hesaplanmıştır. Buna göre en uygun model Pseudo second order kinetik model olarak görülmektedir. Deney başlangıcında ilk dakikada başlangıç boya derişimi 50 mg/L'den 14,50 mg/L ye düştüğü böylelikle %71,0 giderim verimine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Deneyin ilerleyen dakikalarında verim azalması gözlemlenmiş 15. Dakikada çözeltide kalan CV derişimi 0,47 mg/L olarak ölçülmüş olup bu değere karşı gelen giderim verimi %99,06 olarak hesaplanmıştır. İlerleyen dakikalarda verim düşüşü gözlemlenirken 60.dakikadaki çözeltide kalan boya derişimi 0,06 mg/L ve giderim verimi %99,88 olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen grafikler irdelenecek olursa ilk dakikalardaki boya giderim veriminin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum reaksiyon hızının başlangıçta hızlı olduğunu, dengeye geldiğinde yavaşladığını ve daha sonra platoya döndüğü görülmektedir. Bu durum AC ile CV boya moleküllerinin etkileşiminde ilk dakikalarda CV moleküllerinin AC yüzeyindeki mevcut aktif bölgelerin ürettiği

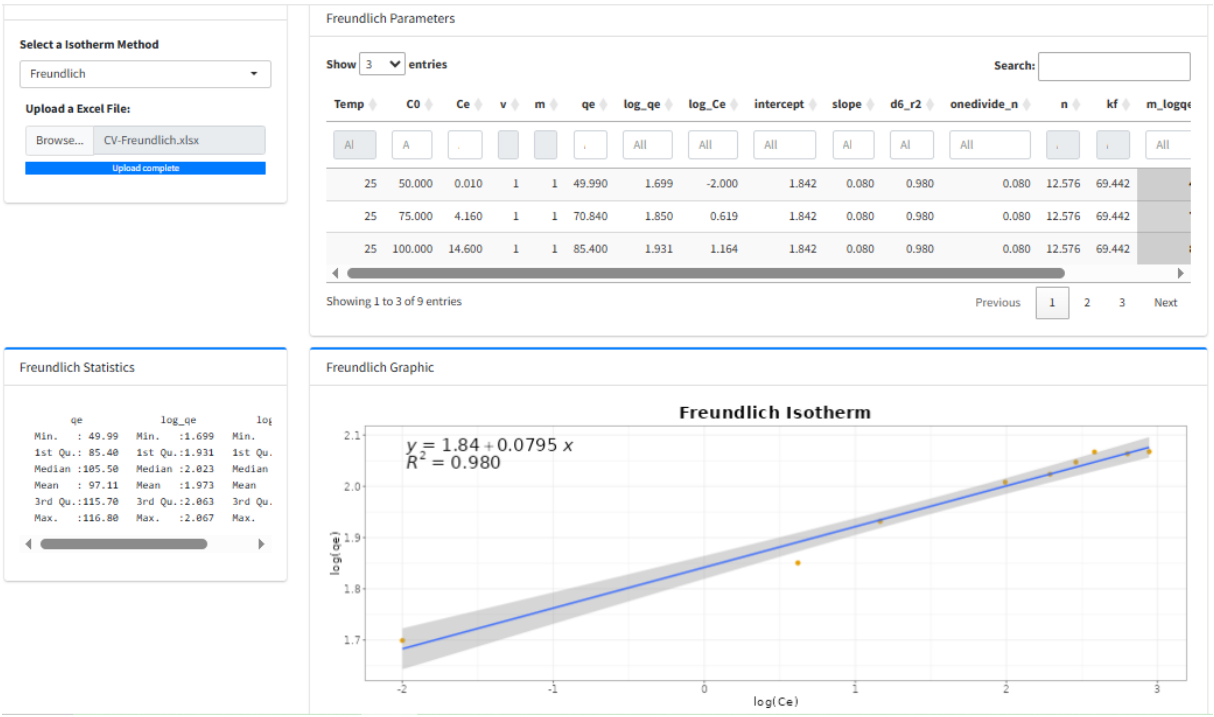
hızlı bir etkileşim kuvvetine maruz kaldığının kanıtıdır. Süre ilerledikçe kuvvetin azaldığı ve halliyle giderimi veriminin de düştüğü açıktır. Buna göre Pseudo second order kinetik modelinde adsorbsiyon olayının adsorbenttin yüzeyinde meydana geldiği söylenebilir [40]. Literatürde AC ile CV boyasının giderim çalışmalarına bakıldığında kinetik modelin Pseudo second order'a uyduğu tespiti yapılmıştır [40,45–47].

3.2.7. Adsorpsiyon izotermleri

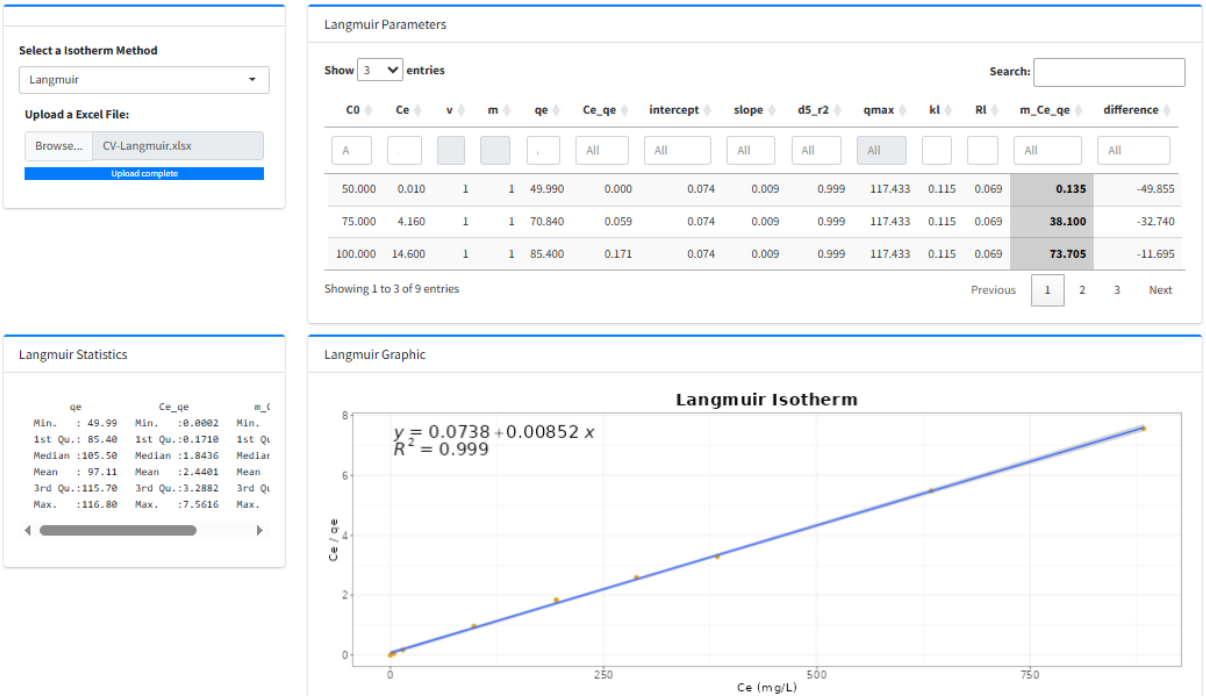
CV boyasının AC üzerine adsorbsiyonun izoterm modelleri ile değerlendirilebilmesi yapılabilmesi için laboratuvarda elde edilen sayısal veriler Adsorb 1.0 yazılımına yüklenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Bunun yanında Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modellerinin liner formlarından elde edilen grafikler Şekil 12, 13 ve 14'te sunulmuştur. Diğer taraftan kalıntı CV boyası derişimlerine q_e değerleri ise Şekil 15'de sunulmuştur.

Tablo 3. CV'nin AC üzerine adsorpsiyonunda hesaplanan izoterm parametreleri.

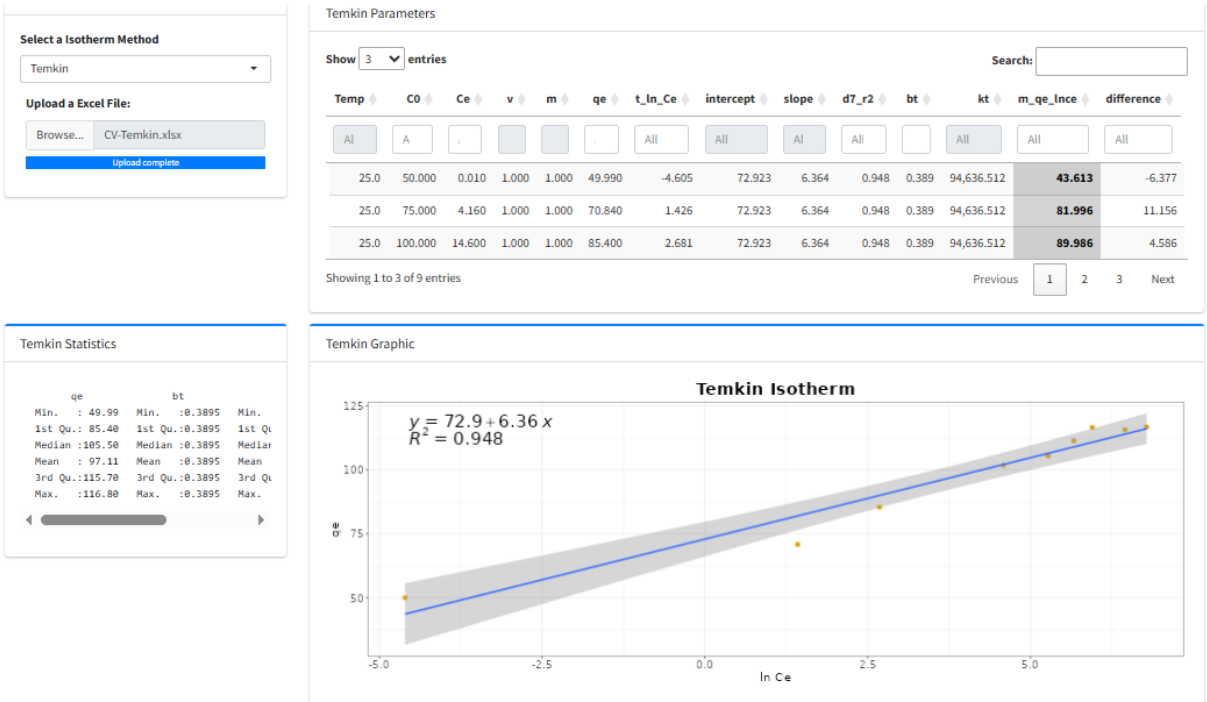
İzoterm	Freundlich	Langmuir	Temkin
Parametreler	k_F = 69,442	k_L = 0,115	B_T = 0,389
	1/n = 0,08	R_L = 0,069	k_T = 94636
		q_{max} = 117,433	
R^2	0,980	0,999	0,948



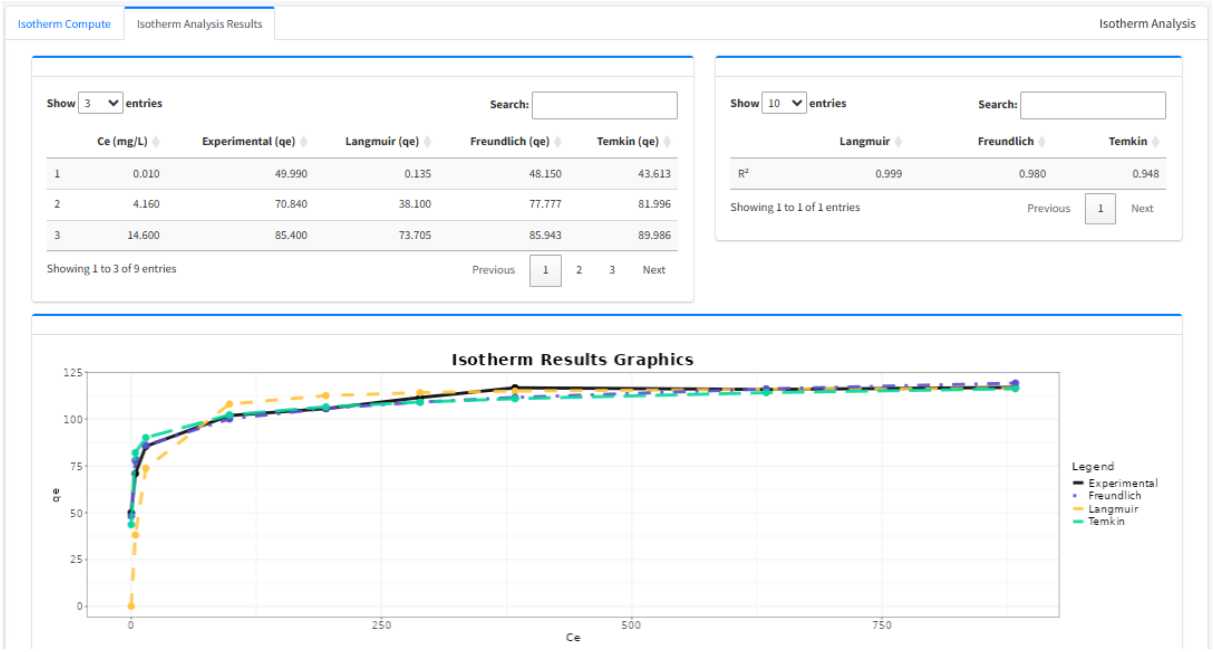
Şekil 12. Freundlich izoterm modelinin regresyon eğrisi.



Şekil 13. Langmuir izoterm modelinin regresyon eğrisi.



Şekil 14. Temkin izoterm modelinin regresyon eğrisi.



Şekil 15. Deneysel ve teorik q_e değerlerinin C_e değerlerine karşı değişim grafiği.

Freundlich izoterm modelinde adsorbentin yüzeyinin heterojen olduğu ve yüzeyinin düzgün olmadığı kabulü yapılır [48]. Langmuir izoterm modelinde kirletici ile adsorbentin arasında bir etkileşimin olmadığı kabul edilerek adsorplama işleminin tek katmanda gerçekleştiği kabul edilir [49]. Temkin izoterm modelinde ise kirletici moleküllerinin birbiri arasında etkileşimin olduğu kabul edilir ve bu etkileşimin lineer olarak azaldığı söylenmektedir [50]. CV boyası için Freundlich, Langmuir ve Freundlich izoterm modellerinin R^2 değerleri sırasıyla 0,980, 0,999 ve 0,948 olarak hesaplanmıştır. Buna göre 3 model arasından en uygun izoterm modelinin Langmuir olduğu görülmektedir. Diğer taraftan AC'nin maksimum giderim verimi ise 117,433 mg/g olarak hesaplanmıştır. Literatür incelendiğinde chitinden [51], Corncob'dan [52] elde edilen AC ile CV boyasının giderimi yapılmış ve en uygun modelin Langmuir olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Elde edilen sonuçların literatür ile kıyaslanması

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların özetinin literatür ile kıyaslaması Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Elde edilen değerlerin literatür ile kıyaslanması.

	Bu çalışma	[44]	[43]	[42]	[41]	[53]
Adsorbent türü	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Giderilen kirletici	CV	CV	CV	CV	CV	CV
Çalışılan pH aralığı	2-10	4-10	2-11	3-10	2-10	7,0
Çalışılan kontak zamanı (dk)	0-60	10-60	0-100	5-160	45-95	0-250
Adsorbent dozajı (mg)	12,5-2000	0,04-0,1	50-600	0-250	1,5-2,5	200
Başlangıç kirletici derişimi (mg/L)	5,0-1000	20-200	100-700	250-750	50-100	10-50
Çalışılan sıcaklık (^{0}C)	25-45	25	27-60	25 ± 1	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
En uygun kinetik model	Pseudo second order	Pseudo second order	Pseudo second order	Pseudo second order	Pseudo second order	Pseudo second order
Kinetik model R^2	1,0	>0,90	0,99	>0,989	0.9992	0,9877
En uygun izoterm modeli	Langmuir	Freundlich	Langmuir	Langmuir	Freundlich	Redlich-Peterson
İzoterm model R^2	0,999	0,95	0,99	0,995	0,9803	0,9814
q_{max} (mg/g)	117,433	137,8	149,25	469,55	70,138	7,5717

Kahve atıklarından üretilen AC ile CV boyasının gideriminin yapıldığı bir araştırmada pH, adsorbent dozu, kontak süresi ve sıcaklık parametrelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada en uygun kinetik ve izoterm modeller sırasıyla Pseudo second order (R^2:0,981) ve Langmuir (R^2:0,999) olarak tespit edilmiş ve ayrıca q_{max} değeri ise 352,1 mg/g olarak raporlanmıştır [54]. Hanafi ve arkadaşları tarafından portakal kabuğu ve kavun atıklarının mikrodalgada $ZcCl_2$ ile aktive edilerek AC üretiminin gerçekleştirildiği çalışmada CV ve MB boyalarının giderimleri gerçekleştirilmiştir. pH 10'de gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmalarında en uygun kinetik ve izoterm modellerinin sırasıyla Pseudo second order ve Freundlich olduğu tespit edilmiş ve q_{max} değeri 137,8 mg/g olarak hesaplanmıştır [44]. Diğer taraftan tarımsal atıklardan elde dilen AC ile CV boyasının gideriminin yapıldığı farklı bir araştırmada yapılan adsorbsiyon deneylerinde 50 dk'lık kontak zamanı sonunda 7,5717 mg/g giderim verimine ulaşıldığı raporlanarak elde edilen AC'nin CV boyası gideriminde etkili olduğu bildirilmiştir [53]. Yine benzer şekilde literatürde AC ile CV boyalarının giderimlerinin yapılığı ve oldukça iyi sonuçların elde edildiği raporlanmıştır [41–43].

4. Sonuç

Bu çalışmada AC ile CV boyasının kesikli adsorbsiyon deneyleri ile giderimi yapılmıştır. Adsorbsiyon mekanizmasının açıklanabilmesi için pH, başlangıç boya derişimi, değişken adsorbent miktarı, temas süresi ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. CV boyasının AC üzerine adsorbsiyonu SEM-EDX ve FTIR analizleri ile desteklenmiştir. Laboratuvarda elde edilen veriler yeni geliştirilen makine öğrenmesi temelli, R tabanlı web uygulaması olan Adsorb 1.0'da test edilmiştir. Yazılım sayesinde Pseudo first order ve Pseudo second order kinetik modelleri ile Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modelleri denenerek hesaplamaları ve grafikleri oluşturulmuştur. Adsorb 1.0'dan elde edilen verilere göre en uygun kinetik model R^2:1 ile Pseudo second order ve en uygun izoterm modeli R^2:0,999 ile Langmuir olarak hesaplanmış, q_{max} ise 117,433mgCV/gAC olarak bulunmuştur. Geliştirilen yazılımın ilk versiyonuna https://iste.shinyapps.io/Adsorb/" adresinden erişilebilir. Bu çalışma ile geliştirilen yazılım sayesinde, MS-Excel gibi konvansiyonel yazılımlar kullanılarak yapılan adsorbsiyon hesaplamalarında oraya çıkabilecek olası hatalar ortandan kalkmış olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123Y087 Hibe Numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

Kaynakça

[1] D. Ma, H. Yi, C. Lai, X. Liu, X. Huo, Z. An, L. Li, Y. Fu, B. Li, M. Zhang, L. Qin, S. Liu, L. Yang, Critical review of advanced oxidation processes in organic wastewater treatment, Chemosphere 275 (2021) 130104. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130104.

[2] S. Tsani, P. Koundouri, E. Akinsete, Resource management and sustainable development: A review of the European water policies in accordance with the United Nations' Sustainable Development Goals, Environ Sci Policy 114 (2020) 570–579. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.008.

[3] R. Riveros, Chemical treatment and reuse applications for latex paint industry wastewater, Desalination Water Treat 103 (2018) 290–295. https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21932.

[4] S. Nair K, B. Manu, A. Azhoni, Sustainable treatment of paint industry wastewater: Current techniques and challenges, J Environ Manage 296 (2021) 113105. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113105.

[5] A.K. Surela, L.K. Chhachhia, V.K. Surela, P.L. Meena, Polypyrrole-Based Composites for Dyes Removal From Contaminated Water, in: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95486-0.00019-3.

[6] W. Konicki, M. Aleksandrzak, D. Moszyński, E. Mijowska, https://doi.org/10.1007/s13762-018-1728-5, J Colloid Interface Sci 496 (2017) 188–200. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.02.031.

[7] E.J.R. Almeida, C.R. Corso, Decolorization and removal of toxicity of textile azo dyes using fungal biomass pelletized, International Journal of Environmental Science and Technology 16 (2019) 1319–1328. https://doi.org/10.1007/s13762-018-1728-5.

[8] J.N. Wekoye, W.C. Wanyonyi, P.T. Wangila, M.K. Tonui, Kinetic and equilibrium studies of Congo red dye adsorption on cabbage waste powder, Environmental Chemistry and Ecotoxicology 2 (2020) 24–31. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2020.01.004.

[9] A. Tkaczyk, K. Mitrowska, A. Posyniak, Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review, Science of The Total Environment 717 (2020) 137222. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222.

[10] Ş. Parlayıcı, E. Pehlivan, Biosorption of methylene blue and malachite green on biodegradable magnetic Cortaderia selloana flower spikes: modeling and equilibrium study, Int J Phytoremediation 23 (2021) 26–40. https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1788502.

[11] H.M. Solayman, Md.A. Hossen, A. Abd Aziz, N.Y. Yahya, K.H. Leong, L.C. Sim, M.U. Monir, K.-D. Zoh, Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review, J Environ Chem Eng 11 (2023) 109610. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109610.

[12] H.M. Ali, S.F. Shehata, K.M.A. Ramadan, Microbial decolorization and degradation of crystal violet dye by Aspergillus niger, International Journal of Environmental Science and Technology 13 (2016) 2917–2926. https://doi.org/10.1007/s13762-016-1117-x.

[13] K. Vikrant, B.S. Giri, N. Raza, K. Roy, K.-H. Kim, B.N. Rai, R.S. Singh, Recent advancements in bioremediation of dye: Current status and challenges, Bioresour Technol 253 (2018) 355–367. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.029.

[14] B. Lellis, C.Z. Fávaro-Polonio, J.A. Pamphile, J.C. Polonio, Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms, Biotechnology Research and Innovation 3 (2019) 275–290. https://doi.org/10.1016/J.BIORI.2019.09.001.

[15] S. Rahimi, A. Poormohammadi, B. Salmani, M. Ahmadian, M. Rezaei, Comparing the photocatalytic process efficiency using batch and tubular reactors in removal of methylene blue dye and COD from simulated textile wastewater, Journal of Water Reuse and Desalination 6 (2016) 574–582. https://doi.org/10.2166/wrd.2016.190.

[16] V. Katheresan, J. Kansedo, S.Y. Lau, Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review, J Environ Chem Eng 6 (2018) 4676–4697. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060.

[17] H. Liu, J. Zhang, M. Lu, L. Liang, H. Zhang, J. Wei, Biosynthesis based membrane filtration coupled with iron nanoparticles reduction process in removal of dyes, Chemical Engineering Journal 387 (2020) 124202. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124202.

[18] E. Brillas, C.A. Martínez-Huitle, Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review, Appl Catal B 166–167 (2015) 603–643. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016.

[19] J.M. Sánchez-Silva, A. Aguilar-Aguilar, G.J. Labrada-Delgado, E.G. Villabona-Leal, H.J. Ojeda-Galván, J.L. Sánchez-García, H. Collins-Martínez, MV. López-Ramón, R. Ocampo-Pérez, Hydrothermal synthesis of a photocatalyst based on Byrsonima crassifolia and TiO2 for degradation of crystal violet by UV and visible radiation, Environ Res 231 (2023) 116280. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116280.

[20] E. Hosseini Koupaie, M.R. Alavi Moghaddam, S.H. Hashemi, Post-treatment of anaerobically degraded azo dye Acid Red 18 using aerobic moving bed biofilm process: Enhanced removal of aromatic amines, J Hazard Mater 195 (2011) 147–154. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.017.

[21] N.M. Marin, L.F. Pascu, A. Demba, M. Nita-Lazar, I.A. Badea, H.Y. Aboul-Enein, Removal of the Acid Orange 10 by ion exchange and microbiological methods, International Journal of Environmental Science and Technology 16 (2019) 6357–6366. https://doi.org/10.1007/s13762-018-2164-2.

[22] S. Samsami, M. Mohamadizaniani, M.-H. Sarrafzadeh, E.R. Rene, M. Firoozbahr, Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives, Process Safety and Environmental Protection 143 (2020) 138–163. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034.

[23] A.K. Badawi, K. Zaher, Hybrid treatment system for real textile wastewater remediation based on coagulation/flocculation, adsorption and filtration processes: Performance and economic evaluation, Journal of Water Process Engineering 40 (2021) 101963. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101963.

[24] A. Marey, W.S. Gado, A.G. Soliman, A.M. Masoud, A.A. El-Zahhar, G.A.A.M. Al-Hazmi, M.H. Taha, A.M.A. El Naggar, Efficient removal of methylene blue dye from wastewater specimen using polystyrene coated nanoparticles of silica, Inorg Chem Commun 160 (2024) 112018. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112018.

[25] J.-X. Jiang, Q.-Q. Zhang, Y.-H. Li, L. Li, Three-dimensional network graphene aerogel for enhancing adsorption and visible light photocatalysis of nitrogen-doped TiO2, Mater Lett 234 (2019) 298–301. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.114.

[26] R. Agarwala, L. Mulky, Adsorption of Dyes from Wastewater: A Comprehensive Review, ChemBioEng Reviews 10 (2023) 326–335. https://doi.org/10.1002/cben.202200011.

[27] Amrutha, G. Jeppu, C.R. Girish, B. Prabhu, K. Mayer, Multi-component Adsorption Isotherms: Review and Modeling Studies, Environmental Processes 10 (2023) 38. https://doi.org/10.1007/s40710-023-00631-0.

[28] K. Mohanty, J.T. Naidu, B.C. Meikap, M.N. Biswas, Removal of Crystal Violet from Wastewater by Activated Carbons Prepared from Rice Husk, Ind Eng Chem Res 45 (2006) 5165–5171. https://doi.org/10.1021/ie060257r.

[29] S.K. Lagergren, About the theory of so-called adsorption of soluble substances, Sven. Vetenskapsakad. Handingarl 24 (1898) 1–39.

[30] Y.S. Ho, D. Wase', C.F. Forster, Removal of lead ions from aqueous solution using sphagnum moss peat as adsorbent, Water SA 22 (1996) 214–219.

[31] H.M.F. Freundlich, Over the adsorption in solution , J. Phys. Chem. 57 (1906) 1100–1107.

[32] J. Wang, X. Guo, Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method, Chemosphere 258 (2020) 127279. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.127279.

[33] I. Langmuir, The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids, J Am Chem Soc 38 (1916) 2221–2295. https://doi.org/10.1021/JA02268A002/ASSET/JA02268A002.FP.PNG_V03.

[34] K.Y. Foo, B.H. Hameed, Insights into the modeling of adsorption isotherm systems, Chemical Engineering Journal 156 (2010) 2–10. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2009.09.013.

[35] M.I. Temkin, Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts, Acta Physiochim 12 (1940) 327–356.

[36] E. Kaya, M. Agca, F. Adiguzel, M. Cetin, Spatial data analysis with R programming for environment, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 25 (2019) 1521–1530. https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1470896.

[37] E. Kaya, E. Şentürk, A. Erener, C. Özkul, N.H. Akyol, SoilSpatvis: WEB Application for Geographical Data Visualization with R Language for Assessing Soil Pollution, Soil and Sediment Contamination: An International Journal (2023) 1–15. https://doi.org/10.1080/15320383.2023.2282108.

[38] J.-F. Gao, Q. Zhang, K. Su, J.-H. Wang, Competitive biosorption of Yellow 2G and Reactive Brilliant Red K-2G onto inactive aerobic granules: Simultaneous determination of two dyes by first-order derivative spectrophotometry and isotherm studies, Bioresour Technol 101 (2010) 5793–5801. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.091.

[39] C. Quintelas, Z. Rocha, B. Silva, B. Fonseca, H. Figueiredo, T. Tavares, Removal of Cd(II), Cr(VI), Fe(III) and Ni(II) from aqueous solutions by an E. coli biofilm supported on kaolin, Chemical Engineering Journal 149 (2009) 319–324. https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.11.025.

[40] Y. Raji, A. Nadi, I. Mechnou, M. Saadouni, O. Cherkaoui, S. Zyade, High adsorption capacities of crystal violet dye by low-cost activated carbon prepared from Moroccan Moringa oleifera wastes: Characterization, adsorption and mechanism study, Diam Relat Mater 135 (2023) 109834. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109834.

[41] A.S. Yusuff, O.A. Ajayi, L.T. Popoola, Application of Taguchi design approach to parametric optimization of adsorption of crystal violet dye by activated carbon from poultry litter, Sci Afr 13 (2021) e00850. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00850.

[42] Y. Raji, A. Nadi, I. Mechnou, M. Saadouni, O. Cherkaoui, S. Zyade, High adsorption capacities of crystal violet dye by low-cost activated carbon prepared from Moroccan Moringa oleifera wastes: Characterization, adsorption and mechanism study, Diam Relat Mater 135 (2023) 109834. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109834.

[43] S.A. Patil, P.D. Kumbhar, B.S. Satvekar, N.S. Harale, S.C. Bhise, S.K. Patil, A.S. Sartape, S.S. Kolekar, M.A. Anuse, Adsorption of toxic crystal violet dye from aqueous solution by using waste sugarcane leaf-based activated carbon: isotherm, kinetic and thermodynamic study, Journal of the Iranian Chemical Society 19 (2022) 2891–2906. https://doi.org/10.1007/s13738-022-02500-3.

[44] N.A.M. Hanafi, A.S. Abdulhameed, A.H. Jawad, Z.A. ALOthman, T.A. Yousef, O.K. Al Duaij, N.S. Alsaiari, Optimized removal process and tailored adsorption mechanism of crystal violet and methylene blue dyes by activated carbon derived from mixed orange peel and watermelon rind using microwave-induced ZnCl2 activation, Biomass Convers Biorefin 14 (2024) 28415–28427. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03646-z.

[45] A.A. Kamath, N.G. Nayak, R. Sagar, Coconut flower sheath derived activated charcoal as efficient and cost effective adsorbent for crystal violet dye removal, Inorg Chem Commun 134 (2021) 109077. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.109077.

[46] A. Solmaz, Z.A. Sari, M. Karta, T. Turna, A. Yücel, T. Depci, Production and Characterization of Activated Carbon from Pomegranate Peel for Pharmaceutical Waste (Paracetamol) Removal: Response Surface Methodology Application, Water Air Soil Pollut 234 (2023) 645. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06641-w.

[47] A. Solmaz, M. Karta, T. Depci, T. Turna, Z.A. Sari, Preparation and characterization of activated carbons from Lemon Pulp for oxytetracycline removal, Environ Monit Assess 195 (2023) 797. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11421-4.

[48] M. Mozaffari Majd, V. Kordzadeh-Kermani, V. Ghalandari, A. Askari, M. Sillanpää, Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020), Science of The Total Environment 812 (2022) 151334. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151334.

[49] N. Ayawei, A.N. Ebelegi, D. Wankasi, Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms, J Chem 2017 (2017). https://doi.org/10.1155/2017/3039817.

[50] G.K. Rajahmundry, C. Garlapati, P.S. Kumar, R.S. Alwi, D.V.N. Vo, Statistical analysis of adsorption isotherm models and its appropriate selection, Chemosphere 276 (2021) 130176. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130176.

[51] Q. Ji, H. Li, High surface area activated carbon derived from chitin for efficient adsorption of Crystal Violet, Diam Relat Mater 118 (2021) 108516. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108516.

[52] S.M. Yakout, M.S. Ali, Removal of the Hazardous Crystal Violet Dye by Adsorption on Corncob-Based and Phosphoric Acid-Activated Carbon, Particulate Science and Technology 33 (2015) 621–625. https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1016642.

[53] E.E. Jasper, V.O. Ajibola, J.C. Onwuka, Nonlinear regression analysis of the sorption of crystal violet and methylene blue from aqueous solutions onto an agro-waste derived activated carbon, Appl Water Sci 10 (2020) 132. https://doi.org/10.1007/s13201-020-01218-y.

[54] I. Loulidi, M. Jabri, A. Amar, A. Kali, A. A. Alrashdi, C. Hadey, M. Ouchabi, P.S. Abdullah, H. Lgaz, Y. Cho, F. Boukhlifi, Comparative Study on Adsorption of Crystal Violet and Chromium (VI) by Activated Carbon Derived from Spent Coffee Grounds, Applied Sciences 13 (2023) 985. https://doi.org/10.3390/app13020985.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Estimation on River Water Flow Rate Using Long Short-term Memory (LSTM) Neural Network and Adaptive Neuro-fuzzy Inference Systems (ANFIS)

Akin Ilhan[*1]

[*1] Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yildirim Beyazit University, Ankara

(Alınış / Received: 06.07.2024, Kabul / Accepted: 06.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS), Fuzzy C-means (FCM), Subtractive Clustering (SC), Grid Partitioning (GP), Long Short-term Memory (LSTM)

Abstract: The forecasting of river water flow rate (RWFR) plays a prominent role in planning and constructing of new hydraulic dams, or running the ones that were formerly built. This study suggests algorithms of machine learning to predict future water flow rate values for river flow. Namely, estimation models were advanced according to the past time-series RWFR data to obtain the values of future RWRF. Accordingly, long short-term memory (LSTM) neural network, adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) including fuzzy c-means (FCM), subtractive clustering (SC), and grid partitioning (GP) were advanced for the aim of RWFR predictions. A measurement station (MS), settled at the border of Türkiye and Bulgaria, named as Svilengrad MS was selected on the Maritsa River, as the study region. Accordingly, it was concluded that SC algorithm of ANFIS have generated better results compared with respect to other three methods. The comparisons of the data estimations according to the real observed water flow values were accomplished depending on the statistical error values including mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), else the correlation coefficient (*R*). Eventually, it was concluded and shown that the superior model of SC has generated those statistical accuracy values, respectively to correspond 3.04 m^3/s MAE, 4.91 m^3/s RMSE, and 0.9979 *R*, among the total of 102 tested models using FCM, SC, GP, and LSTM.

Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Sinir Ağı ve Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemleri (ANFIS) Kullanılarak Nehir Suyu Akış Hızının Tahmini

Anahtar Kelimeler
Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Bulanık C-ortalamaları (FCM), Çıkarım Kümeleme (SC), Izgara Bölümleme (GP), Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM)

Öz: Nehir suyu akış hızının (RWFR) tahmini, yeni su barajlarının planlanması ve inşa edilmesinde veya daha önce inşa edilmiş olanların işletilmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu çalışma, nehir akışının gelecekteki su akış hızı değerlerini tahmin etmek için makine öğrenme algoritmaları önermiştir. Yani tahmin modelleri, gelecekteki RWRF değerlerini elde etmek için geçmiş zaman serisi RWFR verilerine dayalı olarak geliştirilmiştir. Buna göre, uzun kısa süreli bellek (LSTM) sinir ağı, bulanık c-ortalamaları (FCM), çıkarım kümelemeyi (SC), ızgara bölümlemeyi (GP) içeren uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemleri (ANFIS), RWFR tahminleri amacıyla geliştirilmiştir. Çalışma bölgesi olarak Meriç Nehri üzerinde Türkiye-Bulgaristan sınırında yer alan ve Svilengrad MS olarak adlandırılan ölçüm istasyonu (MS) seçilmiştir. Buna göre, ANFIS'in SC algoritmasının diğer üç yönteme kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiği sonucuna varılmıştır. Veri tahminlerinin gerçek gözlemlenen su akış değerlerine göre karşılaştırılması, ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök hata (RMSE) ve korelasyon katsayısı (*R*) dahil olmak üzere istatistiksel hata değerlerine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Neticede, SC'nin en iyi modelinin, FCM, SC, GP ve LSTM kullanan toplam 102 test modeli arasında, sırasıyla, 3,04 m^3/s MAE, 4,91 m^3/s RMSE ve 0,9979 *R*'ye karşılık gelen istatistiksel doğruluk değerlerini ürettiği sonucuna varılmıştır ve gösterilmiştir.

*İlgili Yazar, email: akinilhan@aybu.edu.tr

Nomenclature

Abbreviation	Definition
σ_c	State activation function
σ_g	Gate activation function
$\odot$	Hadamard product
a(j)	Anticipated instantaneous value
ACO	Ant colony optimization
ANFIS	Adaptive neuro fuzzy inference system
ANN	Artificial neural network
b	Bias
BP	Backpropagation
ELM	Extreme learning machine
f	Forget gate
FCM	Fuzzy c-means
FIS	Fuzzy inference system
g	Cell candidate
GA	Genetic algorithm
GP	Grid partitioning
GRNN	Generalized regression neural network
HD	Number of the historical data
HL	The number of the hidden layer
i	Input gate
IR	The value of the influence radius
LSTM	Long short-term memory
MAE	Mean absolute error
MFs	The number of the membership functions
o	Output gate
PSO	Particle swarm optimization
R_i	The input gate for the recurrent weight
R	Correlation coefficient
r(j)	Real measured instantaneous value
RES	Renewable energy source
RMSE	Root mean square error
RNN	Recurrent neural network
RVM	Relevance vector machine
SC	Subtractive clustering
SVM	Support vector machine
W	Input weight
WNN	Wavelet neural network

1. Introduction

There is a significant increase of the installations of renewable energy sources (RESs) in many countries of the World, especially in the recent years. This is due to the swift rise of greenhouse gas emissions, causing global warming as well as resulting in especially health problems in humans and even in other living organisms. Accordingly, RESs have a rapid spreading potential compared with respect to the conventional fossil based energy sources. For this reason, RESs extend all over the World so quickly and they are recently found in many geographical places of the earth globe. Among the renewable energy sources, most important types include wind, solar, and the hydraulic types of energy production. Although hydraulic energy facility installations have partially declined in the latest years with the rising interest in other types of renewable energy sources; the hydraulic energy is still a type of renewable energy generation method that is one of the most widely used and preferred power source in the World. Hydropower along with the solar energy having these significant features compete closely with each other both produce the most power worldwide, compared to the other renewable sources.

Figure 1 indicates the growth trend of most important types of renewable sources for the World, including hydraulic, solar, and wind; considering the year range between 2014 to 2024. On the other hand, their cumulative amounts including the other sources are presented with dark blue total column, shown in this figure. The other sources consist of renewable sources such as marine energy, biomass energy, energy captured from solid biofuels and renewable waste, energy obtained from bagasse, energy acquired from renewable municipal waste, and finally, energy achieved from other solid biofuels, liquid biofuels, biogas, plus the geothermal energy. Since the capacity of the other sources is so low in magnitude of the total installed power including these cited sources, for this reason, those are totally shown with a single column, and exhibited in this figure using yellow color. As displayed in Figure 1, the total capacity for the renewable energy has significantly augmented from 1,706.98 GW of installations to reach to 4,758.23 GW, respectively from 2014 to 2024. Namely, this corresponds to an increase of approximately 2.8 times, in the last decade of the installed global power analysis. Another striking point in this way is that while the total installed power of wind and solar power plants was quite low as of 2014, by the year of 2023 these two technologies have become competitive with the hydraulic technology, considering the worldwide situation. Another important issue is that the amount of solar installed power, which was quite less compared to the wind installed power as of 2014, has become almost equalized as of 2019 and 2020; and by 2024, the amount of solar installed power has greatly exceeded the total amount of wind installed power, i.e., this ratio increase of solar installations to wind installations corresponded to around 1.7 times more by 2024. Taking the last year of analysis into account demonstrates that total installations of wind, solar, hydro, and other power types respectively correspond to 1,160.20 GW, 1,962.97 GW, 1,605.66 GW, and 29.41 GW, constituting a cumulative installed worldwide power of 4,758.23 GW.

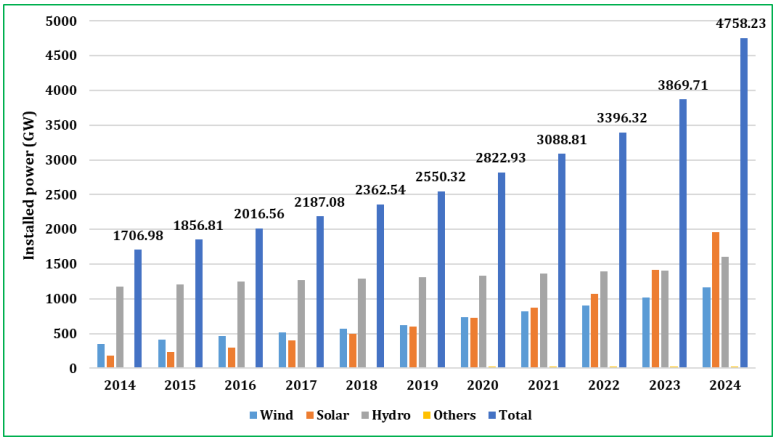


Figure 1. World installed renewables by sources

In the literature, the machine learning and artificial intelligence predictions are mainly implemented to wind and solar power estimations. Accordingly, there are a variety of different studies in obtaining output power anticipations of photovoltaic power plants. For instance, Lurwan et al. used a model of Hottel designed in Matlab software to obtain solar radiation forecast [1]. On the other hand, predictions on the electricity production and the related consumption of the solar power plant of Izmir Bakircay University were actualized, using the artificial neural network (ANN) and the conventional analysis of regressions [2]. Theocharides et al. performed a performance comparison of machine learning methods including regression trees (RT), support vector regression (SVR), and artificial neural networks (ANN) at a test center found in University of Cyprus. In their study, they have shown that the highest prediction capability was achieved during the utilization of the ANN method [3]. Scott et al. utilized different learning algorithms consisting of support vector machines (SVM), traditional linear regression (LR), random forest (RF), and the neural network (NN) in energy estimations of systems of PV. In their study,

algorithm input parameters involved pressure of air in milli-bar, temperature in ^{o}C, wind speed given in mile per hour, the humidity provided in percentage and the amount of the cloudiness supplied in percentage. The root mean square error statistical results were reported in their study to choose the best prediction tool to be RF [4]. Furthermore, in a study conducted by Gaboitaolelwe et al., the prediction performances of the support vector machine (SVM), gradient boosting (GB), extreme gradient boosting (XGB), support vector regressor (SVR), random forest (RF), and the algorithm of multi-layer perceptron were checked against each other. In this study, the superior performances were obtained on the behalf of gradient boosting (GB) and the random forest (RF) [5].

On the other hand, Liu et al., in their study, proposed autoregressive integrated moving average (ARIMA) and the EMD (empirical mode decomposition). They considered this developed model to actualize forecasts implemented to wind speed in order to obtain a model for a warning system of strong wind for railways [6]. Kavasseri and Seetharaman suggested wind speed forecasts to obtain the magnitudes of wind blowing speed for the next day and two days later, using the ARIMA type of modelling, in which the model was exerted to the region North provinces of Dakota of USA [7]. In the literature, the ANNs are also utilized in acquiring forecasts for wind speed and power. As similar to ANNs, the long short-term memory (LSTM) is mainly exploited to obtain anticipations for power output of wind turbines [8].

Besides, machine learning is also taken into account for to attain guesses on temperature and pressure of the weather. In this way future magnitudes of pressure and temperature of the air can be presumed. Information on the weather data projected for the future is significantly important, especially for the safe travel of airplanes and the ships. Namely, when the future conditions of the weather are known, it will guide all sea vehicles, air vehicles and land vehicles during their secure voyages. Weather predictions were executed depending on the time-series data obtained in historical data cluster, by Zaytar and Amrani. Deep neural network was considered in their study. They have shown the historical data estimations obtained in the form of time-series, carried out by the LSTM simulations have exhibited that the result accuracy was better than the accuracy of the results acquired by the conventional methods [9]. On the other hand, LSTM approximations were conducted to form the prediction data set of one-hour ahead, in the study of Prabha et al [10]. Three different machine learning approaches of ANFIS, comprising of FCM, SC, and GP methodologies, referring respectively to fuzzy c-means, subtractive clustering, and grid partitioning were together considered in the study of Benmouiza and Cheknane [11]. In the study, they have concluded FCM to give better results compared to SC and GP methodologies [11]. Besides, machine learning applications were even taken into account to obtain estimations for heat index map in Türkiye. In the study, it was demonstrated that the ANN tool outperformed the ANFIS [12]. A variety of different machine learning methods were considered in order to predict the aerodynamic coefficients, in the study of Tumse et al. [13]. The methods of FNN, ENN, and ANFIS were exhibited to accurately estimate the aerodynamic coefficients of the delta wind [13]. In the study of Tumse et al., output power of wind turbine was estimated by using a variety of soft computing models. Accordingly, it was reported that the ANFIS tool can be implemented in wind output power forecasts [14].

On the other hand, there are variety of studies dealing with the data predictions of the hydraulic phenomena. In this regards, Hewett et al. have considered a technique of machine learning in order to perform predictions for water flows in regional base for the lake of Okeechobee [15]. The lake has been exploited to purvey water to the south provinces of city of Florida and it has been chosen as the interested location for the study. On the other hand, the forecasts that were implemented for flood hydrography were also taken into consideration with the utilization of the ant colony optimization (ACO), by considering genetic algorithm (GA), through employing particle swarm optimization (PSO), as well as taking the artificial neural network (ANN) into account [16]. Besides, water flow predictions of rivers have been executed, utilizing the suggested models implementing RVM (relevance vector machine), in a study of Flake [17]. Also, in the estimation approaches, in addition to the RVM, the utilization of the learning machine of the probabilistic kernel-based has been actualized. Ultimately, Flake has concluded that a high precision can be acquired for obtaining estimations on the flows of river water, during the utilization of the RVM approaches [17]. In a study of Farhadi et al.; the support vector machine (SVM) has been proposed to be implemented safely as a technical method in obtaining anticipations of water flow in channels of straight composite structure [18]. In this study, they have shown that the statistical accuracy results obtained from this novel technique, used in comparisons were pretty ahead of the error outcomes of the conventional methods. Furthermore, in flow estimations for stream water, the ANN was also implemented. In such ANN applications, appropriate activation function as well as the correct hidden nodes were used to obtain a high accuracy flow forecasts [19]. They had demonstrated that during the implementation of the proper initial conditions and in the case of selecting correct adjustment parameters; on the forecasts of the flow of the river water, the performance of ANN predictions was significantly improved [19]. Additionally, in a model of flood hazard rating, the long short-term memory (LSTM) was suggested. The flood risk area, named as Samseong District was selected as the location of the LSTM study. Namely, in the study of Il Kim and Kim, appropriate learning algorithms for data predictions were aimed to be obtained for to identify the amount of the fall of the rain in the district that was reported to be risky for floods [20]. Another interested location was selected in Iraq, which is the Tigris river, in order to obtain

predictions for the flow rates of the river in terms of the discharge water flow. In the study, a variety of diverse prediction models were compared in terms of the performances, namely, the SVM, the extreme learning machine (ELM), plus the generalized regression neural network (GRNN) were compared based on the statistical accuracy outcomes. Accordingly, Yaseen et al. have exhibited that forecasts belonging to the ELM model have demonstrated superior prediction outcomes than the results of the other estimation models obtained from SVM and GRNN [21]. The learning algorithms were also exerted in obtaining flood detections in the runoff forecasts. In this context, Xiao et al. have used the extreme learning machine (ELM), the backpropagation (BP) network, the wavelet neural network (WNN), plus the generalized regression neural network (GRNN), to perform forecasts in this area [22]. In this regards, the flow rate of the water else the water level both were anticipated for the interested river of Xijiang. The predictions, in this study, were conducted based on the data measured at the station of Wuzhou, found on this river of Xijiang. Xiao et al. have reported that the superior anticipation outcomes were acquired by the models of GRNN, in the case of the stream flow, whereas, best predictions were obtained by WNN models, in the case of the level of the water, in which both were evaluated for flood detections [22].

As a novelty, in this study, the water volumetric flow rate was predicted, by a variety of machine learning algorithms, using the historical data of water flow, considering the Maritsa river. On the other hand, the data that has been used in the predictions has been acquired from the Svilengrad measurement station, located on this Maritsa river. Accordingly, four machine learning methods have been followed. The forecasts were done initially using the fuzzy c-means (FCM) algorithm of the adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS), followed by the subtractive clustering (SC) and grid partitioning (GP) of ANFIS, and finally, the long short-term memory (LSTM) method.

Knowing the future values of river water flow rate based on past time series data; enables some preliminary plans to be made with the predictions to be obtained within the framework of flow rates that have not yet occurred but are likely to occur. For example, the operation of hydraulic dams depends on the stable water flow. In this context, the early detection of deviations in the stable hydraulic flow rate of water flowing upstream to the water turbines located in the dam body concrete gains importance. With the large amount of historical water flow rate (WFR) data at hand, the computer learns with machine learning techniques which times of the year the decrease of the water flow rate eventuates, and in this direction, the times when the water flow will decrease can be determined in advance. And, accordingly, it can be reported that the energy provided to the grid will decrease; and it can be mentioned officially that alternative energy supply channels should be turned to. On the other hand, since the periods when excessive increases in flow rate can occur will be learned by the computer via the machine learning as a result of long-term analyses; necessary precautions can be taken to discharge this excess water without damaging the surrounding cities, villages and the fields, at times when even the flow of excess water from the spillway will not be sufficient. In this way, the utilization of the machine learning algorithms in water flow rate predictions will assist in helping water management, dam operations, and the flood prevention.

2. Material and Method

Figure 2 summarizes the boundary conditions of the research. The aim of the study is to obtain an output of water flow rate (WFR) time-series function, shown as function g(t) in the figure described as input parameter of time-series, demonstrated in the same figure with the function of f(t). The learning task of the f(t) function regarding the logic of every instantaneous WFR data was accomplished by machine learning tools including fuzzy c-means (FCM), subtractive clustering (SC), and grid partitioning (GP) of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), and besides by long short-term memory (LSTM) method, as indicated in Figure 2. This formed the methodology of the study.

On the other hand, the boundary conditions of these tools are explained in this figure. Namely, considering the FCM, the adjustments of $3 \leq HD \leq 10$ having $\Delta HD = 1$, and $2 \leq MFs \leq 10$ having $\Delta MFs = 2$; were implemented. Taking SC into account, the regulations of $3 \leq HD \leq 10$ having $\Delta HD = 1$, and $0.20 \leq IR \leq 0.28$ having $\Delta IR = 0.02$ as well as the case of $IR = 0.29$; were applied. When the GP algorithm was kept in view, the setting parameters included the cases of $3 \leq HD \leq 4$ having $\Delta HD = 1$, and $2 \leq MFs \leq 4$ having $\Delta MFs = 1$; were performed. On the other hand, when the LSTM was taken in cognizance of, the range for the number of the hidden layers (HL) was scaled to $5 \leq HL \leq 300$. More comprehensive explanations on these issues are provided in the following sub-sections. Using these setting parameters exerted to the input function of f(t), generated the output of g(t) function, and in this way, a total of 102 models were created. The error magnitudes between both functions were evaluated, checked and compared, using the error parameters including mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and the correlation coefficient (R), as also exhibited in Figure 2. And, detailed information on these error parameters are also given in the following sub-sections.

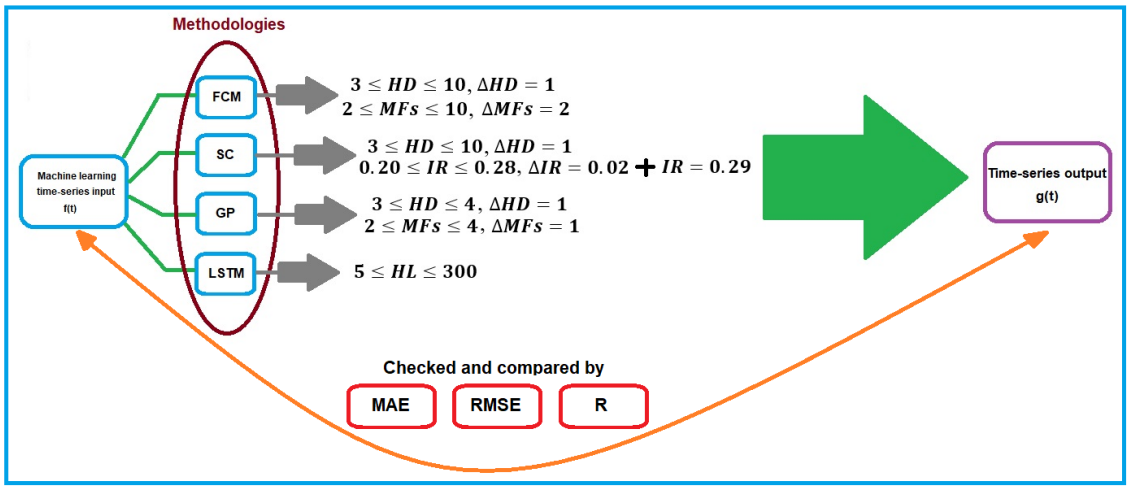


Figure 2. Boundary conditions of the research

2.1. Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)

The rapid computing algorithm that is used in all the World, namely, the adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) is known to be an accomplished universal predictor. It provides an intense set-up, also allows any desired accuracy degree. On the other hand, it can be handled for any type of real observed function, given in continuous form of data cloud. Fundamentally, when the capabilities of the neural learning affixed to the fuzzy systems of Sugeno-type, ANFIS which is referred to be a network statement, will be structured. The rules provided in the form of fuzzy if-then will be created having proper MFs (membership functions), formed from input towards the output, during the employment of the learning algorithm of the neural network. The fuzzy inference system (FIS) development procedure which implements the frame of the adaptive neural network is named as ANFIS [23, 24]. The general structure of the ANFIS is presented either in detail or superficially in the literature [25, 26].

2.1.1. Fuzzy c-means of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS-FCM)

Among different types of ANFIS, FCM is filing approach of ANFIS, permitting every data point to possess poly clusters and belong to different degrees of MFs. The essence of FCM consists of diminishing the target function. Information on FCM, similarly can be obtained from the literature [25, 26]. The FCM method is based on the minimization of the objective function, as shown in Eq. (1) [23, 24]:

$$J_m = \sum_{i=1}^{D}\sum_{j=1}^{N} \mu_{ij}^{m} \|x_i - c_j\|^2 \tag{1}$$

Here, in the above equation, the denotations of D and N, stand respectively for the amount of the data points else the clusters. On the other hand, the exponent of the fuzzy partition matrix is represented by the designation of m. The value of the m is greater than 1.

During forming the clusters, the initializing of the values of the cluster membership, μ_{ij} are performed randomly. Besides, the centers of the clusters are computed as indicated with the following equation:

$$c_j = \left(\sum_{i=1}^{D} \mu_{ij}^{m} x_i\right) / \left(\sum_{i=1}^{D} \mu_{ij}^{m}\right) \tag{2}$$

The following equation is considered for the update of μ_{ij}:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|}\right)^{\frac{2}{m-1}}\right]} \tag{3}$$

2.1.2. Subtractive clustering of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS-SC)

The method of SC takes each data point as a center of candidate cluster into account. Additionally, the calculation of the potential for every data point is actualized by density measuring of the data point surrounding the center of the cluster [11].

The index of the density, shown by the abbreviation of D_i, that corresponds to the data x_i, is determined utilizing below equation,

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|}{\left(r_a/2\right)^2} \right)^2 \quad (4)$$

The measurements of the density (x_i) for every data point are computed using equation,

$$D_i' = D_i - D_{c1} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_{c1}\|}{\left(r_b/2\right)} \right)^2 \quad (5)$$

2.1.3. Grid partitioning of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS-GP)

The method of GP allocates the space of the input data to rectangular subspace. In this division, a partition of axis-paralleled is used. The partition of each input is actualized by membership functions of identical shape. The amount of the rules of fuzzy if-then is identical to the value of M^n, here the n stands for the input dimension and the amount of the subsets for fuzzy partitions at each input variable corresponds to the value of M [11].

2.2. Long short-term memory (LSTM)

The method of LSTM was presented to the literature initially by Liu and Liu [27]. It is a type of recurrent neural network (RNN) which proposes solutions to problems through the addition of the cell states or the memory cells. However, this addition is executed with constant errors, in this way, the errors can be regenerated without having any disappear of the gradients. Furthermore, an LSTM consists of a total of three gates which are distinct. Among these three gates, the input gate is responsible of learning to protect the flow of constant error inside the memory cell, from inputs of unrelated type. Whereas, the output gate is responsible of learning to protect other units from storing of irrelevant memory content inside the memory cell. Terminally, learning how to control for the time duration of storing a value inside the memory cell, is accomplished by the forget gate [27].

The general structure of an LSTM is exposed schematically in Figure 3. This figure denotes X time-series flow having S-length with C properties, i.e., channels given along the layer of LSTM. Besides, in this figure, the output which is also referred to be the hidden state is abbreviated by the symbol of h_t, whereas, the status of the cell at a time step of t is curtailed by the symbol of c_t. In order to compute for the initial output as well as to update the status of the cell, the initial part of the LSTM is used to be considered for the initial status of the network as well as the former time-step of the series. At a time-step of t, this block of the LSTM utilizes the present status of the network, namely, c_{t-1} and h_{t-1} are used, as well as the following time step of the data set will be considered in order to compute for the output plus the updated status of the cell, i.e., the c_t will be reckoned according to knowledge received from former steps.

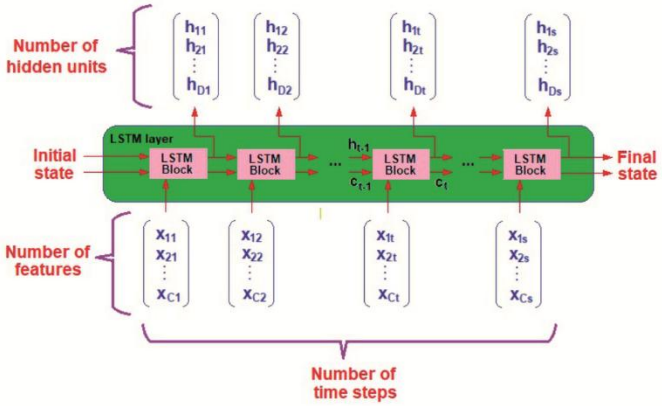


Figure 3. The schematic structure of layer of LSTM [28]

The layer state encloses the hidden state, which is also referred as the output state; else the status of the cell. At the time step of t of the hidden state, the output obtained from the LSTM layer at this time step will be included. The information extracted from the former time steps will be covered by the cell status. For every time step, the LSTM layer exerts the addition task of information on the cell status or carries out the duty of removing task of information from the cell status. The checking of such updates are handled by these introduced gates including the input gate, output gate, and the forget gate. In controlling of the cell status plus the hidden status of the layer, some constituents of the LSTM layer are utilized. Such as, in order to control the level for update of the cell status, the input gate, i operates, on the other hand, in order to check the level of cell status incorporated to the hidden status, the output gate, o performs the related task. Additionally, the grade of the reset of the cell status, that is referred as the forget of the cell is accomplished by the forget gate, f. Another gate is needed to be acquainted at this step. In this context, the instruction will be adjoined to the cell status by the cell candidate, g.

Furthermore, the data flow at a time interval of t is represented in Figure 4. How such gates including the forget gate, the update gate including the cell candidate and the input, as well as the output gate perform their tasks on the cell as well as on the hidden status, are indicated in this figure.

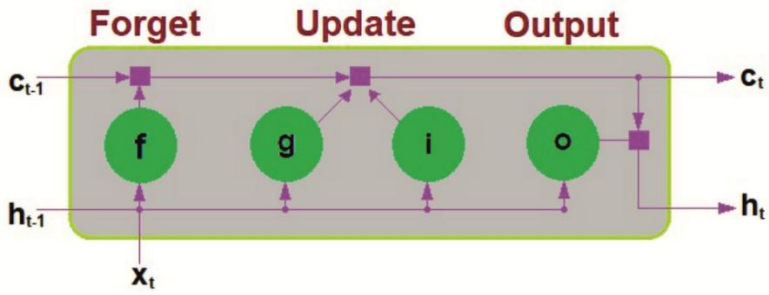


Figure 4. The data influx at a time interval of t

After LSTM gates are introduced, it is proper to introduce the weights assigned to these gates. The weights belonging to the input, shown by W, belonging to the recurrent, demonstrated by R, as well as the bias, indicated by b are referred to be the learnable weights for the layer of LSTM. Therefore, the concatenation of the matrices for those weight parameters of W, R, and b are exhibited in Eq. (6):

$$W = \begin{bmatrix} W_i \\ W_f \\ W_g \\ W_o \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_i \\ R_f \\ R_g \\ R_o \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_i \\ b_f \\ b_g \\ b_o \end{bmatrix} \tag{6}$$

In this equation, the input gate for the input weight, recurrent weight, and the bias is indicated by the subscript denotation of i, attached respectively to form W_i, R_i, and b_i. Whereas, the forget gate for the same weights and the bias is revealed by the subscript abbreviation of f, affixed respectively to constitute W_f, R_f, and b_f. The cell candidate given for the same weights and the bias is exhibited by subscript abridgement of g, annexed respectively to compose W_g, R_g, and b_g. Finally, the output gate which is called by the subscript symbol of o is used for the same weights as well as the bias, joined respectively to carve out W_o, R_o, and b_o. On the other hand, the status of the cell at the time step interval of t, is specified by Eq. (7);

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot g_t \tag{7}$$

Here, in Eq. (7), the product of the vectors provided in the form of element wise is indicated by the abridgment of $\odot$. Similarly, the status of the hidden layer, i.e., the h_t, at the time step interval of t is specified by Eq. (8),

$$h_t = o_t \odot \sigma_c(c_t) \tag{8}$$

In Eq. (8), the function for the state activation is indicated by the abbreviation of σ_c. Considering the management of the LSTM layer, by default, the state activation function is computed through the utilization of the function of the hyperbolic tangent. In Eq. (11), the relation of the cell candidate gate (g_t) at the time step of t is identified by the state activation function, σ_c. Following four equations describe the components at a time step of t, given for the formerly defined four gates [27]:

$$i_t = \sigma_g(W_i x_t + R_i h_{t-1} + b_i) \tag{9}$$

$$f_t = \sigma_g\left(W_f x_t + R_f h_{t-1} + b_f\right) \tag{10}$$

$$g_t = \sigma_c\left(W_g x_t + R_g h_{t-1} + b_g\right) \tag{11}$$

$$o_t = \sigma_g(W_o x_t + R_o h_{t-1} + b_o) \tag{12}$$

Taking Eqs. (9), (10), and (12) into account, the compendium of σ_g used in these equations, exhibits the function of the gate activation. These equations respectively characterize the input gate (i_t), the forget gate (f_t), and the output gate (o_t), at a time step of t. Besides, the LSTM layer utilizes the function of the sigmoid in order to compute the function of the gate activation. In this context, it is expressed by Eq. (13);

$$\sigma(x) = (1 + e^{-x})^{-1} \tag{13}$$

2.3. Statistical accuracy analysis

In the current study, the evaluation of the statistical accuracy was executed by the comparisons of the anticipation data with respect to the real observed counterparts and was achieved utilizing the mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), plus the coefficient of the correlation (R). Therefore, the precisions of these error criteria were controlled depending on the comparisons of the anticipations crosschecked against the real measured variables. Accordingly, Eqs. (14), (15), and (16) are considered for this purpose of statistical accuracy evaluation, corresponding respectively to MAE, RMSE, and R:

Mean absolute error (MAE):

$$MAE = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}|a(j) - r(j)| \tag{14}$$

Root mean square error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}[a(j) - r(j)]^2} \tag{15}$$

Correlation coefficient (R):

$$R = \left(\sum_{j=1}^{M}[a(j) - \bar{a}][r(j) - \bar{r}]\right) \Big/ \left(\sqrt{\sum_{j=1}^{M}[a(j) - \bar{a}]^2}\sqrt{\sum_{j=1}^{M}[r(j) - \bar{r}]^2}\right) \tag{16}$$

Here, *a(j)* and *r(j)*, exploited in three of the equations above, stand for the abbreviations of the anticipated instantaneous value as well as the real measured instantaneous value. On the other hand, the dashed abbreviations of those symbols respectively correspond to average value of the anticipated data cloud and the mean value of the real data cluster, given respectively as $\bar{a}$ and $\bar{r}$, and those were included only in Eq. (16). On the other hand, in order to call any instant data sample of both anticipated and real data clusters, the j indicator is utilized in three of the above equations, having a value analysis in the data set range of $1 \leq j \leq M$. Therefore, the summation signs employed in three of the above equations are already compatible with this data set range of $1 \leq j \leq M$. Finally, the cumulative amount of the data in these three equations is demonstrated by the curtailment of M.

Due to the nature of the estimation algorithms, it is not possible to obtain a perfect estimation on the actual observed values. Because, algorithms learn how the data shows a sequence by starting from the past data set and produce their own values by interpreting on this. While the data sequence is made regarding the produced estimation values, a mathematical relationship is created in between. As in the traditional linear and curvilinear regressions, in this context, it is not possible to produce estimation instantaneous values that perfectly overlap on the real instantaneous values. However, the aim here is to minimize the error values. In other words, bringing the statistical error values such as mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) closer to zero, and increasing the values such as the correlation coefficient (R) indicating the fit of the data closer to one, increases the quality of the estimation functions, in this frame. These improvements in error values can be achieved by increasing the total number of the historical data samples that is used in the data cluster for training of the

algorithms, by selecting the correct estimation algorithm, and by ensuring that the tuning parameters of the estimation algorithms are set to their correct values. Besides, if a prediction function is to be produced depending on the predicted output values defined according to certain physical input parameters; choosing the correct and sufficient amount of physical input parameters and the most effective ones that influence the correct prediction results of the output parameter, will also help to minimize the statistical error values. In such functions defined according to certain input physical parameters, while the situation regarding the wrong or excessive selection of physical inputs is sometimes expected to increase the quality of the prediction, on the contrary, it deteriorates the quality of the predictions.

3. Results

3.1. Interpretation of data and interested area location

The study was performed taking the hydraulic data of Maritsa river into account. In Turkish, this river name is provided with the word of Meriç, shown on Figure 5. Maritsa river is found in the northwest region of Türkiye and this river emerges in Bulgaria, gets in Türkiye via Bulgaria, then flows in the direction of Edirne province of the country and continues its route towards the Aegean Sea to be eventually poured to this sea. To provide further elaboration on this river route; Maritsa initially gets mixed with the Arda river, in the north of Edirne inside the purlieu of Türkiye. This new mixed river including the waters of both rivers is referred to be Maritsa, again. Later, at the south of Edirne, Tunca river joins with Maritsa. The new formed river including the waters received from three of them together is again named as a single river called Maritsa river. Finally, the Ergene river that is flowing from upstream north east direction to the downstream south west direction and Maritsa river formed previously from the constitution of the water flows of three rivers, are mixed in the rural of Adasarhanlı, that has a distance of thirty kilometers referenced to the İpsala city center. Before this final shuffle of Ergene river and the Maritsa river, Maritsa flows through downstream south direction by drawing the Turkish-Greek border for a long time. On the other hand, the volumetric water data utilized in this study has been acquired from the internet site of the 11th regional directorate of the institution of DSI. The DSI is a government agency of Türkiye that is occupied with most of the hydraulic issues of the country. Accordingly, the water flow data of the Maritsa river, used in the current study, has been acquired from the measurements taken from the Svilengrad measurement station, found on Maritsa river. This measurement station is situated in the Svilengrad town of Haskovo city of Bulgaria. It is situated at the border of Bulgaria, Türkiye, and the Greece. In this regards, Figure 4 presents the exact location of this interested area, taken into account for the RWFR simulations. In this figure, the Maritsa river is provided on the map and the Svilengrad measurement station seated on this river is demonstrated with a large pink circle. Besides, the other three rivers consisting of Arda, Tunca, and Ergene; all merging ultimately with the Maritsa, are clearly shown from their upstream paths flowing towards on their downstream paths.

All instantaneous data readings were read manually and daily, one by one, from the website of the Turkish DSI institution and those were transferred to the Excel program [29]. Thus, the real observed and measured water flow rate (WFR) data folder was created in this way, to which machine learning techniques were later implemented. After the application of the machine learning methods, the simulated estimated values were later added to this real data folder, and the real value function and the corresponding estimated functions were plotted on this data folder, and as a result, and ultimately, the compatibility and overlap between the predicted curves and their real counterparts were obtained using statistical error methods and the outputs of the current study were revealed. Namely, in this machine learning study, a cumulative of 1,465 daily measurements have been taken into account for the 102 models of the machine learning computations. On the other hand, the historical data covers the instantaneous time series distribution of past 4 years, considered as inputs to the machine learning methods. The data is related on the volumetric flow rate of the river water flow. In this measurement station, the measurement of the rate of the river water flow was usually performed twice in one day, that was executed at 08.00 as well as 16.00 o'clock.

In the daily measurements carried out twice a day, it was observed that there were not many sudden changes in the water flow values and therefore it is reported that the measurements during the day deviated from the average RWFR values by a small amount at most. On the strength of this situation, the study was started by taking arithmetic average of flow rate of the river, performed for each day; therefore, a new data set was created. Namely, a reconstituted data cloud for four years, including an average water flow data at each day was formed. On the other hand, the volumetric measurement data physical unit was m^3/s, as provided by this institution of DSI. Accordingly, the unit studied in the machine learning simulations was also materialized in this direction. Besides, a correct allocation of the data separated for training and testing of the algorithms was aimed to be compatible with the literature studies. In this frame, among the total of 1,465 daily average data, belonging to the new data cluster; while 80% of all was utilized to obtain the training of the ANFIS-FCM, SC, GP, and LSTM algorithms, the rest of 20% of the cumulative data set was used for testing of these same ANFIS and LSTM algorithms.



Figure 5. Svilengrad measurement station in the border of Türkiye and Bulgaria, situated on the Maritsa river

The whole data cluster considered in the study that includes the total of 1,465 data samples and which was allocated to two sub-clusters consisting of training data cluster and the testing data cluster parts, is demonstrated in Figure 6. In this regards, while the training data cluster is exhibited in this figure by yellow color, the testing data cluster is shown in the same figure by the black color.

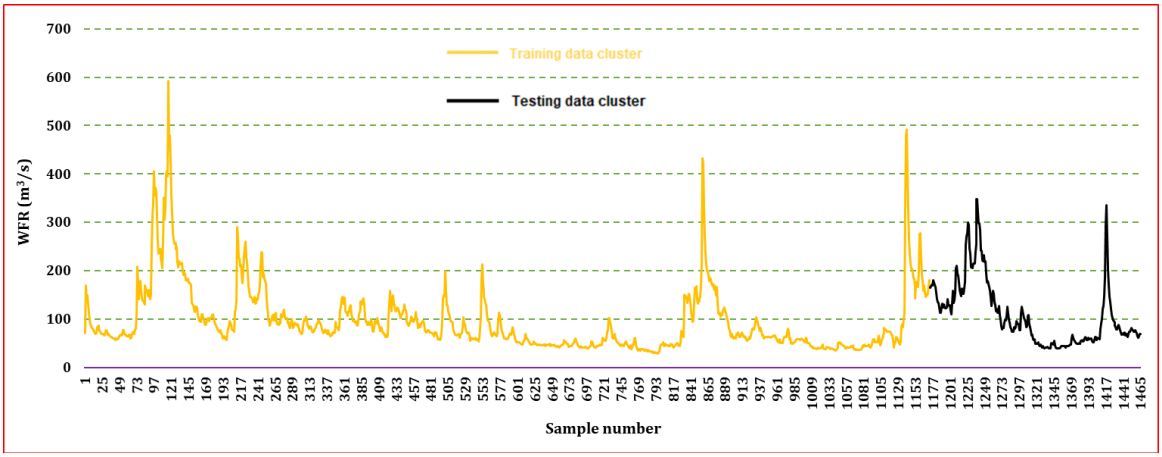


Figure 6. Training and testing allocations of WFR data

Table 1. Statistical information of the data cluster

Type of data	Information response
Smallest value of the cluster (m^3/s)	28.50
Greatest value of the cluster (m^3/s)	592.00
Arithmetic average value of the cluster (m^3/s)	98.50
Standard deviation (m^3/s)	67.83
Total number of data in the cluster (entire set-100%)	1,465
Total number of training data in the cluster (80% of the set)	1,172
Total number of testing data in the cluster (20% of the set)	293

Table 1 points the statistical information on the utilized data of all data cluster formed by the measurements performed in Svilengrad WFR measurement station. The amount of data samples considered in training of the machine learning algorithms correspond to 1,172, while the amount of data samples taken into account for testing of the machine learning algorithms equal to 293. On the other hand, the value range of all data samples is described by the relation of $28.50\ m^3/s \leq WFR \leq 592.00\ m^3/s$. The arithmetic average value of the data cluster, regarding 1,465 total observations correspond to the value of 98.50 m^3/s. The standard deviation which describes the total deviation of the values of the data samples from the mean normalized for a single sample, namely which indicates the mean deviation of the whole data cluster from the average value is also indicated in Table 1. In this context, it is concluded that the mean deviation of the whole data cluster from the average value is reported to be 67.83 m^3/s.

3.2. The applied forecasting methods

3.2.1. Fuzzy c-means (FCM) of ANFIS

Considering fuzzy c-means (FCM) analysis of ANFIS, the historical data (*HD*) considered during training of the tested models were altered in between 3 and 10, with 1 increment increase, applied to the former value to find for the trailing value of *HD*. Besides, 5 different number of MFs was tried for every value of the historical data (*HD*), and those were changed between 2 and 10, with 2 increment increase, implemented to the former value to find for the trailing value of MFs. Therefore, a cumulative of 40 different models were forged for the FCM algorithm of ANFIS, however the maximum epoch number was set to the same value of 100 for these 40 different FCM models. The parameters considered for set-up of the models including *HD*, MFs, and maximum epoch number as well as the output statistical accuracy results including MAE, RMSE, and *R* are indicated in Table 2.

The best outcome of every number of historical data (*HD*) has been represented utilizing bold format in Table 2, that is generally exhibiting the lowest values on the MAE as well as RMSE, whereas demonstrating the highest values on the *R*, i.e., the best result for every *HD* group is displayed by bold color. These cases of MAE, RMSE, and *R* for the best model of every *HD* group stand for the highest harmony of real and the forecasted data of the *HD* group in question, and offers the best correlation of the instantaneous scatter for the same *HD* group. On the other hand, the leading result of all bests for every historical data number utilized for training has been presented by simultaneous patterns of bold and italic color in this table. Besides, during the adjustment of *HD* to 3 as well as setting MFs at 8 have turned the best outcome for this number of *HD* value. Namely, MAE of 3.21 m^3/s, RMSE of 5.44 m^3/s, and *R* of 0.9967 was computed, at 3 *HD* and 8 MFs. On the other hand, when the number of the *HD* was set at 4, with the simultaneous adjustment of the value of the MFs to 2, given as the first rank of this *HD* group; has turned with the statistical error results of MAE, RMSE, plus *R* to correspond, respectively to 3.25 m^3/s, 4.88 m^3/s, and 0.9977, to be best reported for this *HD*=4. In the case of the *HD* to be arranged to correspond to 5 as well as when MFS was arranged to be 2; 3.13 m^3/s, 4.90 m^3/s, as well as 0.9978 values, were respectively computed for MAE, RMSE, plus *R*, to be reported as superior for the number of *HD*=5. Likewise, the *HD*=6 and MFs=2 have yielded 3.16 m^3/s for MAE, 4.97 m^3/s for RMSE, and 0.9975 for *R*, to be concluded as the best outcome for the historical data collimation of *HD*=6. Additionally, among five different MFs trials of *HD*=7; the best forecast outcome was acquired at MFs=2; resulting 3.17 m^3/s on MAE, 5.11 m^3/s on RMSE, and 0.9973 on *R*. As in the case of previous *HD* numbers except the regulation of *HD*=3, at the number of the historical data corresponding to *HD*=8, again the best statistical accuracy result was handled at MFs=2; namely, providing the statistical accuracy parameters of 3.25 m^3/s at MAE, 5.18 m^3/s at RMSE, and 0.9972 at *R*. Finally, the set of MFs=2 twice, in order for *HD*=9 and *HD*=10; have effectuated the superior outcomes for those historical data values. Accordingly, initially at *HD*=9, 3.38 m^3/s at MAE, 5.29 m^3/s for RMSE, and 0.9971 on *R* were obtained. Followed by, 3.48 m^3/s upon MAE, 5.65 m^3/s upon RMSE, and 0.9967 upon *R* have been achieved at *HD*=10. However, among these 8 different trials of *HD* and 5 different trials of MFs for every considered *HD* value; namely, among considered 8x5=40 models in the total, the best model in terms of the statistical errors were reported to correspond to the model arranged at the adjustments including 5 *HD* and 2 MFs, that have turned with the computing results to correspond to 3.13 m^3/s MAE, 4.90 m^3/s RMSE, and 0.9978 *R*. Under the light of these outcomes, while the best results corresponding to a certain value of MFs for each *HD* studied in between $3 \leq HD \leq 10$, except *HD*=5 were indicated with bold patterns in Table 2; however, since, *HD*=5 has generated the superior result among the other *HD* numbers, the statistical accuracy results for this *HD* value were exposed using the bold pattern plus the italic representation in this table to be distinguished from the others. Accordingly, in this wise, the best model for each *HD* was distinguished from the other four models in the *HD* group that is in question. On the other hand, the best model of Table 2 was also distinguished from the remaining 39 models.

Table 2. FCM algorithm results of ANFIS methodology

HD	MFs	Max epoch	MAE (m^3/s)	RMSE (m^3/s)	R
3	2	100	3.24	5.54	0.9969
	4	100	3.43	5.58	0.9966
	6	100	3.24	6.05	0.9959
	8	**100**	**3.21**	**5.44**	**0.9967**
	10	100	3.83	6.96	0.9947
4	**2**	**100**	**3.25**	**4.88**	**0.9977**
	4	100	3.25	5.65	0.9965
	6	100	3.48	5.70	0.9964
	8	100	3.96	7.44	0.9949
	10	100	4.40	7.70	0.9936
	2	***100***	***3.13***	***4.90***	***0.9978***
	4	100	3.22	5.88	0.9962

5	6	100	3.62	6.35	0.9955
	8	100	4.29	8.13	0.9938
	10	100	4.73	8.84	0.9917
6	**2**	**100**	**3.16**	**4.97**	**0.9975**
	4	100	3.34	6.13	0.9959
	6	100	5.58	9.88	0.9901
	8	100	4.53	8.47	0.9936
	10	100	5.54	9.84	0.9904
7	**2**	**100**	**3.17**	**5.11**	**0.9973**
	4	100	3.62	6.37	0.9955
	6	100	3.87	7.14	0.9944
	8	100	4.39	9.20	0.9923
	10	100	5.97	10.82	0.9894
8	**2**	**100**	**3.25**	**5.18**	**0.9972**
	4	100	4.04	7.00	0.9946
	6	100	3.95	7.28	0.9941
	8	100	5.17	10.16	0.9907
	10	100	5.81	11.73	0.9880
9	**2**	**100**	**3.38**	**5.29**	**0.9971**
	4	100	4.36	7.40	0.9939
	6	100	4.22	7.44	0.9939
	8	100	5.60	10.72	0.9895
	10	100	6.96	13.13	0.9849
10	**2**	**100**	**3.48**	**5.65**	**0.9967**
	4	100	4.25	7.16	0.9943
	6	100	4.49	7.88	0.9931
	8	100	5.48	10.62	0.9889
	10	100	7.11	13.87	0.9818

Figures 7 and 8 show the data distributions of the real data cloud simultaneously demonstrated with its counterpart of FCM anticipated data function and the correlation results of the instantaneous data readings indicated against the predictions, respectively. Furthermore, the average value of the FCM correlation outcome of the best result obtained among different values of *HD* and MFs trials, namely, corresponding to the statistical error results captured at 5 *HD* and 2 MFs, has been also exhibited in Figure 8, corresponding to the value of 0.9978 *R*. Both figures indicate the high compatibility of the real data versus its counterpart WFR anticipations. Namely, the anticipation function presented in Figure 7 with dashed black colored curve, overlaps on the real data cloud of continuous yellow colored curve, sufficiently and with a high quality. Besides, this situation is also observed from Figure 8, revealing the correlation scatter diagram of both actual and guess functions. Namely, all instantaneous data samples having two roots, one corresponding to the real data cloud, the other stands for the anticipated data cluster, are observed to be scattered all in the vicinity of the regression line, that is exhibited by dotted blue colored line. As well as, the regression line almost resembles the symmetry line of the real and predicted data axes.

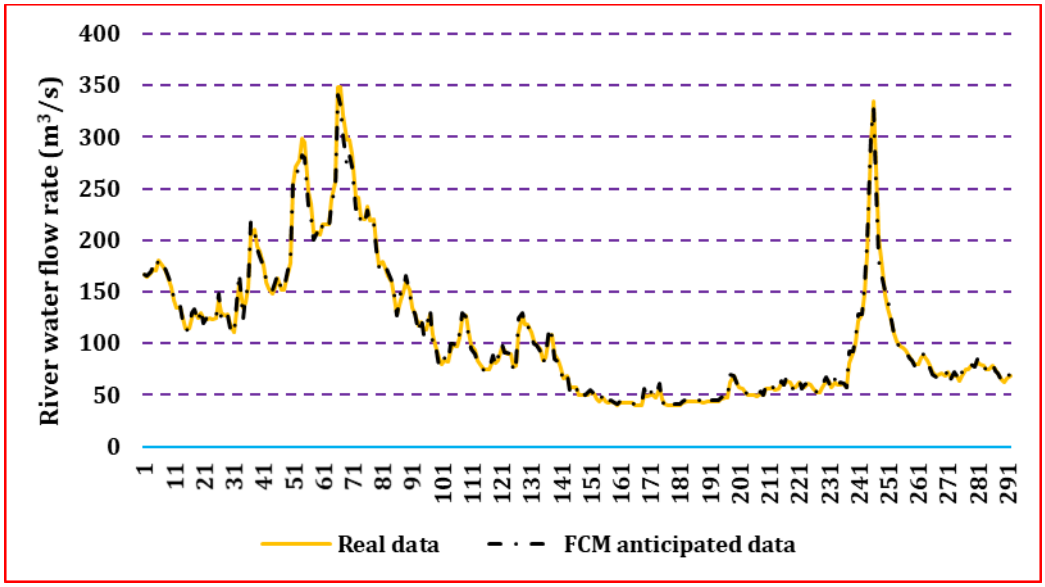


Figure 7. Real flow data (WFR) given according to FCM anticipations

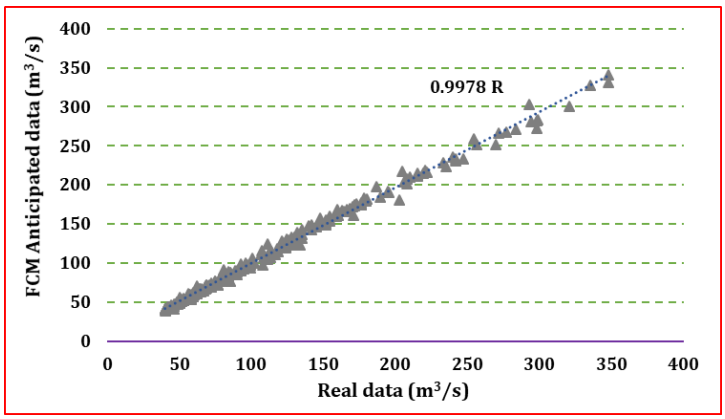


Figure 8. The FCM correlation scatter for water flow time-series

3.2.2. Subtractive clustering (SC) of ANFIS

The ANFIS subtractive clustering simulation results are brought in Table 3, in terms of the mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and the correlation coefficient. Selected number of historical data (*HD*) at training of the models was considered in the value range of 3 and 10, again by 1 increment realized to the previous value to call for the following selected number of *HD*. Additionally, six different influence radius (*IR*) values were studied for every selected number of historical data in SC algorithm. The tested influence radius (*IR*) values for every number of *HD* were chosen to fall within the range of 0.20 and 0.29, and to describe the ensuing *IR* value, the relation $IR_{next} = IR + 0.02$ was used, except for the relation between last two ones described by $IR_{next} = IR + 0.01$. In this way, a cumulative of 8x6=48 models were created, and the epoch number was bound to same value of 100. The algorithm adjustment parameters including the selected number of historical data (*HD*) used for training of the algorithm, influence radius (*IR*) values, and the maximum epoch number, as well as the statistical accuracy error results including MAE, RMSE, and *R* are all shown for different models in Table 3.

In Table 3, the best outcome of every *HD* number of SC method is denoted by only bold color, whereas, the best result of the bests is depicted by simultaneous usage of bold color and italic pattern in this table. In this context, the superior result of all trials was produced during the adjustment of *HD*=4 and *IR*=0.20. The model generated at these adjustments as well as at 100 epoch number turned the statistical accuracy error results of MAE, RMSE, and *R*, corresponding to 3.04 m³/s, 4.91 m³/s, and 0.9979, respectively. On the other hand, the other good results one step below the best result, that is, the best results for each *HD* number, were obtained as follows, and those are indicated in Table 3 using bold color: Namely, at *HD*=3 and *IR*=0.20, statistical accuracy outcomes of 3.05 m³/s MAE, 4.94 m³/s RMSE, and 0.9979 *R* were achieved, as the best output of the selected number of historical data (*HD*) used for training corresponding to 3. Besides, 3.04 m³/s MAE, 5.06 m³/s RMSE, and 0.9978 *R* were acquired at 5 *HD* and 0.22 *IR*, and this model was reported to be the best model of *HD*=5 models. Considering six different models of *HD*=6 model series, MAE, RMSE, and *R* corresponding to 3.11 m³/s, 5.07 m³/s, and 0.9978 were attained at 0.26 *IR*, and this model was concluded to be the best model of these *HD*=6 models. Statistical error results of 3.21 m³/s, 5.07 m³/s, and 0.9979 *R* were reached as best model at *IR*=0.20, respectively for MAE, RMSE, and *R* error values, at *HD*=7 model series. Taking six different models of *HD*=8 into account, it was concluded that the best model was obtained during the regulation of the influence radius either to *IR*=0.20 and *IR*=0.22, that eventuated 3.22 m³/s MAE, 5.08 m³/s RMSE, and 0.9981 *R*. The number of *HD* and *IR*, respectively set to 9 and 0.24, caused the best model having 3.33 m³/s MAE, 5.32 m³/s RMSE, and 0.9978 *R*. Last group of SC models including six models formed at 10 *HD*, resulted the best model for this group at 0.22 *IR*, generating 3.36 m³/s MAE, 5.38 m³/s RMSE, and 0.9977 *R*.

Table 3. SC algorithm results of ANFIS methodology

HD	IR	Max epoch	MAE (m³/s)	RMSE (m³/s)	R
3	**0.20**	**100**	**3.05**	**4.94**	**0.9979**
	0.22	100	3.08	4.97	0.9978
	0.24	100	3.10	4.98	0.9977
	0.26	100	3.10	4.99	0.9977
	0.28	100	3.09	4.98	0.9977
	0.29	100	3.11	5.00	0.9977
4	***0.20***	***100***	***3.04***	***4.91***	***0.9979***
	0.22	100	3.04	4.92	0.9979
	0.24	100	3.03	4.92	0.9979

	0.26	100	3.04	4.93	0.9979
	0.28	100	3.07	4.95	0.9978
	0.29	100	3.05	4.94	0.9978
5	0.20	100	3.06	*5.06*	*0.9978*
	0.22	**100**	**3.04**	**5.06**	**0.9978**
	0.24	100	3.04	5.07	0.9977
	0.26	100	3.03	5.07	0.9977
	0.28	100	3.02	5.08	0.9977
	0.29	100	3.02	5.08	0.9977
6	0.20	100	3.14	5.07	0.9978
	0.22	100	3.13	5.08	0.9978
	0.24	100	3.12	5.08	0.9978
	0.26	**100**	**3.11**	**5.07**	**0.9978**
	0.28	100	3.15	5.12	0.9977
	0.29	100	3.14	5.10	0.9977
7	**0.20**	**100**	**3.21**	**5.07**	**0.9979**
	0.22	100	3.24	5.06	0.9979
	0.24	100	3.19	5.11	0.9978
	0.26	100	3.20	5.11	0.9978
	0.28	100	3.22	5.10	0.9978
	0.29	100	3.22	5.10	0.9978
8	**0.20**	**100**	**3.22**	**5.08**	**0.9981**
	0.22	**100**	**3.22**	**5.08**	**0.9981**
	0.24	100	3.24	5.11	0.9980
	0.26	100	3.26	5.15	0.9979
	0.28	100	3.28	5.25	0.9976
	0.29	100	3.29	5.25	0.9976
9	0.20	100	3.41	5.47	0.9973
	0.22	100	3.41	5.46	0.9973
	0.24	**100**	**3.33**	**5.32**	**0.9978**
	0.26	100	3.34	5.35	0.9977
	0.28	100	3.40	5.45	0.9974
	0.29	100	3.40	5.47	0.9973
10	0.20	100	3.32	5.39	0.9976
	0.22	**100**	**3.36**	**5.38**	**0.9977**
	0.24	100	3.44	5.48	0.9974
	0.26	100	3.45	5.50	0.9974
	0.28	100	3.37	5.38	0.9976
	0.29	100	3.42	5.45	0.9974

The mutual data distributions which consist of the actual data function given with respect to the counterpart SC anticipations are reported in Figure 9. On the other hand, the correlation scatter of the real data versus the predictions is demonstrated in Figure 10 for the forecasts obtained using the SC algorithm. The simulation results with reference to these computations, namely, the best SC outcome that was obtained as soon as the SC adjustment parameters were set to 4 for *HD*, 0.20 for *IR*, and maximum epoch of 100, and that has resulted the statistical accuracy results of 3.04 m^3/s MAE, 4.91 m^3/s RMSE, and 0.9979 *R*, are shown in these two figures. On the other hand, the mean value of the correlation coefficient (*R*) is also pointed in Figure 10, to correspond to the value of 0.9979 *R*. In both Figures of 9 and 10, the best SC prediction concordance of WFR on the factual observed WFR counterparts are observed. The function of the forecast shown in this Figure 9, utilizing the curve of red color and dashed type, face coincidently the actual measured WFR function, which is shown in the same figure, using the curve of purple color and continuous type. Additionally, this case is also monitored in Figure 10, in which the figure stands for the scatter data distributions of actual and forecast instantaneous data. These instantaneous data distributions which each represent the actual reading on the *x*-axis versus the predicted virtual reading on *y*-axis are scattered so close to the regression line, that is demonstrated by the dotted burgundy colored line. Similarly, regression line also serves as the symmetric line of the data axes including the real and the forecast readings.

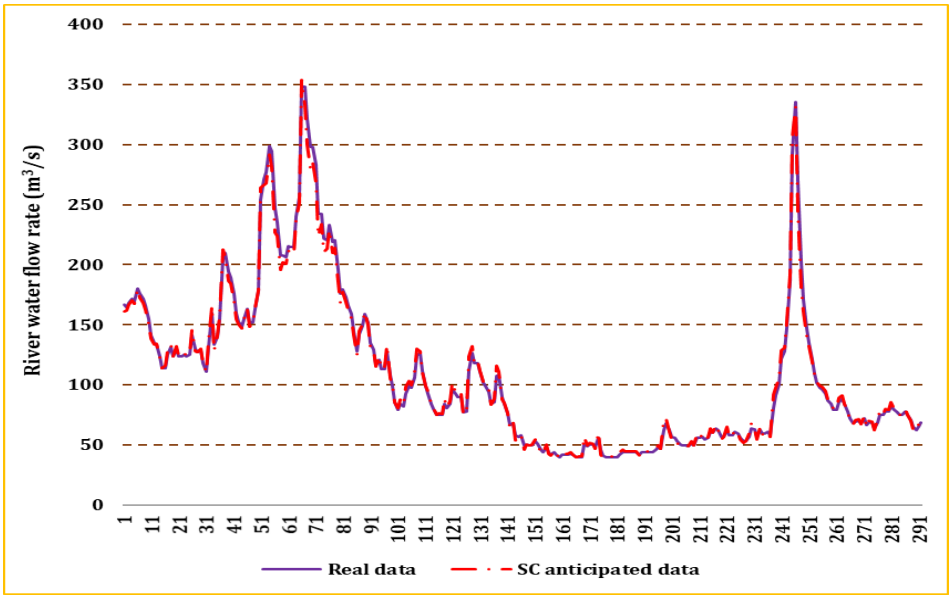


Figure 9. Real flow data (WFR) given according to SC anticipations

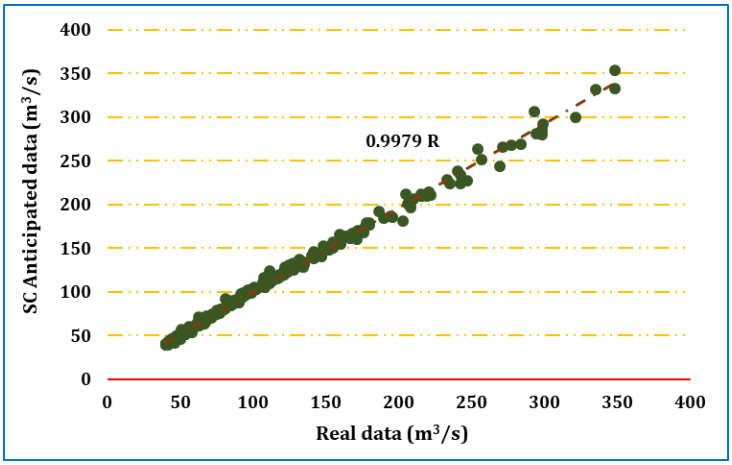


Figure 10. The SC correlation scatter for water flow time-series

3.2.3. Grid partitioning (GP) of ANFIS

The simulation outcomes of grid partitioning (GP) tool of ANFIS are given in Table 4. Similarly, in this table, the statistical error displays are given in terms of the parameters including the mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and the correlation coefficient. However, during the GP training stages of the models, the number of the historical data (*HD*) was selected at a narrow range, such as it was considered to be in the value range of $3 \leq HD \leq 4$. Accordingly, two *HD* values were studied in this value range of *HD*, including *HD*=3 as well as *HD*=4. Intercalary, the number of the membership functions (MFs) was studied in the value range of $2 \leq MFs \leq 4$, for *HD*=3; whereas, the number of the membership functions (MFs) was taken into account in the value range of $2 \leq MFs \leq 3$, for *HD*=4. In this way, three models for *HD*=3, plus two models for *HD*=4 were constituted, making a total of five models for GP of ANFIS. In order to reduce the computation time of the models, the epoch number was uniformed to the constant value of 30 for all models. On the other hand, the algorithm tuning parameters including the chosen number of historical data (*HD*) considered for algorithm training, the amount of the membership functions (MFs), and also maximum epoch numbers, as well as the error results for statistical accuracy parameters involving MAE, RMSE, and *R* are demonstrated in total in Table 4.

The best result of each *HD* number of GP method is indicated with the utilization of the bold pattern, besides, the best result of the bests is signified by together usage of bold and italic patterns simultaneously in Table 4. In this regards, the upper result of five computation trials was generated at the arrangement of the number of historical data (*HD*) and the number of the membership functions (MFs), respectively to correspond to 3 and 2. The model that was achieved at these arrangements and at the tuning of 30 epoch number accomplished the error results of the statistical parameters encapsulating 3.53 m^3/s, 5.79 m^3/s, and 0.9964 *R*. Likewise, the other good outcome being one step below the superior result, namely, the best result obtained at the number of *HD*=4 that is presented in Table 4 using bold color, has given statistical accuracy results of 7.70 m^3/s, 21.48 m^3/s, and 0.9501 *R*.

Table 4. GP algorithm results of ANFIS methodology

HD	MFs	Max epoch	MAE (m^3/s)	RMSE (m^3/s)	R
3	***2***	***30***	***3.53***	***5.79***	***0.9964***
	3	30	15.15	79.75	0.5919
	4	30	76.84	502.00	0.1246
4	**2**	**30**	**7.70**	**21.48**	**0.9501**
	3	30	98.30	618.61	0.1499

Visual monitor of the GP results given in Table 4 is exposed in Figure 11, for the function of the WFR forecasted data versus the counterpart function of the real measured WFR data. Moreover, the scatter of correlations of the actual data function given with respect to the forecasts is manifested in Figure 12, regarding the GP outlooks. The best outcome of the simulations considering these computations, i.e., the topnotch GP result that was acquired during the GP arrangement parameters were set to 3 *HD*, 2 MFs and 30 maximum epoch, and which has eventuated the statistical errors of 3.53 m^3/s MAE, 5.79 m^3/s RMSE, and 0.9964 *R*, are disclosed in these Figures of 11 and 12. Extra, the average value of the correlation coefficient (*R*) for this best model can withal be monitored in Figure 12, namely, the figure presents the value of 0.9964 *R* attached on it. In these two figures, the best GP harmony of WFR forecasts given on the authentic measured WFR counterparts are visualized.

The forecast function that is depicted in Figure 11 uses the color of purple being in the style of dashed format, whereas the real data function that is shown in the same figure utilizes the color of yellow being in the style of continuous form. Although the success of tracking capability of the forecast function on the real data function is not as successful as the former models of FCM and SC of ANFIS, it is still concluded that the GP forecast function tracks the real data function with a high success and performance. In addition to this situation, the similar conclusion can also be derived from Figure 12 which demonstrates the data disperse of the real observation versus the forecasted instantaneous WFR data. The WFR data scatters given in instantaneous form, represent the *x*-axis reading to correspond to real data, whereas, the *y*-axis reading to correspond to predictions, are generally close to the regression line, which is exhibited by the dotted red colored line. But, due to relatively lower value of the mean correlation coefficient corresponding to 0.9964 *R*; especially considering the sample number increase over the value of 200 has caused somewhat more deviations from the regression line.

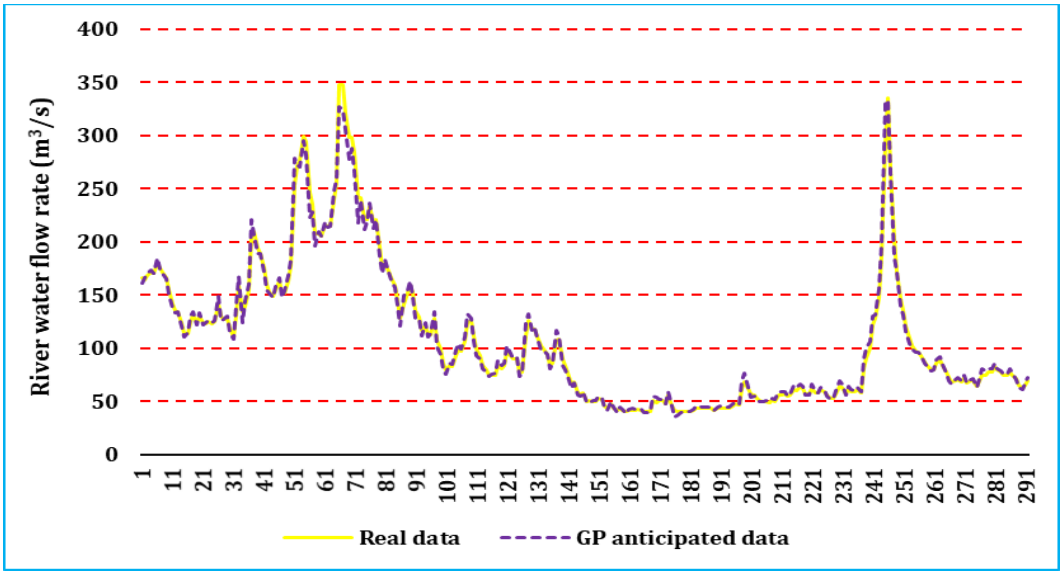


Figure 11. Real flow data (WFR) given according to GP anticipations

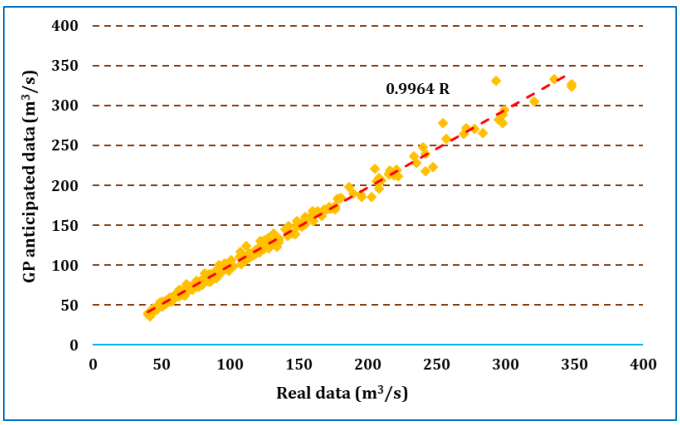


Figure 12. The GP correlation scatter for water flow time-series

3.2.4. Long short-term memory (LSTM)

Furthermore, the statistical accuracy outcomes of LSTM algorithm have been signified in Table 5. In this regards, the hidden layer (*HL*) was investigated in the range of $5 \leq HL \leq 300$. Since, the computation time of LSTM models was shorter and therefore LSTM turned the forecast results of the examined models so rapidly, the maximum epoch number was arranged to a constant of 300, as revealed in Table 5, in order to obtain more converging results. Due to this situation, the maximum epoch number of LSTM was chosen to be higher than the maximum epoch number of ANFIS algorithms. As pointed out in Table 5, a total of 9 different LSTM models were constituted. Interesting results were captured from LSTM models, in terms of the statistical error values. The minimum, namely the best MAE result was obtained when the *HL* was arranged to 10, which resulted 3.29 m^3/s MAE. Besides, again the minimum, i.e., the superior RMSE outcome was acquired during the adjustment of *HL* to 5, that generated 5.44 m^3/s RMSE. And, ultimately, the maximum, thus the strongest correlation coefficient (*R*) was produced as long as the number of the *HL* was set to 75. This value of *HL* calibration has propagated the correlation coefficient at 0.9990 *R*. Namely, in a total of 3 different cited models, every model has turned with only one best statistical accuracy parameter, among 3 different statistical accuracy parameters including MAE, RMSE, and *R*, taken into account in model comparisons. For this reason, among these three models including *HL*=5, *HL*=10, and *HL*=75, that could not be decided in terms of the superiority, two among three were chosen randomly and continuously, and a decision was made. Following this approach initially, the comparison was conducted regarding the models that were formed with regards to the number of *HL*=5 and *HL*=10. While MAE result of *HL*=10 model, which is 3.29 m^3/s was concluded to be smaller, so better than the MAE of *HL*=5 model, that is 3.38 m^3/s; whereas, the RMSE and *R* results of *HL*=5 model were reported to be superior than *HL*=10 model. Namely, RMSE of *HL*=5 model was computed as 5.44 m^3/s, being smaller and better than RMSE outcome of *HL*=10 model, being 6.01 m^3/s, as well as the correlation coefficient (*R*) of *HL*=5 model was determined as 0.9968, being bigger and so superior than the correlation coefficient (*R*) result of *HL*=10 model, being 0.9961. All in all, since two statistical accuracy parameters among three were observed to be better on the behalf of model having the number of *HL*=5, during the comparison stage of models of *HL*=5 and *HL*=10; it was concluded that model of *HL*=5 was better than model of *HL*=10. In the following situation and in a similar approach, model of *HL*=5 and model of *HL*=75 were compared. Accordingly, in the second stage of comparison for these two models, MAE and RMSE outcomes of *HL*=5 model was computed and thus reported to be smaller and better than MAE and RMSE results of *HL*=75 model. Although correlation coefficient (*R*) result of *HL*=75 model is bigger and better than the correlation coefficient (*R*) outcome of *HL*=5 model, it was reported that *HL*=5 model has satisfied better accuracy in terms of two statistical error values among total of three, compared with *HL*=75 model, therefore reported to be better than *HL*=75 model. Ultimately, because of determining and reporting that model of *HL*=5 better than models of *HL*=10 and *HL*=75; no comparison was needed thus conducted between the number of *HL*=10 and the number of *HL*=75 models, and eventually, the model generated during the adjustment of the number of hidden layer at *HL*=5 has been concluded to be the superior result of 9 trials, executed during LSTM computations. In this regards, the best LSTM result of *HL*=5 generating MAE, RMSE, and *R*, respectively to 3.38 m^3/s, 5.44 m^3/s, and 0.9968 *R*, has been denoted by the utilization of bold pattern in Table 5.

Table 5. LSTM algorithm results

HL	Epoch number	MAE (m^3/s)	RMSE (m^3/s)	R
5	**300**	**3.38**	**5.44**	**0.9968**
10	300	3.29	6.01	0.9961
25	300	6.83	13.26	0.9872
50	300	8.24	19.10	0.9757
75	300	6.09	11.00	0.9990

100	300	8.73	15.13	0.9777
125	300	7.49	12.84	0.9824
150	300	9.53	19.53	0.9642
300	300	9.63	18.65	0.9687

As in the case of former computations, Figures 13 and 14, respectively denote the data dispersions of the actual data cloud simultaneously shown against the counterpart of LSTM prediction data function and the correlation outcomes of the instantaneous data observations revealed with respect to the estimations. Furthermore, the mean value of the LSTM correlation result (*R*) of the superior outcome captured among diverse values of the number of *HL*, corresponding to the statistical accuracy outcomes generated at 5 *HL*, has been withal exposed in Figure 14, corresponding to the value of 0.9968 *R*. These two figures indicate the high rapport of the actual data given according to its counterpart guesses. In this regards, the prediction function displayed in dashed black colored curve presented in Figure 13, is sufficiently coincident on the real data cloud signified in continuous yellow colored curve, therefore, this situation points a high quality of data estimations. This case is also seen from Figure 14, which demonstrates the correlation scatter scene of both data series. Namely, all instantaneous data samples that have two roots, one corresponding to the actual data cluster, the other pointing for the WFR data estimations, are observed to be scattered whole close to the regression line. Also, this regression line drawn in the form of dotted blue colored line almost behaves again as a symmetry line of the measured and anticipated data axes.

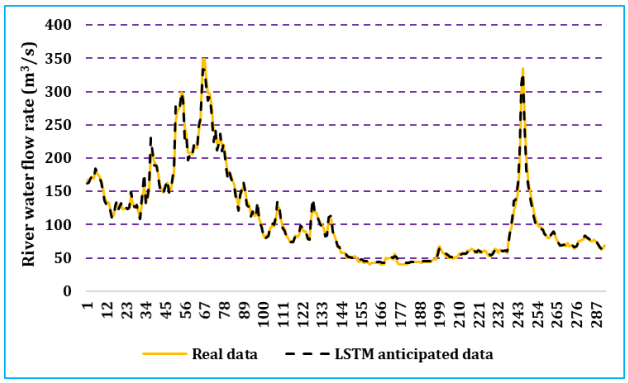


Figure 13. Real flow data (WFR) given according to LSTM anticipations

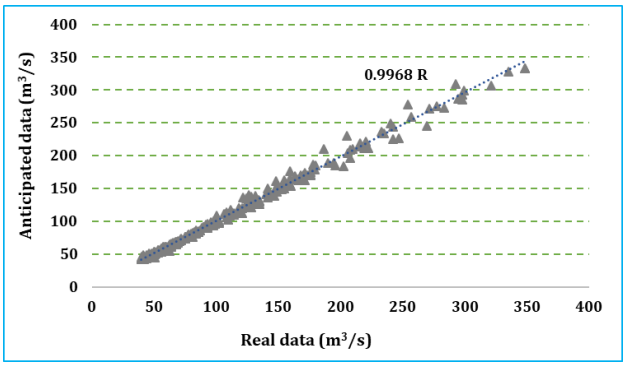


Figure 14. The LSTM correlation scatter for water flow time-series

3.2.5. The comparison of the applied methods

These implemented methods are not based on the experimental observations and historical data files including certain physical parameters that were created using observations obtained by past experimental methods are used in simulations. Namely, the data input considered in the simulations for future estimations are formed as past historical time-series data of the considered physical parameter. For this reason, these methods provide estimates for the very near future and cannot predict very accurately the distant future from the current time. In order to estimate more distant times with these methods, a second estimate will need to be derived from the near future estimates that are obtained by the simulations, which will increase the added error rate.

In the final stage, a comparison was subjected between the prediction capability of FCM, SC, GP of ANFIS and LSTM. In this context, the model generated during the calibration of the number of *HD*=4 and *IR*=0.20 for SC algorithm has been compared with respect to the models formed as soon as the number of *HD* and MFs were set respectively to 5 and 2 considering FCM algorithm, the number of *HD* and MFs were adjusted respectively to 3 and 2 keeping in view the GP algorithm, and the number of *HL* was arranged to 5 regarding LSTM methodology. Eventually, it

was concluded that 3.04 m^3/s MAE, 4.91 m^3/s RMSE, 0.9979 R outcomes of SC were ahead in quality of 3.13 m^3/s, 4.90 m^3/s, 0.9978 R of FCM, 3.53 m^3/s, 5.79 m^3/s, 0.9964 R of GP, and 3.38 m^3/s, 5.44 m^3/s, 0.9968 R of LSTM. Namely, it was concluded and demonstrated that the statistical accuracy outcomes of MAE and RMSE on the behalf of SC were smaller and better than these statistical error results of FCM, GP, and LSTM, as well as, similarly, has been exhibited that the correlation result of R on the behalf of SC was bigger and superior than this correlation outcome of R of FCM, GP, and LSTM. This scene has been better observed and therefore concluded from the comparison of Figure 9 of SC with Figures 7 of FCM, 11 of GP, and 13 of LSTM.

4. Discussion and Conclusion

ANFIS and LSTM models generally have a structure that has a good learning capability and they easily perceive the harmony between instantaneous measurement data samples. When the number of historical data used is sufficient and in the case when there is no discontinuity in the real observed data function, the prediction data function usually predicts the real data function with a very high success. The situations when the prediction function may fail can be summarized as the case involving of very sudden fluctuations in the data values and the case of frequent very high data magnitude changes occurring between the ensuing data values. River flow velocities also generally show smooth and soft changes throughout the year, except for flash floods. In winter, in cases of snow and rain, there is an increase in the river flow rate depending on the total amount of the water quantity available in the river bed, but this increase usually does not occur so suddenly and the flow rate increases in a gradual form. Similarly, the decrease in the water flow rate, which decreases in the summer, also occurs gradually. Considering these reasons, the mentioned prediction algorithms can generally be easily applied to different rivers, and different and various hydrological conditions.

During training of the models, the considered four-year dataset was reported to be pretty sufficient in model training, since the magnitudes of the MAE and RMSE were taken down below the values of 3.10 m^3/s and 4.95 m^3/s, respectively for those error parameters. Namely, taking a water flow rate (WFR) dataset found in the range of $28.50\ m^3/s \leq WFR \leq 592.00\ m^3/s$ into account, these error rates are reported to be quite low. Similarly, when the correlation coefficient (R) result of the best model was considered, namely the value of R=0.9979 is reported to be rather high, approaching so close to the maximum value of R=1. On the other hand, the case of selecting or using a longer dataset can bring significant improvements in the training of the model, thus the accuracy of the implemented models may increase. In other words, examining the river flow regime over a longer period of time allows the computer to better learn the logic of how the river water flow rate behaves and the algorithm established by the computer, in this direction, can be better formed. As a result, learning the future water flow rates that have not yet occurred, using a larger number of past historical data can lead to more precise predictions of future water flow rates. However, the past historical dataset, which includes four years of water flow rate data of the current study, is still capable of providing a high success in estimating the future water flow rates, and thus offers a qualified forecast model.

In this study, as a novelty, the water flow rate was predicted, which is seldom seen in the literature, with four different machine learning algorithms, including methods of ANFIS-FCM, ANFIS-SC, ANFIS-GP, and LSTM. Accordingly, a total of 102 different models were created in large number by changing the tuning parameters of the relevant algorithms. In the generated models, the parameters that have a direct impact on the forecast performance, such as the number of the historical data used in algorithm training (*HD*), membership functions (MFs), radius of influence (*IR*) and the number of the hidden layers (*HL*), were altered and the best prediction model was obtained by the evaluation of the estimations due to the statistical error parameters, and thus, the results were reported. In short, applying these four algorithms together to water flow rate (WFR) estimation, considering these mentioned tuning parameters, will fill this gap in the literature.

In this present study, the volumetric rate of water flow (WFR) predictions of Maritsa River was performed, using the past time-series historical data of the water flow measurements of this river; considering fuzzy c-means (FCM), subtractive clustering (SC), grid partitioning (GP) algorithms of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS), plus the neural network of long short-term memory (LSTM). In this regards, in the context of FCM computations, a total of 40 different models at different number of historical data (*HD*) utilized for training values as well as different MFs values were tried, considering SC simulations, a cumulative of 48 distinct models at different number of *HD* and influence radius (*IR*) were tested, taking GP modelling into account, an aggregate of 5 discrete models at different *HD* and MFs were studied, finally, a whole of 9 distinct models at different *HL* numbers were operated for LSTM algorithm computations. Based on these 102 different model computations, although it was obtained and reported that the results indicate more or less similar outcomes in terms of the statistical accuracy errors; on the other hand, SC results have indicated slightly better and more quality prediction data distributions compared to the actual observed volumetric water flow rate (WFR) data of these measurements captured from Svilengrad water measurement station, that is seated on the Maritsa river. Besides, the statistical accuracy parameters that

were taken into account to obtain model comparisons were mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), additionally, the correlation coefficient (*R*).

The mentioned best model of SC has procreated statistical accuracy results of 3.04 m^3/s on MAE, 4.91 m^3/s at RMSE, and 0.9979 for *R*, that is reported to be the leader among the total tested 102 models generated at different selected number of historical data considered for training values (*HD*), different membership function (MFs) values, discrete influence radius (*IR*) values, and distinct hidden layer (*HL*) values. Furthermore, the correlation result of this value reaching to 0.9979 *R*, and therefore quite converging to the unity value 1, implies that the functional distribution of the prediction function of this model almost perfectly resembles the functional distribution of the real measured past time-series of river water flow rate (WFR) data. In this regards, it was concluded that SC algorithm of ANFIS can be safely and quickly implemented on obtaining accurate estimations on future water flow rate (WFR) values of the river water flow.

In predictions of volumetric flow rate of rivers, different machine learning and artificial intelligence techniques are aimed to be studied, as future studies. In this way, the performance and the estimation qualities of the applied methods can be compared in a wider range, and the one having the highest prediction capability can be suggested to the literature as a novel technique.

References

[1] Lurwan, S. M., Mariun, N., Hizam, H., Radzi, M. A. M., Zakaria, A. 2014. Predicting Power Output of Photovoltaic Systems with Solar Radiation Model. 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 1-3 December, Kuching, Malaysia, 304-308.

[2] Oruç, E. N. 2021. Yapay sinir ağları kullanılarak kısa süreli güneş enerjisi tahmini. İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[3] Theocharides, S., Makrides, G., Georghiou, G. E., Kyprianou, A. 2018. Machine Learning Algorithms for Photovoltaic System Power Output Prediction. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 3-7 June, Limassol, Cyprus, 1-6.

[4] Scott, C., Ahsan, M., Albarbar, A. 2023. Machine Learning for Forecasting a Photovoltaic (PV) Generation System. Energy, 278, 127807.

[5] Gaboitaolelwe, J., Zungeru, A. M., Yahya, A., Lebekwe, C. K., Vinod, D. N., Salau, A. O. 2023. Machine Learning Based Solar Photovoltaic Power Forecasting: A Review and Comparison. IEEE Access, 11, 40820-40845.

[6] Liu, H., Tian, H., Li, Y. 2015. An EMD-recursive ARIMA Method to Predict Wind Speed for Railway Strong Wind Warning System. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 141, 27-38.

[7] Kavasseri, R. G., Seetharaman, K. 2009. Day-ahead Wind Speed Forecasting Using f-ARIMA Models. Renewable Energy, 34(5), 1388-1393.

[8] Zhang, J., Yan, J., Infield, D., Liu, Y., Lien, F. 2019. Short-term Forecasting and Uncertainty Analysis of Wind Turbine Power Based on Long Short-term Memory Network and Gaussian Mixture Model. Applied Energy, 241, 229-244.

[9] Zaytar, M. A., Amrani, C. E. 2016. Sequence to Sequence Weather Forecasting with Long Short-term Memory Recurrent Neural Networks. International Journal of Computer Applications, 143(11), 7-11.

[10] Prabha, P. P., Vanitha, V., Resmi, R. 2019. Wind Speed Forecasting Using Long Short Term Memory Networks. 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), 5-6 July, Kannur, Kerala, India, 1310-1314.

[11] Benmouiza, K., Cheknane, A. 2019. Clustered ANFIS Network Using Fuzzy C-means, Subtractive Clustering, and Grid Partitioning for Hourly Solar Radiation Forecasting. Theoretical and Applied Climatology, 137, 31-43.

[12] Tumse, S., Bilgili, M., Sekertekin, A., Unal, S., Sahin, B. 2023. Comparison and Evaluation of Machine Learning Approaches for Estimating Heat Index Map in Türkiye. Neural Computing and Applications, 35(21), 15721-15742.

[13] Tumse, S., Bilgili, M., Sahin, B. 2022. Estimation of Aerodynamic Coefficients of a Non-slender Delta Wing Under Ground Effect Using Artificial Intelligence Techniques. Neural Computing and Applications, 34(13), 10823-10844.

[14] Tumse, S., Ilhan, A., Bilgili, M. 2022. Estimation of Wind Turbine Output Power Using Soft Computing Models. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44(2), 3757-3786.

[15] Hewett, R., Leuchner, J., Carvalho, M. 2001. From Climate History to Prediction of Regional Water Flows with Machine Learning. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 292-297.

[16] Tayfur, G., Singh, V. P., Moramarco, T., Barbetta, S. 2018. Flood Hydrograph Prediction Using Machine Learning Methods. Water (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), 986, 1-13.

[17] Flake, J. T. 2007. Application of the relevance vector machine to canal flow prediction in the Sevier River basin. Utah State University, Electrical and Computer Engineering, Master of Science Thesis, Utah.

[18] Farhadi, H., Zahiri, A., Hashemi, M. R., Esmaili, K. 2019. Incorporating a Machine Learning Technique to Improve Open-channel Flow Computations. Neural Computing and Applications, 31, 909-921.

[19] Sahraei, A., Chamorro, A., Kraft, P., Breuer, L. 2021. Application of Machine Learning Models to Predict Maximum Event Water Fractions in Streamflow. Front Water, 3, 1-21.

[20] Il Kim, H., Kim, B. H. 2020. Flood Hazard Rating Prediction for Urban Areas Using Random Forest and LSTM. Water Resources and Hydrologic Engineering, 24, 3884-3896.

[21] Yaseen, Z. M., Jaafar, O., Deo, R. C., Kisi, O., Adamowski, J., Quilty, J., El-Shafie, A. 2016. Stream-flow Forecasting Using Extreme Learning Machines: A Case Study in a Semi-arid Region in Iraq. Journal of Hydrology, 542, 603-614.

[22] Xiao, L., Zhong, M., Zha, D. 2022. Runoff Forecasting Using Machine-learning Methods: Case Study in the Middle Reaches of Xijiang River. Front Big Data, 4, 1-11.

[23] Mathworks, 2020a. Fuzzy C-means Clustering. https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/long-short-term-memory-networks.html (Access Date: 05.05.2024).

[24] Mathworks, 2020b. Long Short-term Memory Networks. https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/long-short-term-memory-networks.html (Access Date: 07.06.2024).

[25] Jang, J. R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23(3), 665-685.

[26] Chandy, K. M., Taylor, S. 1992. An Introduction to Parallel Programming. MA: Jones and Bartlett, Boston.

[27] Liu, R., Liu, L. 2019. Predicting Housing Price in China Based on Long Short-term Memory Incorporating Modified Genetic Algorithm. Soft Computing, 23, 11829-11838.

[28] Ilhan, A. 2023. Forecasting of Volumetric Flow Rate of Ergene River Using Machine Learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 105983.

[29] Devlet Su Isleri (DSI). 2024. 11th regional directorate of DSI of Türkiye. http://edirnenehir.dsi.gov.tr/ (Access Date: 25.09.2024).

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Yeni Tiyoüre Türevinin Sentezi, Karakterizasyonu, Termal Özellikleri ve Antibakteriyel Aktivitesi

Emine Kutlu[1]*

*[1]Burdur Mehmet Akif Ersoy Universitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, BURDUR

(Alınış / Received: 07.07.2024, Kabul / Accepted: 01.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Aroiltiyoüre,
3-nitrobenzamid,
2,4-dimetil-piridin,
Antibakteriyel aktivite.

Öz: Bu çalışmada yeni bir tiyoüre türevi sentezlendi ve bu bileşiğin yapısı FT-IR, ^{1}H NMR ve UV-vis yöntemleri ile aydınlatıldı. Tiyoüre türevinin termal özellikleri termogravimetri (TG)/diferansiyel termal analiz (DTA)/diferansiyel termogravimetri (DTG) kombine sistemi ile incelendi. TG ve DTG eğrilerinden bileşiğin 112-195 ºC aralığında %1,80 kütle kaybı ile ve 195-295 ºC aralığında %97,76 kütle kaybı ile iki basamakta bozunduğu anlaşıldı. Tiyoüre türevinin *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (*S. aureus*), *Escherichia coli* ATCC 35150 (*E. coli*), *Salmonella enterica* ATCC 700408 (*S. Enterica*) ve *Listeria monocytogenes* RSKK 472 (*L. monocytogenes*) suşlarına karşı antibakteriyel aktivitesi araştırıldı. Bileşiğin *S. aureus, E. coli*, ve *L. monocytogenes* suşlarına karşı 50 mg/mL dozunda MİK değerine ve *S. enterica* suşuna karşı 25 mg/mL dozunda MİK değerine sahip olduğu belirlendi.

Synthesis, Characterization, Thermal Properties and Investigation of Antibacterial Activity of New Thiourea Derivative Compound

Keywords
Aroylthiourea,
3-nitrobenzamide,
2,4-dimethyl-pyridine,
Antibacterial activity.

Abstract: In this study, a new thiourea derivative was synthesized and the structure of this compound was elucidated by FT-IR, ^{1}H NMR, and UV-*vis* methods. The thermal properties of thiourea derivative were examined using a combined thermogravimetry (TG)/differential thermal analysis (DTA)/differential thermogravimetry (DTG) system. From the TG and DTG curves, it was understood that the compound decomposed in two steps, with 1.80% mass loss in the 112-195 ºC range and 97.76% mass loss in the 195-295 °C range. The antibacterial activity of thiourea derivative against *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (*S. aureus*), *Escherichia coli* ATCC 35150 (*E. coli*), *Salmonella enterica* ATCC 700408 (*S. Enterica*) and *Listeria monocytogenes* RSKK 472 (*L. monocytogenes*) strains was investigated. It was determined that the compound had an MIC value of 50 mg/mL against *S. aureus*, *E. coli*, and *L. monocytogenes strains*, and an MIC value of 25 mg/mL against *S. enterica* strain.

*İlgili Yazar, email: emine1044@gmail.com

1. Giriş

Tiyoüre türevleri, koordinasyon kimyası ve farmasötik kimya alanında uygulamalara sahip bileşiklerdir. Tiyoüre türevlerinin ligand olarak geçiş metali iyonları ile koordinasyon bileşikleri verdiği bilinmektedir [1–4]. Bu türevler; yapısındaki kükürt ve azot atomları sayesinde koordinasyon bileşiklerindeki merkez atomuna ve anyonlara bağlanabilme [5–7], moleküller arası hidrojen bağı [8], NH-N ve NH-S bağları üzerinden dimer [9] ve yapısında halojen bulunduran bileşikler ile halojen bağı [10] oluşturabilme özelliklerine sahiptir. Biyolojik açıdan aktif olan tiyoüre türevleri [11]; antibakteriyel, antifungal, antiviral, anti-tümör, anti-tiroid, antimalariyal, anti-inflamatuar [7] ve anti-tüberküler [12] gibi aktiviteler de sergilemektedir [13–15]. Bunlara ilave olarak tiyoüre türevleri, herbisidal aktivite göstermeke ve bitkilerin büyümesi üzerinde etkili bir rol oynamaktadır [3]. Ayrıca son yıllarda tiyoüre türevlerinin yakıt ve benzin karışımlarına eklenerek motor performansı ve emisyonları

üzerindeki etkileri araştırılmaktadır [16]. Karipcin ve ark. [17] tarafından 1-benzoil-3-furan-2-ilmetil-tiyoüre (BFTU) bileşiği sentezlenerek karakterize edilmiş ve bu bileşiğin antimikrobiyal aktivitesi araştırılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda BFTU'nun, *L. Monocytogenes, B. cereus* ve *S. aureus*'a karşı antimikrobiyal aktivite gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca Stefanska ve ark. tarafından sentezlenen 1,3-tiyazol'ün yeni tiyoüre türevlerinin Gram pozitif / negatif bakteriler ve *Candida albicans* gibi mikroorganizmalara ve *Mycobacterium tuberculosis* H37Rv suşuna karşı in vitro anti-mikrobiyal aktivitesi ve tüberküloz hastalarından izole edilen iki "vahşi" suş için tüberkülostatik aktivitesi incelenmiştir. Diğer taraftan 1-(3,4-diklorofenil)-3-(1,3-tiazol-2-il)tiyoüre ve 1-(3-kloro-4-florofenil)-3-(1,3-tiyazol-2-il) tiyoüre bileşiklerinin Gram pozitif standart suşlarına ve hastane suşlarına karşı ciddi inhibasyon özelliği gösterdiği, ayrıca bu tiyoüre türevlerinin metisilin dirençli ve standart *S. epidermidis* suşlarının biyofilm oluşumunu önemli derecede inhibe ettiği belirtilmiştir. Bu bileşiklerin yapısında bulunan ve fenil grubuna meta konumunda bağlı olan klor atomunun anti-mikrobiyal aktivite açısından önemli olduğu bulunmuştur [18].
Bu çalışmada, yeni bir tiyoüre türevi olan N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid sentezlendi ve bu bileşiğin yapısı FT-IR, ^{1}H NMR ve UV-*vis* yöntemlerinden yararlanılarak aydınlatıldı. Ayrıca bu bileşiğin termal davranışı TG/DTG/DTA kombine sistemi ile incelendi ve antibakteriyel aktivitesi *S. aureus, E. coli, S. Enterica* ve *L. monocytogenes* suşlarına karşı incelendi.

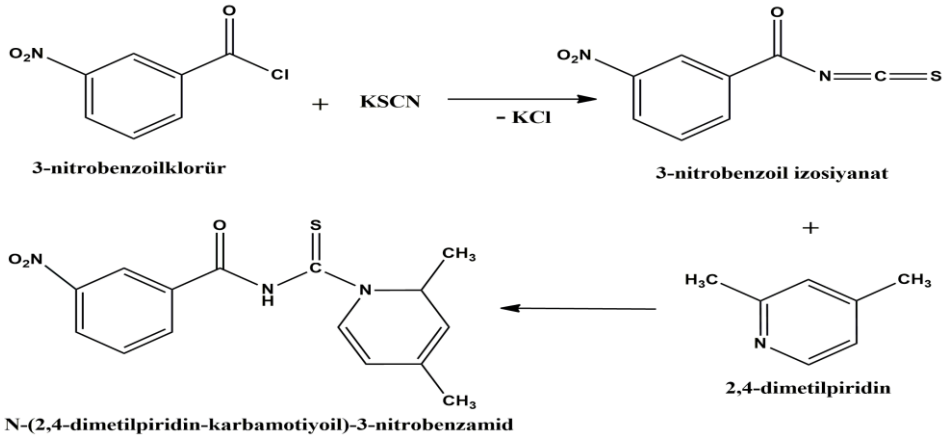
2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan Malzemeler

Sentez aşamasında kullanılan tüm kimyasallar ve çözücüler reaktif saflığında olduğundan tedarikçiden satın alındığı hali ile kullanıldı. Potasyum izotiyosiyanat (Merck), 3-nitrobenzoilklorür (Sigma Aldrich), 2,4-dimetilpiridin (Sigma Aldrich), aseton (Sigma Aldrich), etil alkol (Sigma Aldrich), hidroklorik asit (Merck), dimetil sülfoksit (DMSO, Sigma Aldrich) ticari olarak temin edildi.

2.2. *N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid*'in Sentezi

İki ağızlı 250 mL'lik bir balona KSCN (0.98 g, 0.01 mol)'nin 30 mL aseton içerisindeki çözeltisi konuldu. Bu çözeltiye 3-nitrobenzoilklorür (1.85 g, 0.01 mol)'ün 50 mL asetonda çözünmüş çözeltisi ilave edildi. Karışım, geri soğutucu altında 30 dakika 30-40 °C aralığında ısıtıldı ve ardından oda sıcaklığına soğutuldu. Üzerine 2,4-dimetilpiridin (1.08 g, 0.01 mol)'in 10 mL asetondaki çözeltisi damla damla ilave edildi ve oda sıcaklığında 2 saat karıştırılmaya devam edildi. Elde edilen çözelti soğuk HCl (0.1 M; 300 mL) üzerine döküldü. Çökelek süzülerek birkaç kez saf su ile yıkandı ve C_2H_5OH/CH_2Cl_2 (v/v) karışımından kristallendirildi. Beyaz kristaller halinde edide edildi. [4,19]. Verim: %82; Erime noktası:188 °C olarak belirlendi. Bileşiğe ait sentez mekanizması Şekil 1'de verildi.
***N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid*:** Beyaz kristal,
FT-IR (KBr, cm^{-1}): 3267 (N-H gerilme titreşimi), 3084 (Aromatik C-H gerilme titreşimi), 2937-2881 (Alifatik C-H gerilme titreşimi), 1718 (C=O gerilme titreşimi), 1527-1357 (N-O gerilme titreşimi), 1134 (C=S gerilme titreşimi).
^{1}H-NMR (400 MHz, $CDCl_3$, ppm): 11,91 (1H, Amid-N-H), 8,74-7,83 ppm (8H, Ar-H), 3,33-2,50 ppm (6H, Al-C-H).
Uv-vis (DMSO, abs., nm; ε, M^{-1}cm^{-1}): 260 (41269) (maks.), 305 (48412).



Şekil 1: *N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid*'in sentez tepkimesi

2.3. Yapı Aydınlatma Çalışmaları

Bileşiğin yapısının aydınlatılmasında Perkin Elmer Spectrum BX FT-IR cihazı kullanıldı. FT-IR spektrumu KBr pelleti kullanılarak 4000-400 cm^{-1} aralığında kaydedildi. $CDCl_3$ çözücüsü ve TMS dahili standardı ve Bruker Avance III 400 MHz NMR spektrometresi kullanılarak ^1H NMR spektrumu kaydedildi. Tüm termogravimetri (TG) ve diferansiyel termal analiz (DTA) eğrileri Seiko II TG/DTA 7200 termal analiz cihazı kullanılarak eş zamanlı olarak elde edildi.

2.4. Antibakteriyel Aktivite Çalışmaları

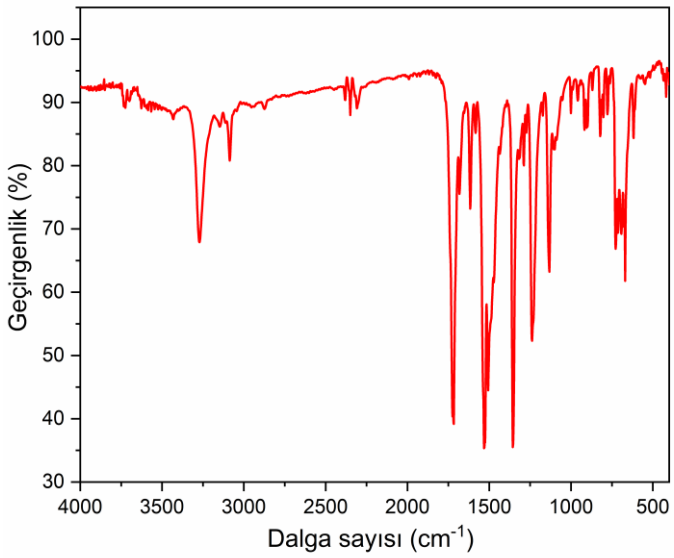
N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in antibakteriyel aktivitesi yaygın olarak kullanılan patojen mikroorganizmalar olan *S. aureus, E. coli, S. Enterica* ve *L. monocytogenes* standart suşlarına karşı araştırıldı. Antibakteriyel aktivite çalışmaları Mueller Hinton Agar II (Cation Adjusted) besiyeri ortamında Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu (MİK) yöntemine göre gerçekleştirildi [20]. DMSO içerisinde çözünmüş ve 0,45 mikronluk filtre ile steril edilmiş N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid ortama sekiz farklı konsantrasyonda (0;1,56; 3,12; 6,25; 12,5; 25; 50; 100 mg/mL) eklendi. Ortam, taze bakteri kültürlerinin 0.5 McFarland değerinde fizyolojik bir tampon içinde süspanse edildiği ve %10'da aşılandığı 96 well mikroplakaya 3 tekrarlı olarak aktarıldı.Mikroorganizmalar (S. *aureus, E. coli, S. Enterica, L. monocytogenes*) 37 ^oC sıcaklıkta 72 saat inkübe edildikten sonra 600 nm dalga boyunda absorbansları ölçümleri yapıldı.

3. Bulgular

Bu çalışmada, yeni bir tiyoüre bileşiği olarak N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid sentezlendi. Bileşiğin detaylı termal karakterizasyonu yapıldı ve antibakteriyel etkinliği araştırıldı. Bileşiğin sentezi iki basamakta gerçekleştirildi. Birinci basamakta KSCN ve 3-nitrobenzoilklorür tepkimeye sokularak 3-nitrobenzoilizotiyosiyanat elde edildi. İkinci basamakta 3-nitrobenzoilizotiyosiyanat üzerine oda sıcaklığında 2,4-dimetilpiridin eklenerek N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid elde edildi. Bileşiğe ait sentez tepkimesi Şekil 1'de verilmektedir.

3.1. FT-IR çalışmaları

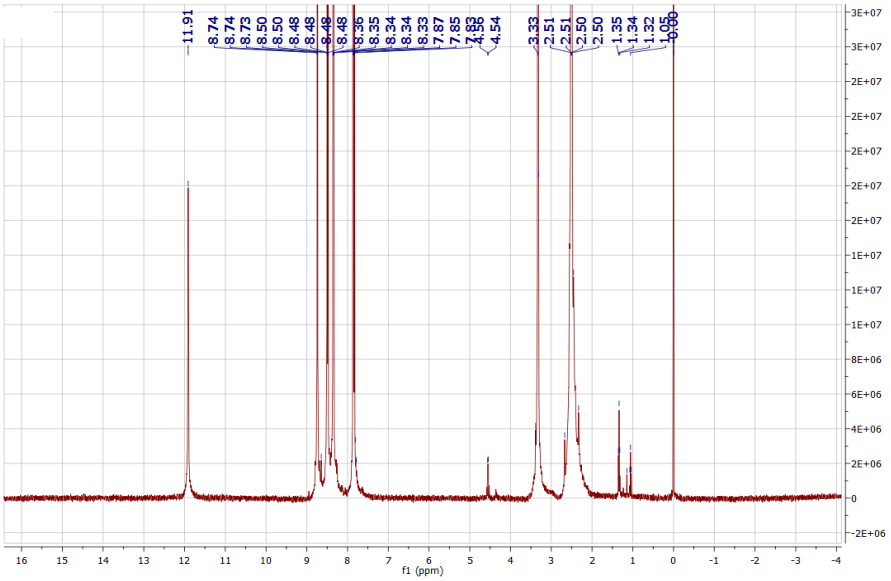
N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in FT-IR spektrumu 4000-400 cm^{-1} aralığında kaydedildi. Bileşiğin FT-IR spektrumunda 3267 cm^{-1}'de gözlenen şiddetli pik N-H asimetrik gerilme titreşimine atfedilebilir. Aromatik halkaya ait C-H gerilme titreşimleri 3084 cm^{-1}'de gözlenirken, alifatik C-H gerilme titreşimleri 2937-2881 cm^{-1} aralığında gözlenmektedir. N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in yapısındaki karbonil grubuna ait (C=O) gerilme titreşimi ise 1718 cm^{-1}'de şiddetli bir band olarak karşımıza çıkmaktadır.
FT-IR spektrumunda 1134 cm^{-1}'de gözlenen band ise C=S gerilme titreşimine karşılık gelmektedir.
Bileşiğin yapısındaki aromatik halkaya ait C=C gerilme titreşimleri ve N-O gerilme titreşimleri 1527-1357 cm^{-1} aralığında çoklu bantlar olarak görülmekte ve bu aralıkta örtüşmektedir [21,22]. N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in FT-IR spektrumu Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2: N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in FT-IR spektrumu

3.2. NMR Çalışmaları

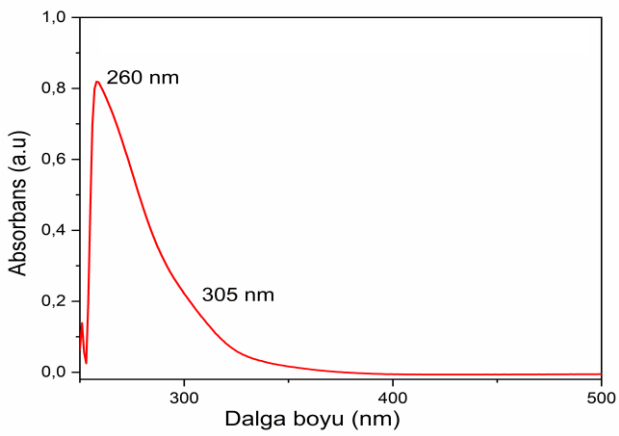
N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in ^{1}H NMR spektrumu d_6-DMSO'da alındı. Bileşiğin ^{1}H NMR spektrumunda, N-*H* protonu 11.91 ppm'de görülmektedir. δ=8,74-7,83 ppm aralığında gözlenen çoklu pikler aromatik C-*H* protonlarına aittir. Bileşiğe ait alifatik C-*H* protonları δ=3.33-2.50 ppm aralığında gözlenmektedir [7,23]. N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in ^{1}H NMR spektrumu Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3: N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in ^{1}H NMR spektrumu

3.3. UV-*vis* Çalışmaları

N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'e ait UV-*vis* spektrumu DMSO çözücüsünde (c=6×10^{-6} M) kaydedilmiş olup Şekil 4'te verilmektedir. N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in UV-*vis* spektrumunda 260 nm (ε=41269 M^{-1}cm^{-1})'de gözlenen keskin absorpsiyon bandı ve 305 nm (ε=48412 M^{-1}cm^{-1})'de gözlenen omuz şeklindeki band sırası ile π→π* ve n→π* geçişlerine karşılık gelmektedir [24].

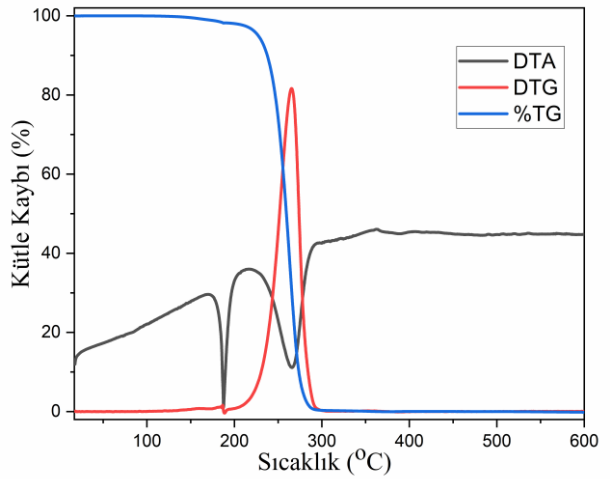


Şekil 4: N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in UV-*vis* spektrumu

3.4. Termal Analiz Çalışmaları

N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid için 25-1100 ^{o}C sıcaklık aralığında alınan TG/DTG/DTA eğrileri, Şekil 5'te verilmektedir. TG eğrisinden 25-112 °C sıcaklık aralığında %0.06'lık bir kütle kaybı ile bileşiğin yapısındaki suyun nem olarak uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Bileşiğin TG ve DTG eğrilerinden bozunmanın iki basamakta gerçekleştiği görülmektedir. Birinci bozunma basamağı 112-195 °C aralığında %1.80 kütle kaybı ve ikinci bozunma basamağı 195-295 °C aralığında %97.76 kütle kaybı ile gerçekleşmektedir. DTA eğrisinde birinci

bozunma basamağında 170-215 °C aralığında ve ikinci bozunma basamağında 215-295 °C aralığında endotermik pikler gözlenmektedir. Bileşiğin bozunma basamakları ve % kütle kayıpları Tablo 1'de özetlenmektedir.
Albert ve arkadaşları tarafından 2024 yılında yapılan bir çalışmada çinko (tris)-tiyoüre sülfatın (ZTTS) metal-organik tek kristalleri yavaş buharlaştırma yöntemi ile sentezlenmiş ve TGA/DTA analizleri gerçekleştirilmiştir. ZTTS kristalinin TGA/DTA analizi sonucunda 150 °C'ye kadar kararlı olduğu raporlanmıştır [25]. 2025 yılında Ahmed ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise iki yeni tiyoüre ligandının (TU^1, benzamid türevi) ve (TU^2, asetamid türevi) sentezi gerçekleştirilmiş ve bunların Pd(II), Cd(II), Cu(II) ve Ni(II) tuzlarıyla kompleksleri hazırlanmıştır. Bu bileşikleri termal davranışları incelenmiş ve elde edilen termal analiz verileri, bu komplekslerin yüksek termal kararlılık sergilediğini göstermiştir [26].



Şekil 5: N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in TG/DTG/DTA eğrileri

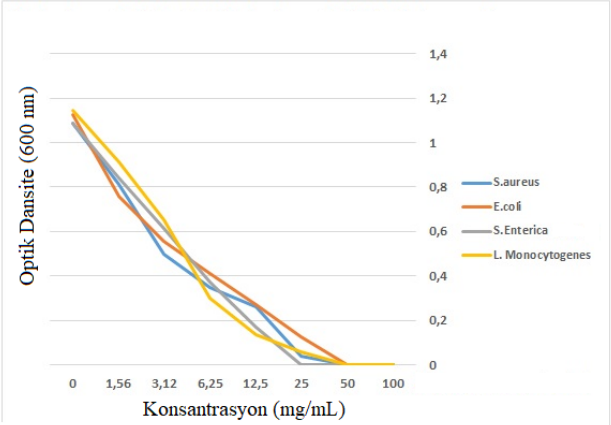
Tablo 1. N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'i*n* bozunma basamakları ve % kütle kayıpları

Bozunma Basamağı	***TG Sıcaklık Aralığı (°C)***	***Kütle Kaybı (%)***	***Kalan (%)***
Nem	25-112	0,06	99,94
I	112-195	1,80	99,14
II	195-295	97,76	0,38

3.6. Antibakteriyel Çalışma Sonuçları

N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in antibakteriyel aktivitesini incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılan patojen mikroorganizmalar olan *S. aureus*, *E. coli*, *S. enterica* ve *L. monocytogenes* bakterileri kullanıldı. Elde edilen MİK değerleri, Şekil 6'da verilmektedir. Bu sonuçlara göre *N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid* bileşiğinin *S. aureus, E. coli*, ve *L. monocytogenes* suşları üzerinde elde edilen MİK değeri 50 mg/mL olarak belirlendi. *S. enterica* suşu üzerinde ise bu bileşiğin MİK değeri 25 mg/mL olarak bulundu. Literatürde 2025 yılında Ahmed ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada iki yeni tiyoüre ligandının (TU^1, benzamid türevi) ve (TU^2, asetamid türevi) sentezi gerçekleştirilmiş ve bu bileşiklerin antibakteriyal aktiviteleri Gram pozitif bakteri türlerine (*Staphylococcus aureus* ve *Streptococcus mutans*) ve Gram negatif bakteri türlerine (*Pseudomonas aeruginosa* ve *Klebsiella pneumoniae*) karşı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre testi yapılan suşların TU^1'e karşı tam direnç gösterdiği raporlanmıştır. Ancak, TU^1 bileşiğinin Ni (II) kompleksinin, özellikle *Bacillus subtilis* ve *Staphylococcus aureus* gibi bazı Gram pozitif türlere ve *Escherichia coli* gibi Gram negatif suşa karşı daha iyi antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğu gösterilmiştir. İlaveten, TU^2'nin, referans antibiyotiklerle karşılaştırıldığında test edilen türlerin çoğuna karşı orta düzeyde antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirtilmiştir [26]. Shah ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada iki seri benzoil tiyoüre türevleri (TH01-TH05), (TH06-TH10) ve bunların metal komplekslerinin sentezini gerçekleştirmiş ve antibakteriyal aktive çalışmaları

yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, TH-01, TH-08 ve TH-09'un sırasıyla *K. pneumoniae* ve *P. aeruginosa*'ya karşı ümit verici antibakteriyel potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir [27].



Şekil 6: N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in farklı bakteri suşlarına karşı elde edilen MİK değerleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada tiyoüre türevi N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid bileşiği sentezlendi. Bileşiğin yapısı FT-IR, ^{1}H NMR ve UV-*vis* yöntemleri kullanılarak aydınlatıldı. Bileşiğin termal davranışı, TG/DTG/DTA kombine sistemi ile incelendi. TG ve DTG eğrilerinden bileşiğin 112 °C'ye kadar termal olarak kararlı olduğu anlaşıldı. Ayrıca bileşik için 112-195 °C ve 195-295 ºC aralığında iki basamaklı bozunma gözlendi. Sentezlenen bileşiğin *S. aureus, E. coli* ve *L. monocytogenes* suşlarına karşı elde edilen MİK değeri 50 mg/mL ve *S. enterica* suşun karşı elde edilen MİK değeri 25 mg/mL olarak belirlendi. Elde edilen sonuçlar N-(2,4-dimetilpiridin-karbamotiyoil)-3-nitrobenzamid'in *S. aureus, E. coli* ve *L. monocytogenes* suşları ile karşılaştırıldığında *S. enterica* suşuna karşı daha yüksek antibakteriyel aktivite gösterdiği görüldü. Ancak antibakteriyel aktivite sonuçlarına göre bileşiğin düşük etkinliğe sahip olduğu anlaşıldı.

Teşekkür

Çalışmada yer alan antibakteriyel uygulamalar için Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine, Öğr. Gör. Orhan YAVUZ'a ve Prof. Dr. Fatih Mehmet Emen'e vermiş oldukları destek ve katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Finansal Destek: Proje, Burdur Mehmet Akif Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 0282-NAP-16 proje numarası ile desteklenmiştir.

Conflict of Interest: No conflict of interest was declared by the authors.

Financial support: The project was supported by Burdur Mehmet Akif University Department of Scientific Research Projects with project number 0282-NAP-16.

Kaynakça

[1] Saeed, A., Flörke, U., Erben, M. F. 2014. A review on the chemistry, coordination, structure and biological properties of 1-(acyl/aroyl)-3-(substituted) thioureas. Journal of Sulfur Chemistry, 35 (3), 318–355. doi.org/10.1080/17415993.2013.834904.

[2] Saad, F. A. 2014. Synthesis, spectral, electrochemical and X-ray single crystal studies on Ni(II) and Co(II) complexes derived from 1-benzoyl-3-(4-methylpyridin-2-yl) thiourea. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 128, 386–392. doi.org/10.1016/J.SAA.2014.02.189.

[3] Otazo-Sánchez, E., Ortiz-del-Toro, P., Estévez-Hernández, O., Pérez-Marín, L., Goicoechea, I., Cerón Beltran, A., Villagómez-Ibarra, J. R. 2002. Aroylthioureas: new organic ionophores for heavy metal ion selective electrodes. A nuclear magnetic resonance study. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 58 (10), 2281–2290. doi.org/10.1016/S1386-1425(01)00724-7.

[4] Yeşilkaynak, T., Özkömeç, F. N., Çeşme, M., Demirdöğen, R. E., Kutlu, E., Kutlu, H. M., Emen, F. M. 2022. Synthesis of new thiourea derivatives and metal complexes: Thermal behavior, biological evaluation, in silico ADMET profiling and molecular docking studies. Journal of Molecular Structure, 1269, 133758. doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2022.133758.
[5] Camel, V. 2003. Solid phase extraction of trace elements. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 58 (7), 1177–1233. doi.org/10.1016/S0584-8547(03)00072-7.
[6] Garg, B. S., Sharma, R. K., Bhojak, N., Mittal, S. 1999. Chelating Resins and Their Applications in the Analysis of Trace Metal Ions. Microchemical Journal, 61 (2), 94–114. doi.org/10.1006/MCHJ.1998.1681.
[7] Emen, F. M., Kutlu, E., Karacolak, A. I., Ali, M. A., Demirdogen, R. E., Yesilkaynak, T., Erat, S., Ayaz, F. 2022. Novel benzoylthiourea derivatives had differential anti-inflammatory photodynamic therapy potentials on in vitro stimulated mammalian macrophages. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 37, 102685. doi.org/10.1016/J.PDPDT.2021.102685.
[8] Mitchell, S. C., Steventon, G. B. 1994. Thiourea and Its Biological Interactions. Sulfur Reports, 16 (1), 117–137. doi.org/10.1080/01961779408048967.
[9] Saxena, A., Pike, R. D. 2007. Hydrogen-bonding networks in heterocyclic thioureas. Journal of Chemical Crystallography, 37 (11), 755–764. doi.org/10.1007/S10870-007-9246-1.
[10] Wilcken, R., Zimmermann, M. O., Lange, A., Joerger, A. C., Boeckler, F. M. 2013. Principles and applications of halogen bonding in medicinal chemistry and chemical biology. Journal of Medicinal Chemistry, 56 (4), 1363–1388. doi.org/10.1021/JM3012068.
[11] Kadhem, N. A., Jwaid, A. H., Atia, A. J. K. 2021. Synthesis of New Azo-Heterocyclic Compounds Derived From Benzoylthiourea, Evaluation of Their Biological Activity and Lethal Dose. Biochemical and Cellular Archives, 21, 2417–2421.
[12] Kutlu, E., Emen, F. M., Yıldırım, K., Ataş, C., Demirdogen, R. E., Yesilkaynak, T., Kinaytürk, N. K., Şimşek, E., Çoban, A. Y. 2023. Novel thiourea derivatives against Mycobacterium tuberculosis: synthesis, characterization and molecular docking studies. doi.org/10.1080/10426507.2023.2201503.
[13] Schmitt, B., Gerber, T. I. A., Hosten, E.; Betz, R. 2012. Monomeric/dimeric complexes of fac-$[Re(CO)_3]^+$ with benzoylthiourea derivatives. Inorganic Chemistry Communications, 24, 136–139. doi.org/10.1016/J.INOCHE.2012.08.008.
[14] Kumaran, K., Raja Mohamed Kamil, S., Jaisankar, K. R. 2012. Synthesis, spectral characterization and antimicrobial studies of new 3- and 4 - substituted in 7- aza indole derivatives. International Journal of PharmTech Research, 4 (1), 169–175.
[15] Poyraz, S., Döndaş, H. A., Sansano, J. M., Belveren, S., Yamali, C., Ülger, M., Döndaş, N. Y., Sağlık, B. N., Pask, C. M. 2023. N-Benzoylthiourea-pyrrolidine carboxylic acid derivatives bearing an imidazole moiety: Synthesis, characterization, crystal structure, in vitro ChEs inhibition, and antituberculosis, antibacterial, antifungal studies. Journal of Molecular Structure, 1273, 134303. doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2022.134303.
[16] Cosman, S. 2023. Experimental Research of the Effects of Benzoylthiourea Derivative Fuel and Gasoline Mixtures on Engine Performance and Emissions. International Journal of Automotive Science and Technology, 7 (4), 403–409. doi.org/10.30939/ijastech.1397506.
[17] Karipcin, F., Atis, M., Sariboga, B., Celik, H., Tas, M. 2013. Structural, spectral, optical and antimicrobial properties of synthesized 1-benzoyl-3-furan-2-ylmethyl-thiourea. Journal of Molecular Structure, 1048, 69–77. doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.05.042.
[18] Stefanska, J., Nowicka, G., Struga, M., Szulczyk, D., Koziol, A. E., Augustynowicz-Kopec, E., Napiorkowska, A., Bielenica, A., Filipowski, W., Filipowska, A., Drzewiecka, A., Giliberti, G., Madeddu, S., Boi, S., Colla, P. La, Sanna, G. 2015. Antimicrobial and Anti-biofilm Activity of Thiourea Derivatives Incorporating a 2-Aminothiazole Scaffold. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 63 (3), 225–236. doi.org/10.1248/CPB.C14-00837.
[19] Yeşilkaynak, T., Nur Özkömeç, F., Çeşme, M., Demirdöğen, R. E., Sezer, C. V., Kutlu, H. M., Emen, F. M. 2023. Novel thiourea derivative compounds: Thermal behavior, biological evaluation, Hirshfeld surfaces and frontier orbitals analyses, in silico ADMET profiling and molecular docking studies. Journal of Molecular Structure, 1280, 135086. doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2023.135086.
[20] Karadeniz-Pekgöz, A., Turgut, A. C., Çinbilgel, İ., Yavuz, O. 2024. Phytochemical contents and bioactivity of four endemic Salvia seeds from Turkey: a comparative study to chia seed. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 1–8. doi.org/10.1007/S11694-024-02594-8.
[21] Yeşilkaynak, T. 2017. Synthesis and Characterization of N-((6-methylpyridin-2- yl)carbamothioyl)thiophene-2-carboxamide and its Co(II), Ni(II) and Cu(II) Complexes: Calculation of the Molecular Orbitals and Antioxidant and Antitumor Activities. Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry, 3 (3), 1–14. doi.org/10.18596/JOTCSA.80465.
[22] Yeşilkaynak, T., Demirdöğen, R. E., Muslu, H., Emen, F. M. 2021. Co(II), Ni(II), and Cu(II) metal complexes based on thiourea ligand: synthesis, characterization, thermal behaviors, anticancer, and antioxidant activities. Inorganic and Nano-Metal Chemistry, 53 (1), 101–111. doi.org/10.1080/24701556.2021.1984532.

[23] Binzet, G., Emen, F. M., Flörke, U., Yęilkaynak, T., Külcü, N., Arslan, H. 2008. 4-Chloro-N-[N-(6-methyl-2-pyridyl)carbamothioyl]benzamide. Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online, 65 (1), o81–o82. doi.org/10.1107/S1600536808041123.

[24] Gil, D. M., Defonsi Lestard, M. E., Estévez-Hernández, O., Duque, J., Reguera, E. 2015. Quantum chemical studies on molecular structure, spectroscopic (IR, Raman, UV–Vis), NBO and Homo–Lumo analysis of 1-benzyl-3-(2-furoyl) thiourea. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 145, 553–562. doi.org/10.1016/J.SAA.2015.02.071.

[25] Albert, H. M., Jemima, T., & Gonsago, C. A. 2024. Synthesis, spectroscopic, optical, and thermal characterizations of Zinc (Tris)-Thiourea Sulfate: A metal-organic crystal. Journal of Fluorescence, 34(3), 1057-1063. https://doi.org/10.1007/s10895-023-03335-8.

[26] Ahmed, M. M., Salama, N. T., Bondock, S., Soayed, A. A., Elsamra, R. M. 2025. Synthesis, Spectroscopic Characterization, DFT Calculations, and Molecular Docking of Novel Thiourea Complexes and Their Cytotoxic and Antimicrobial Activities. Applied Organometallic Chemistry, 39(4), e70125. https://doi.org/10.1002/aoc.70125.

[27] Shah, H. U. R., Ahmad, K., Ashfaq, M., Oku, H. 2023. Free radical scavenging, antibacterial potentials and spectroscopic characterizations of benzoyl thiourea derivatives and their metal complexes. Journal of Molecular Structure, 1272, 134162. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134162.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryaların Fiyat/Performans Analizleri: Alternatif Olarak Na-İyon Batarya Sistemleri

Murat BULDU*[1], Serdar ALTIN[2], Fatih BULUT[2]

*[1] İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, MALATYA
[2] İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, MALATYA
[2] İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, MALATYA

(Alınış / Received: 18.07.2024, Kabul / Accepted: 24.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Li iyon,
Na iyon,
Batpac,
Elektrikli araçlar

Öz: Bu çalışmada elektrikli araçlarda hali hazırda kullanılan bataryaların temel özellikleri ve kimyaları incelenmiştir. İlk olarak bataryaların çalışma prensipleri temel düzeyde ele alınarak incelenmiş ve en popüler batarya tipleri belirlenerek temel özellikleri ortaya konulmuştur. Hem ülkemizde hem de dünyada elektrikli araçlara olan yönelim ve bununla birlikte satış miktarları değerlendirilerek batarya maliyet analizleri ilk olarak var olan batarya sistemlerinde BatPac programı yardımı ile incelenmiştir. Dünyadaki Li rezervinin kısıtlı olmasından dolayı alternatif olarak görülen Na-iyon bataryaların Li-iyon bataryalara göre durumu incelenerek çalışma mekanizmaları tartışılmıştır. Çalışmanın son kısında ise olası Na-iyon batarya katot ve anot malzemeleri için maliyet analizleri gerçekleştirilerek Li-iyon bataryalar ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak ise Na-iyon bataryaların yaklaşık üç kat Li-iyon bataryalara göre düşük maliyetli olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu durumun yakın gelecekte elektrikli araçların üretim maliyetlerinde özellikle batarya paketi açısından yaklaşık %66 değerinde maliyet azalmasına neden olabileceği öngörülmüştür.

Price/Performance Analysis of Batteries Used in Electric Vehicles: Na-ion Battery Systems as an Alternative

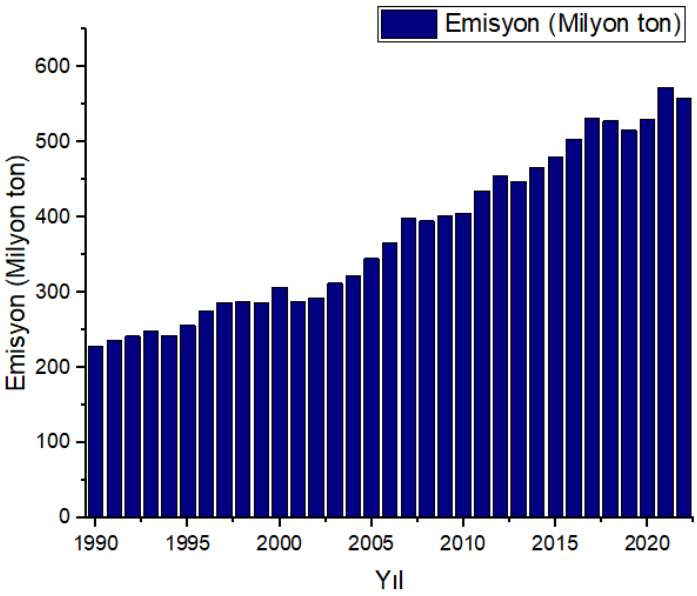
Keywords
Li-ion,
Na-ion,
Batpac,
Electric Vehicles

Abstract: In this study, the basic properties and chemistry of batteries currently used in electric vehicles were investigated. Firstly, the operating principles of batteries were examined at a basic level and the most popular battery types were determined and their basic features were revealed. By evaluating the trend towards electric vehicles both in our country and in the world and their sales volumes, battery cost analyzes were first examined in existing battery systems with the help of the BatPac program. The situation of Na-ion batteries, which are seen as an alternative due to the limited Li reserves in the world, compared to Li-ion batteries, has been examined and their working mechanisms have been discussed. In the last part of the study, cost analyzes were carried out for possible Na-ion battery cathode and anode materials and compared with Li-ion batteries. As a result, it has been revealed that Na-ion batteries are approximately three times less costly than Li-ion batteries. It is predicted that this situation may cause a cost reduction of approximately 66% in the production costs of electric vehicles in the near future, especially in terms of battery packs.

*İlgili Yazar, email: muratbuldu44@gmail.com

1. Giriş

Günümüzde artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesinde fosil yakıtlar halen en önemli aktörlerden biridir. Buna göre 2021 yılı verilerine AB-27 ülkeleri birincil enerji tüketiminin 2,6%'sı katı yakıtlardan, 34,8%'si petrol ve petrol ürünlerinden, 23%'ü'si doğalgazdan, 22,8% elektrik enerjiden, 11.8%'i yenilenebilir enerjiden ve 5,0%'sı diğer kaynaklardan karşılamıştır [1,2]. Özellikle ulaşım sektörünün sebep olduğu yüksek enerji ihtiyacı ile fosil yakıtlara olan talebin yoğun olması ve bu yoğun talebin karşılanabilmesi için alternatif çözümlere zemin oluşturan akademik çalışmaları beraberinde getirmiştir. Özellikle sera gazlarının doğaya verdiği zarar ile katı yakıtların gezegenimize verdiği zarar gün geçtikçe artmaktadır. Örnek olarak 2016 yılında kanada da sera gazı emisyonunda %24 oranında olduğu tespit edilmiştir [3,4]. Ülkemizdeki sera gazı envanteri sonuçlarını ele aldığımızda ise TÜİK verilerine göre 2022 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %2,4 azalarak 558,3 milyon ton (Mt) CO_2 eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplanmıştır [5]. Ayrıca kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4,1 ton CO_2 eşd., 2021 yılında 6,8 ton CO_2 eşd. ve 2022 yılında 6,6 ton CO_2 eşd. olarak hesaplanmıştır. Şekil 1 ülkemizdeki CO_2 emisyon oranının yıllar içerisindeki değişimi ele alınmaktadır. Bu bağlamda gelinen noktada ülkemizde son dönemde sera gazı emisyonunda ciddi bir artış olduğu gözlemlenmektedir.

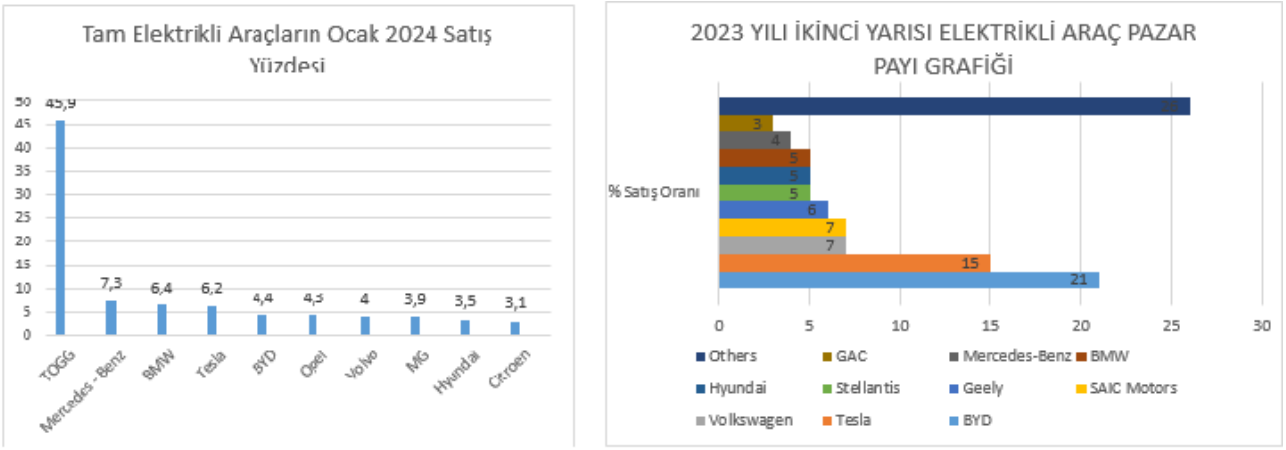


Şekil 1. Yıllara göre sera gazı emisyonunun değişimi

Ayrıca halen en temel enerji kaynaklarından olan petrolün arz talep oranındaki değişimlerden dolayı varil fiyatında yukarı doğru ivmelenmeler olmaktadır. Bu durum enerji ihtiycının giderilmesindeki birim fiyatları dolaylı yollardan etkilemektedir [6]. Günümüz itibariyle dünya genelinde petrolün %64,5'i ulaşım, %16,6'sı enerji dışı uygulamalar, %7,8'i sanayi, %5,4'ü konut, %5,7'si diğer amaçlarla kullanılmaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtların ekonomik etkilerinin azaltılması ve çevresel zararın iyileştirilmesine yönelik arayışlar devam etmektedir. Bu yöndeki araştırmalarda sera gazlarının emisyon oranının düşürülmesi, karbon ayak izinin azaltılması ve yeşil enerji teknolojilerinin geliştirilmesi hedeflenerek yenilenebilir enerji kaynaklarının ArGe çalışmaları yapılmaktadır. Elektrikli araç taknolojisi bu çalışmalarda önemli bir rol üstlenmektedir [7]. Yapılan çalışmalar ulaşım sektöründeki problemleri ele alarak elektrikli araçlardaki enerji depolama sistemlerinde bataryalara ihtiyaç olduğunu öne sürmektedir. Elektrikli araç teknolojisinde Lityum-iyon (LIB) batarya paketlerinin bu araçların vazgeçilmez bir parçası olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebini çevrim sayısındaki uzun ömür, kendiliğinden deşarj olma durumunun düşük oranı, hafifliği, hızlı şarj yetenekleri ve geniş sıcaklık çalışma aralığı gibi yapısal özellikleri olarak görülmüştür [8-11]. Bu yöndeki verileri incelediğinde 2017 yılında dünyada %76 benzinli, %19 dizel araç bulunurken elektrikli araçlar yalnızca %5 oranındaydı ancak 2030 yılında elektrikli otomobillerin oranının %48 olacağı tahmin edilmektedir [12].

İstatistiksel sonuçlardan görüleceği üzere birçok otomobil üreticisi son dönemlerde elektrikli ve hibrit araç teknolojisine geçmektedir. Ancak bu noktada önemli bir durum ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla ilgili yapılan araştırmalarda fosil yakıtların aksine depolama sorunları olması nedeniyle günlük kullanımdaki oranını düşürmektedir. Bu negatif durumun çözümüne dair çalışmalar batarya katot malzemesinin kompozisyonu ve paketleme şekilleri üzerinde yoğunlaşmış olup gelişim hızı umut vericidir.

Günümüz otomotiv sektöründe elektrikli araç bataryalarını incelediğimizde lityum iyon bataryalarda farklı kimyasal yapıların varlığı görülmektedir. Hem dünyada hem de Türkiye'de elektrikli araç satışları hızlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 2.a ODMD verileri ışığında günümüzde Türkiye pazar payını gösterirken Şekil 2.b 2023 yılında dünya elektrikli araç pazar payını göstermektedir [13].



(a) **(b)**

Şekil 2. (a) Türkiye Elektrikli Araç Satış Verileri, **(b)** 2023 Yılı İkinci Yarısı Dünya Elektrikli Araç Satış Verileri

İlk olarak ülkemizdeki elektrikli araç satışlarını incelediğimizde yerli TOGG firmasının açık olarak önde olduğu görülmektedir. Bu durum yerli elektrik araç üretiminin ülke tercihleri açısından önemini açık bir şekilde göstermektedir. Dünyadaki elektrikli araç satışları incelendiğinde ise Çin menşeili BYD firmasının pazara hakim olduğu görülmektedir. İkinci sırada ise ABD menşeili Tesla firması yer almaktadır. Pazar payı açısından yüksek hacme sahip elektrikli araç modellerinin batarya tipleri ve özellikleri Tablo 1 içerisinde verilmektedir.

Tablo 1. Elektrikli araçlara dair kullanılan batarya kompozisyonları ve özellikleri [14,15]

EV Modeli	Batarya tipi	Kapasite (kWh)	Mesafe (km)
BYD	LFP	49,92 veya 60,48	420
Tesla Model 3	NCA	55	629
Tesla Model S	NCA	100	600
TOGG	NMC	52,4	523
Volkswagen e-Golf	NMC	35,8	316
BMW i3	NMC	42	310
Hyundai IONIQ	NMC	40	614
Kia e-Niro	NMC	42 veya 67	460
Jaguar i-Pace	NMC	90	470
Geely Geometry C	LFP	70	460

Görüldüğü gibi elektrikli araç üreticileri üç çeşit batarya kimyası üzerine çalışan batarya sistemlerini tercih etmektedir. Burada kullanılan LFP ($LiFePO_4$), NCA ($LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$) ve NMC ($LiNi_xMn_yCo_zO_2$, x+y+z=1) katot malzemelerine göre batarya tipleri isimlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde bataryaların elektrokimyasal yapısı açıklanarak bu yapıların maliyet analizleri Argonne laboratuvarlarında geliştirilen Batpac programı sayesinde ifade edilecektir

2.1. Bataryaların Elektrokimyasal Yapıları

Lityum iyon pillerin çalışma mekanizması göz önüne alındığında deşarj olma durumunda, negatif elektrottaki (anot) lityum iyonları buradan ayrılarak katota doğru hareket eder. Lityum iyonları bir ayırıcı membran karşısında hareket ettikçe elektronlar batarya dış devresine akım üretir. Şarj sırasında ise lityum iyonları katottan ayrılarak anota doğru hareket eder. Bu durum bir dış etkenle gerçekleşir ve şarj işlemine karşılık gelir. Günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan batarya kompozisyonları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- $Li_{1.05}\left(Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}\right)_{0,95}O_2$ (NMC-333)
- $Li_{1.05}\left(Ni_{0,5}Mn_{0,2}Co_{0,3}\right)_{0,95}O_2$ (NMC-523)
- $Li_{1.05}\left(Ni_{0,6}Mn_{0,2}Co_{0,2}\right)_{0,95}O_2$ (NMC-622)
- $Li_{1.05}\left(Ni_{0,8}Mn_{0,1}Co_{0,1}\right)_{0,95}O_2$ (NMC-811)
- $Li\left(Ni_{0,8}Co_{0,85}Al_{0,15}\right)O_2$ (NCA)
- $LiFePO_4$ (LFP)

Bu batarya yapılarının elektrokimyasal reaksiyonları Tablo 2'de verilmektedir [16]. Burada anot olarak grafit temel alınarak reaksiyon mekanizmalar yazılmıştır.

Tablo 2.a Lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) yapısı için elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Li_nC_6 \leftrightarrow Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}\left(Ni_xMn_yCo_z\right)O_2 + nLi^+ + ne^- \leftrightarrow Li_m\left(Ni_xMn_yCo_z\right)O_2$
Genel	$Li_nC_6 + Li_{m-n}\left(Ni_xMn_yCo_z\right)O_2 \leftrightarrow Li_0C_6 + Li_m\left(Ni_xMn_yCo_z\right)O_2$

Tablo 2.b Lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) yapısı için elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Li_nC_6 \leftrightarrow Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}\left(Ni_xCo_yAl_z\right)O_2 + nLi^+ + ne^- \leftrightarrow Li_m\left(Ni_xCo_yAl_z\right)O_2$
Genel	$Li_nC_6 + Li_{m-n}\left(Ni_xCo_yAl_z\right)O_2 \leftrightarrow Li_0C_6 + Li_m\left(Ni_xCo_yAl_z\right)O_2$

Tablo 2.c Lityum demir fosfat (LFP) yapısı için elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Li_nC_6 \leftrightarrow Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}FePO_4 + nLi^+ + ne^- \leftrightarrow Li_mFePO_4$
Genel	$Li_nC_6 + Li_{m-n}FePO_4 \leftrightarrow Li_0C_6 + Li_mFePO_4$

Benzer şekilde sodyum iyon pil kompozisyonlarını ele alacak olursak anot olarak hard karbon ve katot olarak sodyum metal oksit yapıların kullanıldığı elektrokimyasal hücrelerdir. Bu hücreler tıpkı lityum iyon bataryalarda olduğu gibi bataryanın içindeki elektrolit bataryanın iki elektrotu arasındaki kimyasal reaksiyon ortamını oluşturur.

Sodyum iyon bataryalarının olumlu özellikleriyle lityum iyon bataryalarına alternatif olmasının yanında bir takım eksiklikleri de bulunmaktadır. Yapısal olarak ele aldığımızda sodyum katyonunun atom yarıçapı, lityum muadilinden yaklaşık olarak 0,3 Å daha büyük olması, sodyumun atom ağırlığının lityumunkinden 3 kat daha büyük olduğu anlamına gelir. Bu farklılık, teknik sorunlara yol açmaktadır.

Sodyum iyon bataryaların lityum iyon bataryalara göre dezavantajları olsa da fiyat-performans yaklaşımı ile değerlendirildiğinde Li-iyon bataryalara en güçlü alternatif olarak görülmektedir. An itibari ile Na-iyon bataryaların ticari olarak üretimi ile ilgili son yıllarda kurulan firma sayısı hızla artmaktadır. Bunlara örnek olarak

çinli Contemporary Amperex Technology Co., Ltd. (CATL), ingiliz Faradion Limited, isviçreli Northvolt ve Fransız Tiamat firmaları örnek olarak verilebilir.

Tabakalı yapıdak bir sodyum iyon ticari hücresinde elektrokimyasal mekanizma Tablo 3'de verilmektedir. Görüldüğü üzere redoks reaksiyon mekanizması Li-iyon bataryalara çok benzemektedir.

Tablo 3. Sodyum iyon bataryaları için farklı geçiş metallerini içeren elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Na_nC_6 \leftrightarrow Na_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Na_{0,67-n}TMO_2 + nNa^+ + ne^- \leftrightarrow Na_{0,67}TMO_2$
Genel	$Na_nC_6 + Na_{0,67-n}TMO_2 \leftrightarrow Li_0C_6 + Na_{0,67}TMO_2$

2.2. Sodyum Batarya Kompozisyonları ve Kapasite Hesaplama Adımları

Bu bölümde elektrikli araçlarda kullanılan batarya gruplarıyla sodyum bataryalarının verilerini analiz edeceğiz. Yaptığımız çalışmada sodyum bataryalarına ait farklı geçiş metalleri (TM) üretilerek bataryaların performans sonuçları ortaya koyulmaktadır. Buna göre kullanmış olduğumuz geçiş metalleri aşağıdaki gibidir.

- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})$ (NaMVA)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})$(NaMVT)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})$ (NaMNiA)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})$(NaMNiT)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})$ (NaMCA)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})$ (NaMCT)

Burada ilk olarak batarya performansları için en önemli özelliklerden birisi olan teorik kapasite adımını ele alacağız. Buna göre Genel olarak yukarıdaki kompozisyonların özelliklerini ele almak istersek ilk olarak bataryanın teorik kapasitesini aşağıdaki denklemler ile hesaplarız.

$$Q_{teorik} = \frac{nF}{M_w} \quad Asg^{-1} \tag{1}$$

Burada n, F ve M_w sırasıyla yük taşıyıcı sayısı, Faraday sabiti (F=96 485.3321 s A / mol) ve elektrot içinde kullanılan aktif materyalin moleküler kütlesini temsil etmektedir. Denklem birimleri olan A,s ve g ise sırasıyla amper, saniye ve gram olarak tanımlanır. Denklemdeki saniye (s) birimini saate (h) dönüştürmek istersek aşağıdaki ifadeyi yazarız.

$$Q_{teorik} = \frac{nF}{3600 \times M_w} \quad Ahg^{-1} \tag{2}$$

Yukarıdaki kompozisyonların BatPac programı üzerinden kapasitelerinin teorik hesaplamaları ve mevcut lityum iyon batarya kompozisyonları ile sodyum iyon batarya kompozisyonlarını kıyaslayacağımız verileri üçüncü bölümde ele alınmıştır.

3. Bulgular

Bu kısımda BatPac programından faydalanarak bir takım verileri ele alacağız. BatPac programı bataryaların yüksek miktarda üretimlerinin maliyetlerini tahmin etmekte kullanılan bir yazılımdır. Program güç, enerji, şarj süresi parametrelerinin etkileri ile maliyet hesaplamalarının analizini yapar. Ayrıca bir pil kimyasının, batarya paketinin ve paket tasarımındaki geometrinin maliyet üzerindeki etkilerini ele alabilir.

Bu bağlamda çalışma içerisinde teorik kapasite, maliyet analizi gibi program altyapısı sayesinde hesaplanan değerler incelenmiştir. Buna göre program içerisinde hazır bulunan lityum iyon pil kompozisyonlarına ait değerlerin yanında program ara yüzündeki batarya kimyası içerisine kullanmış olduğumuz sodyum batarya kompozisyonlarının yapısal özelliklerini ekleyerek bir takım sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4 içerisinde lityum ve kullanmış sodyum kompozisyonlara ait teorik kapasite ile deneysel kapasite değerleri gösterilmiştir. Sodyum kompozisyonlara ait deneysel veriler yapmış olduğumuz çalışmalarda elde edilmiştir. Lityum bataryalarına ait veriler ise BatPac programı verilerinden alınan güncel değerlerdir.

Tablo 4. Batarya kompozisyonları için teorik ve deneysel kapasite değerleri

BATARYA KİMYASI	TEORİK KAPASİTE	DENEYSEL KAPASİTE
LFP	170 mAh g^{-1}	150 mAh g^{-1}
NMC-333	300 mAh g^{-1}	155 mAh g^{-1}
NMC-532	299 mAh g^{-1}	161 mAh g^{-1}
NMC-622	298 mAh g^{-1}	180 mAh g^{-1}
NMC-811	297 mAh g^{-1}	212 mAh g^{-1}
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})O_2$	178,61mAh g^{-1}	180,4 mAh g^{-1}
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})O_2$	176,05 mAh g^{-1}	150 mAh g^{-1}
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})O_2$	177,795 mAh g^{-1}	193,6 mAh g^{-1}
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})O_2$	175,258 mAh g^{-1}	175,8 mAh g^{-1}
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})O_2$	177,777 mAh g^{-1}	177,8 mAh g^{-1}
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})O_2$	175,233 mAh g^{-1}	210,6 mAh g^{-1}

Tablo 5 içerisinde ise bu yapılara ait katot materyallerin moleküler ağırlık değerleri gösterilmektedir. Buradaki hesaplamalar yine BatPaC programı kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 5. Batarya kompozisyonlarının moleküler ağırlık değerleri

Moleküler Ağırlık Hesaplamaları										
Tam Adı	Atom	Ni	Al	Mn	Co	Fe	O	Ti	Na	V
	Atomic MW	58,71	26,98	54,94	58,93	55,85	16	47,9	22,99	50,94
NaMVA	100,537		0,07	0,44		0,43	2,00		0,67	0,06
NaMVT	101,994			0,44		0,43	2,00	0,07	0,67	0,06
NaMNiA	101,016	0,06	0,07	0,44		0,43	2,00		0,67	
NaMNiT	102,467	0,06		0,44		0,43	2,00	0,07	0,67	
NaMCA	101,016		0,07	0,44	0,06	0,43	2,00		0,67	
NaMCT	102,480			0,44	0,06	0,43	2,00	0,07	0,67	

Ele almış olduğumuz batarya katot malzemelerinin mevcut verilerine dayanarak yaklaşık fiyat tahminleri yapılabilir. Bunun için kompozisyonların oluşturulmasında kullanılan bileşiklerin ortalama fiyatlarını Tablo 6 ile ortaya koymaktayız. Buna göre Tablo 6 içerisindeki veriler 2024 yılı itibariyle tedarikçilerin her 100 kilogram başına vermiş oldukları yaklaşık fiyat teklifleridir.

Katot aktif maddelerin fiyatları, Denklem 3'e göre metallerin ortalama piyasa fiyatları üzerinden tahmin edilebilir

$$C = C_0 + \frac{1}{MW} * \sum_i x_i * C_i * MW_i \quad (3)$$

Hammadde fiyatları (C_i) kısmen literatürden ve jeolojik araştırmalardan elde edilmiştir. Bununla birlikte, bazı öncü malzemeler için, bu iş için aşırı yüksek olan yalnızca bir laboratuvardan alınan fiyatlar da mevcuttur. Bununla birlikte çalışma içerisinde kullanılan kompozisyon maliyetlerini Tablo 5 ve Tablo 6 verilerini gerekli sıtokiyometrik hesaplamalar ile kullanarak hesaplayabiliriz

Tablo 6. Katot malzemesinde kullanılan bileşiklerin 2024 yılı onaylanmış satıcı fiyatları

Bileşik	Fiyat ($/kg)
Co_2O_3	15
Na_2CO_3	2,45
Mn_2O_3	28
V_2O_5	5
Fe_2O_3	6
Al_2O_3	5
NiO	20
TiO_2	1

Tablo 7 içerisinde gördüğümüz katot malzemelerin kilogram başına düşen maliyetleri hesaplanmaktadır. Bu malzemeler için maliyetler Denklem 4'e göre tahmin edilmiştir

$$C_i = \frac{C_M * MW_M * n}{MW_i} \quad (4)$$

Tablo 7. Katot aktif malzemelerinin yaklaşık olarak hesaplanan fiyat değerleri

Katot Materyal	**Fiyat ($/kg)**
NaMVA	13,22
NaMVT	12,91
NaMNiA	13,66
NaMNiT	13,46
NaMCA	13,63
NaMCT	13,32
LFP	14,00
NMC-333	21,00
NMC-532	20,00
NMC-622	20,60
NMC-811	22,00

Tablo 8 içerisinde yedi farklı batarya için hedeflenen paket gücü, üretim sayısı ve fiziksel parametreler gösterilmektedir.

Tablo 8. Farklı paket güçleri için paketi oluşturan fiziksel parametreler

	Batarya 1	Batarya 2	Batarya 3	Batarya 4	Batarya 5	Batarya 6	Batarya 7
Hedeflenen Pil Paket Gücü 20% SOC, kW	180	220	260	300	120	400	360
Modül başına hücre sayısı (toplam)	12	12	12	12	14	12	18
Modüldeki paralel gruptaki hücre sayısı	1	1	1	1	1	1	2
Satırdaki modül sayısı	5	5	5	5	5	5	6
Paket başına modül sırası sayısı	4	4	4	4	2	4	4
Paralel modül sayısı	1	1	1	1	1	1	1
Yıl başına üretilen paket sayısı	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
UDDS döngüsü için enerji gereksinimi, Wh/mile	250	250	250	250	250	250	350

Yine BatPac verilerini kullanarak yapmış olduğumuz maliyet analizleri ve bu maliyetleri oluşturan batarya özelliklerini; NMC-333, NMC-523, NMC-622, NMC-811, LFP, NaMVA, NaMVT, NaMNiA, NaMNiT, NaMCA ve NaMCT kompozisyonlarını ele aldığımızda Tablo 9 hedefleri için aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

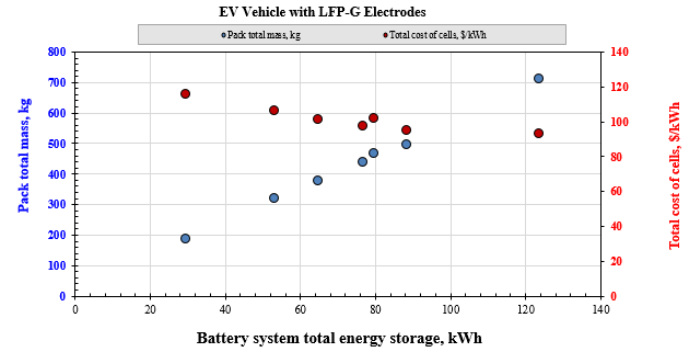
Tablo 9. Batarya kompozisyonları için bataryaların hücre başı maliyetleri

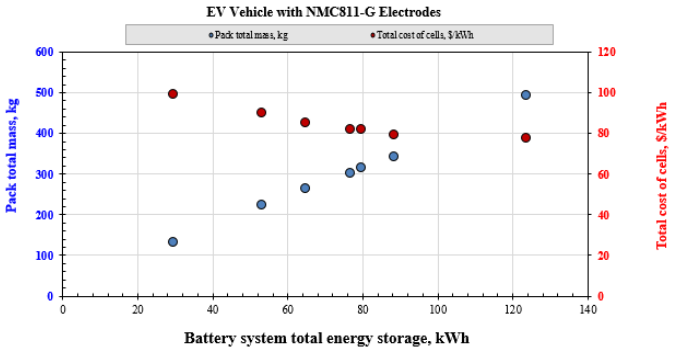
Pozitif Elektrot	**Batarya 1 ($/hücre)**	**Batarya 2 ($/hücre)**	**Batarya 3 ($/hücre)**	**Batarya 4 ($/hücre)**	**Batarya 5 ($/hücre)**	**Batarya 6 ($/hücre)**	**Batarya 7 ($/hücre)**

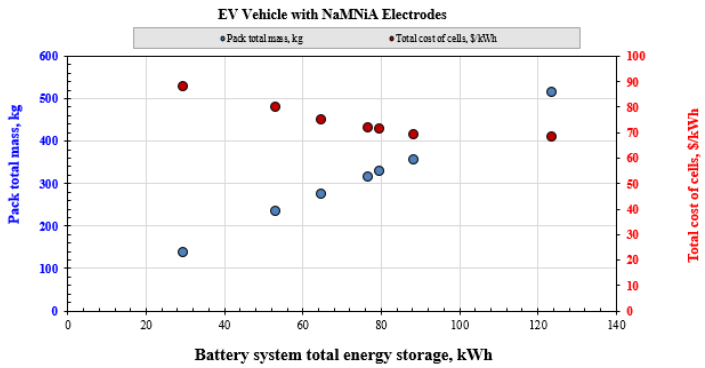
LFP	8,83	8,5	8,16	7,91	8,285	8,5	5,22
NMC-333	7.865	8.857	9.879	10.837	4.994	10.168	14.480
NMC-532	7.864	8.879	9.878	10.837	4.992	10.167	14.480
NMC-622	7.296	8.175	9.086	9.935	4.661	9.350	13,249
NMC-811	7,041	7.823	8.655	9.473	4.489	8.986	12,588
NaMVA	6.83	6.41	6.16	5.91	6.42	6.08	3.89
NaMVT	7.41	7.00	6.16	6.5	7.00	6.66	4.27
NaMNT	6.91	6.58	6.25	6.08	6.57	6,25	3.94
NaMCA	6.91	6.5	6.25	6.08	6.57	6.25	3.94
NaMNiA	6.67	6.25	6.00	5.83	6.28	6.00	3.78
NaMCT	6.41	6.00	5.75	5.5	6.07	5.75	3.61

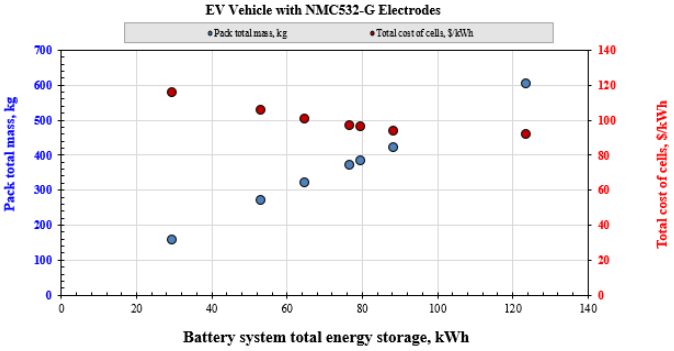
Tablo 9 içerisinde farklı katot malzemelerin belirlenen koşullardaki hücre başı maliyetleri gösterilmektedir. Bu durumda Na-iyon bataryaların Li-iyon bataryalara göre maliyetlerinin çok daha düşük olacağını ve yakın gelecekte Na-iyon bataryalar ile üretilecek elektrikli araçların da maliyetlerinin düşeceği açıktır.

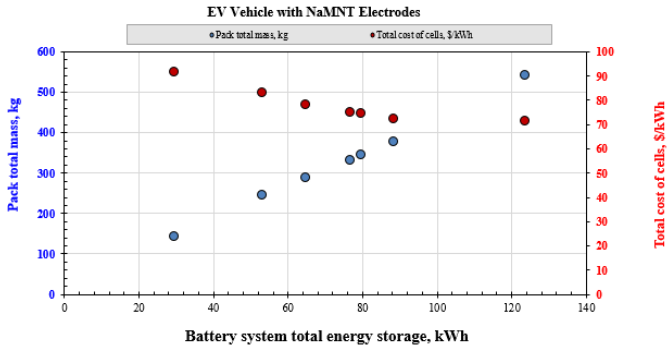
Tablo 10. Lityum ve Sodyum bataryalarına ait performans verileri

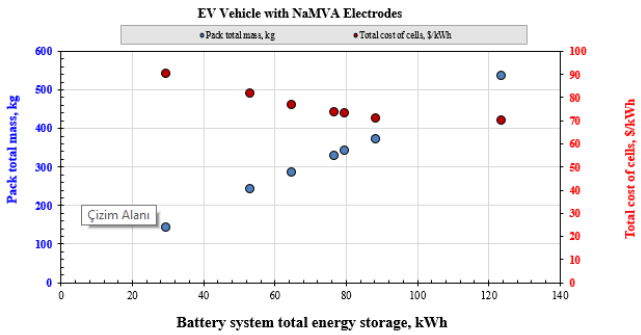


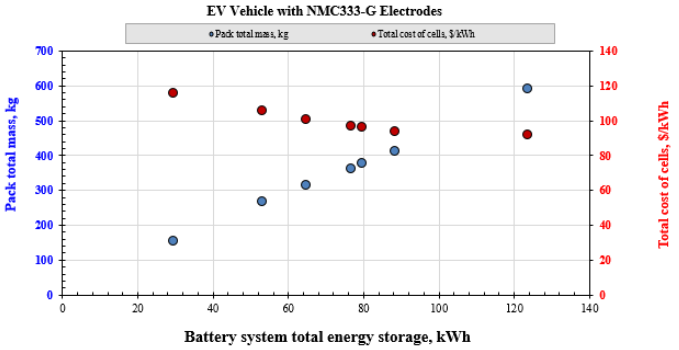


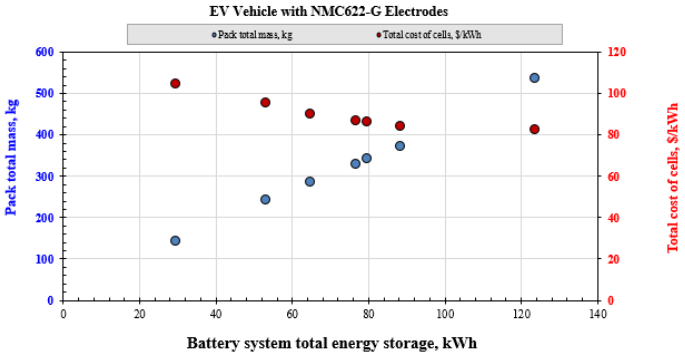












4. Tartışma ve Sonuç

Günümüzde artan enerji talebi doğrultusunda popülerliği artan yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanmasında lityum iyon batarya sistemleri ana aktör konumundadır. Lakin lityum bataryalarının güvenlik riskleri ve maliyeti batarya sistemlerinde bizi alternatif olarak sodyum iyon bataryalarına yöneltti. Sodyum bataryaların elektrokimyasal yapısının lityum bataryalara olan benzerliği malzeme üretiminde altyapısı olan bir sistemi referans almamıza neden oldu.

Yapmış olduğumuz araştırma ile lityum bataryalarına dair elektrikli araçlar baz alınarak kapasite ve menzil gibi performans verileri ele alınmıştır. Buna göre lityum ve sodyum batarya paketinde kullanılan katot materyalinin hücre başı kapasitesini ve maliyetini BatPac program verilerini kullanarak teorik olarak analiz ettik. Bu analizler ile ortaya çıkan Tablo 10 verileri ile batarya performans analizleri ortaya çıktı. Sonuçlara ile sodyum iyon bataryaların fiyat – performans ilişkisinde lityum bataryalara çok güçlü alternatif olabileceği öngörüsünü doğurdu. Ayrıca sodyumun doğada en çok bulunan elementlerden birisi olmasından dolayı maliyet avantajları ve güvenlik risklerinin lityuma bataryalarına nazaran daha az olması yine sodyum iyon pilleri adına gelecek çalışmaları adına umut vaat ettiği görülmektedir. Bu durum yakın gelecekte Na-iyon bataryalar ile çalışan elektrikli araçların da yaygınlaşacağını göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TUBITAK-220N335 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Murat Buldu TUBITAK-BİÇABA programına verdiği doktora bursundan dolayı teşekkür eder.

Kaynakça

[1] https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances,2022.

[2] WBA. Global Bioenergy Statistics. 2021 Yearbook; World Bioenergy Association: Stockholm, Sweden, 2021; p. 51

[3] Aldhafeeri, , T.; Tran, M.-K.; Vrolyk, R.; Pope, M.; Fowler, M. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives. *Inventions* **2020**, *5*, 28. [Google Scholar] [CrossRef]

[4] Shamsi, H.; Tran, M.-K.; Akbarpour, S.; Maroufmashat, A.; Fowler, M. Macro-Level Optimization of Hydrogen Infrastructure and Supply Chain for Zero-emission Vehicles on a Canadian Corridor. *J. Clean. Prod.* **2020**, 125163. [Google Scholar] [CrossRef]

[5] https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701

[6] https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-petrol

[7] Omar Ellabban , Haitham Abu-Rub , Frede Blaabjerg, "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (İngilizce). **39**: 748-764.

[8] Tran, M.-K.; Sherman, S.; Samadani, E.; Vrolyk, R.; Wong, D.; Lowery, M.; Fowler, M. Environmental and Economic Benefits of a Battery Electric Vehicle Powertrain with a Zinc–Air Range Extender in the Transition to Electric Vehicles. Vehicles 2020, 2, 21. [CrossRef]

[9] Tran, M.-K.; Bhatti, A.; Vrolyk, R.; Wong, D.; Panchal, S.; Fowler, M.; Fraser, R. A Review of Range Extenders in Battery Electric Vehicles: Current Progress and Future Perspectives. World Electr. Veh. J. 2021, 12, 54. [CrossRef]

[10] Tran, M.-K.; Akinsanya, M.; Panchal, S.; Fraser, R.; Fowler, M. Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance Optimization Considering Various Powertrain Components and Configurations. *Vehicles* **2021**, *3*, 2. [Google Scholar] [CrossRef]

[11] Cunanan, C.; Tran, M.-K.; Lee, Y.; Kwok, S.; Leung, V.; Fowler, M. A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technol.* **2021**, *3*, 28 [Google Scholar] [CrossRef]

[12] https://www.statista.com/statistics/827460/global-car-sales-by-fuel-technology/

[13] https://www.canalys.com/newsroom/global-ev-sales-h1-2023

[14] Pfrang, A.; Kriston, A.; Ruiz, V.; Lebedeva, N.; di Persio, F. Safety of Rechargeable Energy Storage Systems with a Focus on Li-Ion Technology; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 2017. [CrossRef]

[15] **Sivapriya Mothilal Bhagavathy , Hannah Budnitz , Tim Schwanen , Malcolm McCulloch (2021).** *Impact of Charging Rates on Electric Vehicle Battery Life.* Findings, March

[16] **Manh-Kien Tran , Andre Da Costa , Anosh Mevawalla , Satyam Panchal and Michael Fowler (2021)** *Comparative Study of Equivalent Circuit Models Performance in Four Common Lithium-Ion Batteries: LFP, NMC, LMO, NCA,* . Batteries 2021, 7, 51. https://doi.org/10.3390/ batteries7030051.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Expression Variations of *MBF*-1, *PKS* and *psbA* Genes in *Umbilicaria decussata* Collected from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula) and the Southern Coast of Türkiye

Ekrem Bölükbaşı[*1] , Mehmet Gökhan Halıcı[2]

[*1]Amasya University, Suluova Vocational School, Department of Environmental Protection and Technologies, Amasya, TÜRKİYE
[2]Erciyes University, Science Faculty, Department of Biology, Kayseri, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 21.07.2024, Kabul / Accepted: 29.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Antarctica,
Climate change,
Polar biology,
Gene expression,
qRT-PCR

Abstract: Lichens adapted to extreme conditions through gene expression changes, help monitor environmental and climate change impacts. In this study, *Umbilicaria decussata* (Vill.) Zahlbr. lichen samples were collected with from two different regions: from the Horseshoe Island, located to the west of the Antarctic Peninsula and from the south coast of Türkiye. The *nrITS* gene regions of the samples were studied and the phylogenetic positions of the samples were confirmed as *U. decussata*. After DNA barcoding, comparative determinations of the changes in the expressions of the *multiprotein binding factor-1* (*MBF*-1), *polyketide synthase* (*PKS*) and *photosystem II D1 protein* (*psbA*) genes due to temperature change stress were performed by a qRT-PCR. Specifically, under cold stress conditions such as those found on the Horseshoe Island, the *MBF*-1 gene was highly expressed, while *PKS* and *psbA* gene expression levels were lower compared to the south coast of Türkiye. Specimen collected from different geographical regions exhibited gene expression differences. The results of this study, which is the first in its field, highlight how the adaptation of *Umbilicaria decussata* samples to those habitats and regional climate.

Horseshoe Adası (Antarktika Yarımadası) ve Türkiye'nin Güney Sahilinden Toplanan *Umbilicaria decussata*'da *MBF*-1, *PKS* ve *psbA* Genlerinin İfade Varyasyonları

Anahtar Kelimeler
Antarktika,
İklim değişikliği,
Kutup Biyolojisi,
Gen ekspresyonu,
qRT-PCR

Öz: Likenler gen ifadesi değişiklikleri yoluyla aşırı koşullara adapte olarak, çevresel ve iklim değişikliği etkilerini izlemeye yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada *Umbilicaria decussata* (Vill.) Zahlbr. liken örnekleri Antarktika Yarımadası'nın batısında yer alan Horseshoe Adası'ndan ve Türkiye'nin güney kıyısından olmak üzere iki farklı bölgeden toplandı. Örneklerin *nrITS* gen bölgeleri incelenmiş ve örneklerin filogenetik pozisyonlarının *U. decussata* olduğu doğrulanmıştır. DNA barkodlaması sonrasında, *multiprotein bağlama faktörü-1* (*MBF*-1), *poliketid sentaz* (*PKS*) ve *fotosistem II D1 proteini* (*psbA*) genlerinin sıcaklık değişim stresine bağlı olarak ifadelerindeki meydana gelen değişiklikler qPCR ile karşılaştırmalı olarak tespiti yapılmıştır. Spesifik olarak, Horseshoe Adası'nda olduğu gibi soğuk stresi koşullarında *MBF*-1 geni yüksek oranda eksprese edilirken, *PKS* ve *psbA* gen ekspresyonu seviyeleri Türkiye'nin güney kıyılarına göre daha düşüktü. Farklı coğrafi bölgelerden toplanan örnekler gen ekspresyonu farklılıkları sergilemiştir. Alanında bir ilk olan bu çalışmanın sonuçları, *Umbilicaria decussata* örneklerinin söz konusu habitatlara ve bölgesel iklime nasıl uyum sağladığının altını çizmektedir.

*İlgili Yazar, email: ekrem.bolukbasi@amasya.edu.tr

1. Introduction

Antarctica is the southernmost continent in the world and the fifth largest after Asia, Africa, North America and South America. With a surface area of 14.0 million km^2, it is close to twice the size of Australia and 98 % of Antarctica is covered by ice reaching 1.9 km in thickness, which expands to reach the north of the continent. Antarctica is generally not a suitable habitat for plant growth; however, it has an interesting diversity of vegetation [1]. The extreme conditions and isolation from other continents make Antarctica a unique region and the ability to survive in these unusual terrestrial habitats has arisen due to the many exceptional adaptations of organisms living on this continent [2].

Lichens are the most conspicuous and most diverse macro-organisms of Antarctic terrestrial ecosystems. Studies on Antarctica's lichens date back approximately two centuries, but more recently, with the use of DNA-based techniques in taxonomic studies, the determination of the continent's lichen biodiversity has accelerated [3-5]. The number of lichenized fungal species reported from Antarctica now exceeds 500 [6]. In the 20th century, many authors speculated that endemic Antarctic species had a relic origin dating back to pre-Pleistocene times while expanded populations of bipolar and cosmopolitan species originated from more recent colonization [7-9].

This paper focuses on the examination of specimens of *Umbilicaria decussata* (Vill.) Zahlbr. gathered from two distinct geographical regions: Horseshoe Island, situated to the west of the Antarctic Peninsula and the southern coastline of Türkiye. Our primary objective is to compare the variations in gene expression among the *MBF*-1, *PKS* and *psbA* genes which play important roles in response to environmental stressors. *MBF*-1 helps the lichens adapt to stress conditions by regulating gene expression, *PKS* synthesizes protective natural products and *psbA* optimizes the photosynthesis process within this lichen species. *Umbilicaria decussata* is renowned for being a highly adaptable crustose lichen and frequently serves as one of the initial colonizers of recently exposed rock surfaces. Notably, it exhibits a slow growth rate. This particular species thrives in cool temperate and arctic-alpine environments, with a penchant for colonizing siliceous rocks that have been moistened by rain, a characteristic shared in both polar regions [10]. Presence of it is particularly conspicuous in suitable habitats and is notably common on exposed siliceous rocks, particularly in mountainous regions. The distribution of *U. decussata* spans across Europe and North America, with reports of its presence in diverse locations, including the Arctic, Eurasia, Türkiye, South Africa, Central Asia, North and South America and Antarctica. In Antarctica, This is a rather circumpolar common species nearly found everywhere and in Antarctica it is distributed in continental, maritime and subAntarctic parts of the continent [6].

Gene expression analysis is a highly effective molecular technique utilized to assess the impact of various factors on an organism's stress levels. Diverse organisms, including lichens, have contributed to the pool of genes employed in gene expression analyses, as evident in studies by Halici et al., [11], Ying et al. [12], Qin et al. [13] and Bölükbaşı [14]. With the continuous advancements in science and technology, gene expression studies of lichens, among other organisms, have experienced substantial growth. One common thread among all living entities is their capacity to adapt optimally to environmental influences by modulating gene expression within their genetic framework. Specifically, organisms may react to environmental stress conditions by altering the expression levels of a multitude of genes [15, 16].

The *multiprotein binding factor*-1 (*MBF*-1) gene is a transcriptional co-activator, found in the fungal partner of lichens and plays a role in stress tolerance, just as it does in many other organisms. It is primarily involved in the synthesis of MBF1 proteins, which function as transcriptional co-factors, forming a vital link between transcription factors (TFs) and the TATA box-binding protein (TBP). Typically, this gene is activated in response to a range of stressors, including temperature fluctuations, drought, oxidative conditions, salinity, and pathogenic threats [17]. Notably, the overexpression of the *MBF*-1 gene typically leads to heightened stress resistance and an increased capacity to withstand multiple stressors [18-20].

The *polyketide synthase* (*PKS*) gene is responsible for the synthesis of the polyketide synthesis enzyme complex. The *PKS* gene is an important enzyme complex in lichens that plays a role in the synthesis of natural products and secondary metabolites. These products typically originate from the genetic material of the fungal partner. It is known that lichens produce significant numbers of interesting and potentially bioactive polyketide-type metabolites including anthrones, depsides, depsidones, β-orcinol depsidones, and dibenzofurans. Studies have shown that various stress factors (e.g., salt, metal, drought, and oxidative stress) significantly inhibit the transcription and translation of the *PKS* gene encoding the polyketide synthase enzyme [21-24].

Additionally, the *photosystem II D1 protein* (*psbA*) gene is responsible for the synthesis of the D1 protein, which has a key role in structure of PSII core and is important for a protein supercomplex consisting of many photosystem II (PSII) pigment protein complexes. Typically found in the algal (or cyanobacterial) partner of lichens. Photosynthetic processes are heavily influenced by abiotic and biotic stresses [25, 26] causing inhibition of photosynthetic processes in PSII and, as a consequence, reactive oxygen species formation (ROS). Reactive

oxygen derivatives (ROS) formed under stress conditions do not directly cause photodamage to PSII. By oxidative damage, they destroy important components of PSII including D1 protein (acceptor-side photooxidative damage of D1) causing less effective transfer of asorbed light energy through PSII. However, D1 inhibits the repair of damaged PSII subunits by suppressing protein synthesis. Therefore, there is a change in intracellular *psbA* transcript levels [27-29].

In this research, *Umbilicaria decussata* samples were meticulously gathered and identified from two distinct locales: Horseshoe Island, as polar region, and the southern coast of Türkiye, as non-polar region. We performed comparative analyzes of the expression changes in *MBF*-1, *psbA* and *PKS* genes against cold stress in collected samples. This pioneering study stands as the inaugural exploration of its kind within its specialized domain. This study is the first of its kind in its field and it reveals how *U. decussata* lichen samples collected from markedly different geographical regions (polar and non-polar) adapt to their extreme habitats on the level of molecular biology markers.

2. Materials and Methods

2.1 Sample collection

Lichen samples were collected by the second author from Horseshoe Island and the south coast of Türkiye. During the 6th Turkish National Antarctic Scientific Expedition, a total of 60 samples were obtained: 30 from Horseshoe Island and 30 from the south coast of Türkiye. Collected samples were deposited in the Erciyes University Herbarium in Kayseri, Türkiye (ERCH). The samples were marked and coded according to the region where they were collected as ERCH HS 0.013 and ERCH STR 0.046 from the Horseshoe Island and the south coast of Türkiye, respectively. While collecting the samples; Two distinct sets of samples were collected simultaneously. The first set was designated for morphological and molecular phylogenetic analyses, while the second set was allocated for gene expression studies. Additionally, three sets of samples were taken from each sampling point in both regions. Sample Set 1 was kept on its original rock surface for morphological and phylogenetic analyses. Sample Set 2 was collected for gene expression studies, and Sample Set 3 was reserved as a backup for these analyses.

The samples for morphological and phylogenetic analyses were kept on their parent rock surface and transported to the laboratory intact. As *U. decussata* is a crustose species, it was fragmented to maximize penetration of the RNAlater™ Stabilization Solution (Cat. No. V5381, Merck, Germany; Cat. No. AM7021, Thermo Fisher Scientific, USA), which preserves RNA for varying durations: 1 day at 37 °C, 1 week at 25 °C, 1 month at 4 °C, and indefinitely at -20 °C [30-32]. Samples designated for gene expression studies were stored at -20 °C until laboratory analysis. Special cooler bags were used during transportation, ensuring that RNA integrity was preserved in samples from both Horseshoe Island and the west coast of Türkiye.

2.2 Morphological analyses

The specimens were examined by standard microscopic techniques with an Olympus S2X7 dissecting microscope equipped with an Olympus SC30 image capture system (Olympus, Japan). Handmade sections of ascomata were examined with a Leica DM2500 light microscope (Germany) and microphotographs were taken with a Flexacam C1 digital camera (Leica, Germany). Hand-cut sections were studied in water, 10% potassium hydroxide (K), and Lugol's solution (I). Microscope measurements were made in water. Ascospores were measured from five different ascomata. Measurements are given as minimum-maximum values from n = 20 measurements. The thickness of the spore septum was measured at the outer wall.

2.3 DNA extraction, PCR, sequencing and phylogenetic analyses

Total DNA was extracted from apothecia using the DNeasy Plant Mini Kit (Cat. No. 69104, Qiagen, Germany) according to the manufacturer's instructions. Polymerase chain reaction (PCR) was carried out in reaction volumes of 50 µL using 4 µL of 10× reaction buffer, 4 µL of $MgCl_2$ (50 mm), 0.5 µL of each primer (*ITS1F* and *ITS4*), 2 µL of dNTP (10 mm), 0.2 µL of Taq DNA polymerase, 4 µL of template DNA, and 34.8 µL of ddH_2O on a thermal cycler equipped with a heated lid. The primers *ITS1-F* (forward: 5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') [33, 34] and *ITS4-R* (reverse: 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') [34, 35] were used to amplify the *ITS* sequence. PCR amplification was performed under the following conditions: initial denaturation for 7 min at 95 °C; 6 cycles for 1 min at 94 °C, 1 min at 56 °C, and 1 min at 72 °C; and 30 cycles for 1 min at 94 °C, 1 min at 53 °C, and 2 min at 72 °C. A final extension step of 10 min at 72 °C was added, after which the samples were held at 4 °C. The PCR products were visualized on 1.6% agarose gel as bands of approximately 550 bp (*ITS*). Sequence analyses of the lichen samples obtained from the PCR products were performed by Epigen Biotechnology Laboratory (Ankara, Türkiye).

For phylogenetic analyses, the sequences' similarities to available sequences in the National Center for Biotechnology Information (NCBI) GenBank database were analyzed using the Basic Local Alignment Search Tool (BLASTn program: http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi; [33]. Fungal *ITS* reference sequences were selected to carry out phylogenetic analysis. All sequences were aligned with ClustalW in BioEdit V7.2.6.1 [37] using Geneious®6.1.8. The phylogenetic tree was visualized and edited with MEGA XI using the maximum likelihood method with rapid bootstrapping involving 1000 bootstrap replications [38].

2.4 RNA extraction and complementary DNA (cDNA) synthesis assay

Total RNA extraction was done from the lichen samples collected in cryotubes containing RNAlater™. Stabilization Solution was performed with the reagent of the RNeasy Plus Kit (Cat. No./ID 74034, Qiagen, Germany) according to the procedures suggested by the manufacturer. The amount and purity of RNA were subsequently determined using the NanoDrop ND-Spectrometer 1000 device (NanoDrop Technologies, USA) and 1.0% agarose gel electrophoresis. Next, cDNA synthesis was performed using the ProtoScript-II First Strand cDNA Synthesis Kit (BioLabs Inc., USA). The anchored-oligo(dT)18 primer was used because of the long *MBF-1*, *PKS*, and *psbA* gene regions.

2.5 qRT-PCR analyses

The primers for *MBF-1*, *PKS*, *psbA*, and *β-tubulin* as a housekeeping gene used in this study specific to the regions of interest were designed using information from the NCBI GenBank and the literature. Information about these genes and the primers sequences used in this study is given in Table 1.

Table 1. Gene information with sequences and melting temperatures of primers used in qRT-PCR

Genes/ Primer names	Sequence (5'-3')	Melting temperature (°C)	Source
MBF-1	F: 5' ATGGACGACTGGGACACCGT 3'	58-60 °C	[20]
	R: 5' TCACGATTTCGGCGGGAAAAACGGC 3'		
PKS	F: 5' GCTGTTTTTGCGGGCATGGA 3'	58-60 °C	[39]
	R: 5' CATACGGACGGCTTGATGT 3'		
psbA	F: 5' CACTAATCCGTGAAACTACT 3'	58-60 °C	[40]
	R: 5' TAATCGTCCAAAGTAACCGTG 3'		
β-tubulin	F: 5' GGCGTGACCTTACAGATTC 3'	58-60 °C	[24]
	R: 5' CAAGCTCTTGCTCGTAGTC 3'		

Following cDNA synthesis, real-time PCR applications were performed using SYBR Green I Master dye via the Pico Real Time module (Thermo, Germany). The mRNA levels of *MBF-1*, *PKS* and *psbA* were determined by qPCR method to evaluate the expression levels of the genes. PCR conditions consisted of initial denaturation for 10 min at 95 °C; 40 cycles of 95 °C for 15 s, 60 °C for 20 s, and 72 °C for 30 s; and a melting step of 52 to 95 °C with the temperature increasing by 0.5 °C/min. The qRT-PCR analysis entailed three biological replicates, consisting of three technical replicates using the obtained optimal conditions.

2.6 Normalization and statistical analysis of qRT-PCR results

Gene expression results determined as Ct values were normalized considering the *β-tubulin* gene used in this study as a housekeeping gene [41]. The real-time PCR reactions of the *MBF-1*, *PKS*, and *psbA* genes were monitored simultaneously and their peak profiles were recorded. The Ct values of each sample were determined based on these peak profiles. The mRNA levels of the synthesized gene products were determined quantitatively by the obtained Ct values and melting curve analysis [42] and the obtained data were normalized according to the $2^{-\Delta\Delta Ct}$ method of Livak and Schmittgen [41]. The mean, standard deviation, standard error, and statistical significance values were calculated for the obtained data using IBM SPSS Statistics 25.0 for Windows (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

3. Results

3.1 Morphological and anatomical analysis

The results of the morphological and anatomical analysis of the *Umbilicaria decussata* (Vill.) Zahlbr. specimens that formed the basis of this study are given below.

Specimens studied: Antarctic Peninsula, Horseshoe Island: Lystad Bay, northeast of the Temporary Turkish Science Base, around Col lake-2, 67°49′40″S 67°13′ 25″W, alt. 4-85 m, 14 February 2022, on rocks, leg. M.G. Halici, ERCH HS 0.013. Türkiye, Muğla, Lake Bafa, southeast of Lake Bafa, siliceous rocks, 37°29′18″N, 27° 25′ 62″ E, alt. 15-150 m, 18 December 2022, leg. M.G. Halici, ERCH STR 0.046.

Description: The thallus is hard and has dense reticulate folds in the center on the upper surface, but decreases towards the edges, there is a pruinose structure in the center, but decreases towards the edges, the thallus color becomes more prominent gray, apothecium is rarely found, the lower surface is black sooty, the thalloconidia are brown unicellular. Talloconidia do not have a septum, but rarely a septum can be found. It is similar to *U. nylanderiana*, but morphologically the most distinctive feature is the hard reticulate folds on the upper surface and rarely it can contain apothetium. Tallus K-, C-, KC-, thallus approx. 300-350 µm, upper cortex approx. 20 µm, colorless layer 50 µm, medulla layer 100 µm, algae layer 40 µm, lower hymenium 25 µm, Paraphyse: Branched, 2.5- 4.5 µm, thallus diameter: 2- 4.5 cm, thallus cross-section: 160- 200 µm, apothetium: 0.9- 1.0 mm, hymenium: 80- 90 µm, ascus: 8 spores, 18-20 x 55- 60 µm, spores 14-18 x 4-5 µm (Figure 1).



Figure 1. General view of *Umbilicaria decussata*

3.2 Sequence alignment and phylogenetic analysis of *U. decussata*

All *ITS* sequences were aligned and edited manually using ClustalW in Bioedit V7.2.6.1 [37]. Ambiguous regions were delimited and excluded from the alignment. The final dataset consisted of newly generated sequences from this study and 56 ITS sequences obtained from GenBank (see Appendix A). All new sequences were deposited in GenBank. Phylogenetic trees with bootstrap values were obtained in MEGA XI using the Maximum Likelihood method with a rapid bootstrap with 1000 bootstrap replications [38]. Kimura two-parameter model was used for the analysis of the ML method. *Mycocalicium albonigrum* (Nyl.) Fink was used as the out-group.

In the BLASTn search, the *ITS* sequences of *Umbilicaria decussata* (480 bp after trimming) was most similar to *Umbilicaria proboscidea* (L.) Schrad. In the phylogenetic analyses, sequences of *U. decussata* (ERCH HS 0.013 and ERCH STR 0.046) appear in clade within the *U. decussata* group, with high support in the *ITS* phylogeny (BS = 87%) (Figure 2).

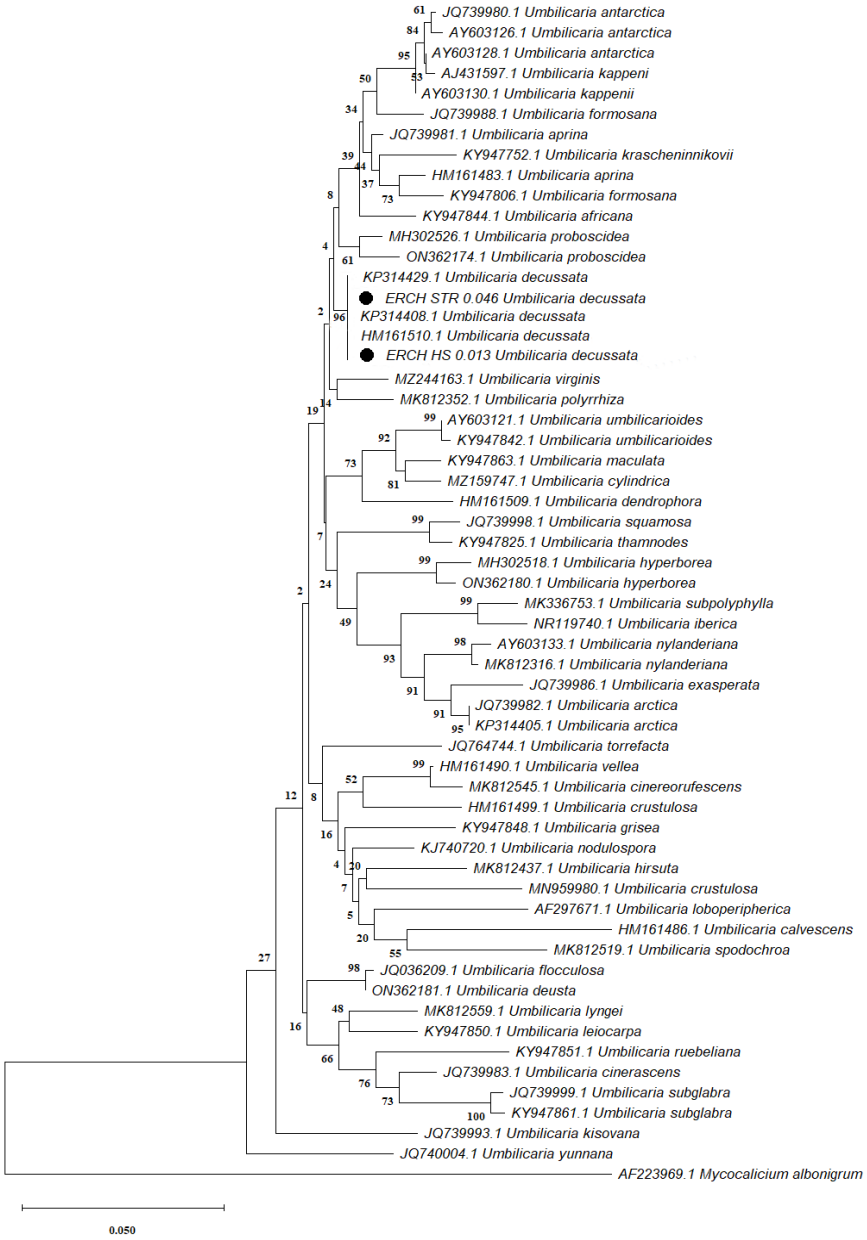


Figure 2. Maximum Likelihood phylogeny of the *ITS* marker. The *U. decussata* species collected from different regions (black) are presented in ERCH HS 0.013 and ERCH STR 0.046 codes.

3.3 qRT-PCR analyses of the *MBF-1*, *PKS*, and *psbA* genes

Based on the normalized gene expression data, the changes in the expression levels of the *MBF-1*, *PKS* and *psbA* genes in *U. decussata* samples collected from different regions were detailed (see Appendix B and C).

From the dataset of the above-specified parameters, it was determined that the expression levels of the *MBF-1* gene were quite different in the *U. decussata* samples collected from the different regions. While the *MBF-1* gene was expressed 10.18-fold in *U. decussata* from the Horseshoe Island, the Antarctic Peninsula (ERCH HS 0.013), it was 3.18-fold in *U. decussata* from the south coast of Türkiye (ERCH STR 0.046). Thus, we observed that the expression change of the *MBF-1* gene in samples of the same species collected from Antarctica and Türkiye varied at a level of approximately 3-fold ($P < 0.05$) (Figure 3).

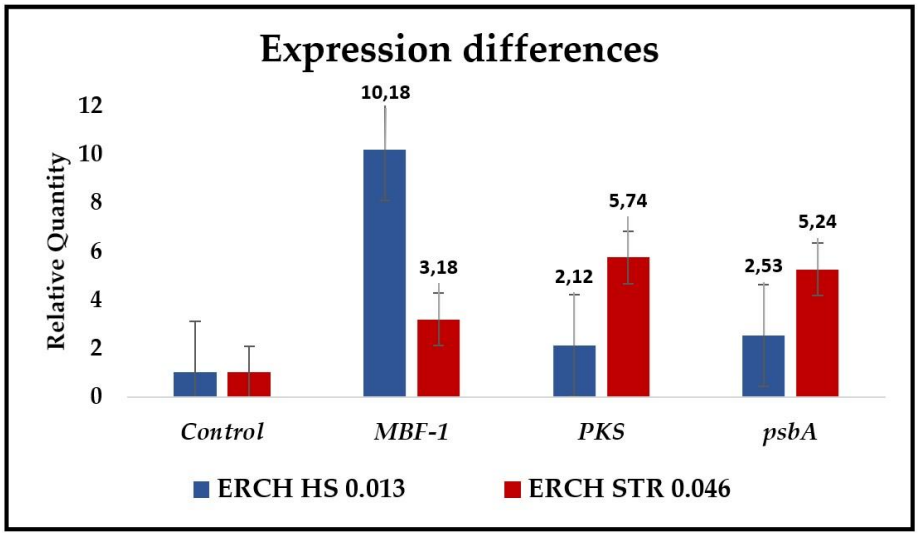


Figure 3. Expression differences of the *MBF-1*, *PKS* and *psbA* genes of the *U. decussata* collected from Horseshoe Island (ERCH HS 0.013) and south coast of Türkiye (ERCH STR 0.046)

Contrary to *MBF-1* gene expression, the level of *PKS* gene expression was lower in the *U. decussata* sample collected from the Horseshoe Island than in the sample collected from the south coast of Türkiye. While this expression level was 2.12-fold in the ERCH HS 0.013 sample, it was approximately 5.74-fold in ERCH STR 0.046 ($P < 0.05$). Similarly, the fold change in *psbA* gene expression was approximately 2.5-fold in the *U. decussata* sample collected from the Horseshoe Island, while it was 5.24-fold in the sample collected from the south coast of Türkiye. Similarly to the *PKS* gene, this constituted a nearly 2-fold decrease in *psbA* gene expression between the regions.

4. Discussion and Conclusion

Lichens stand as remarkable organisms, demonstrating an incredible ability to thrive in the world's most challenging environments. They exhibit survival capabilities in extreme conditions, including deserts, frigid climates, high altitudes and even in simulated outer space conditions. These symbiotic life forms have evolved an array of physiological adaptations, enabling them not only to endure but to thrive in these severe surroundings [43]. Furthermore, they have developed sophisticated mechanisms to shield themselves from the detrimental effects of extreme cold, a particularly vital adaptation for lichens inhabiting high-altitude regions or polar zones. In essence, lichens' capacity to adapt to a diverse range of harsh environments, their resilience, and their survival strategies stand as testament to the remarkable qualities embedded in their genetic makeup [44-47].

Recent studies have focused on conducting phylogenetic analyses of *U. decussata*, a lichen species that inhabits both polar and non-polar regions, shedding light on its evolutionary relationships. By analyzing the genetic relationships between *U. decussata* populations from different geographical locations, researchers have gained insights into the genetic structure of this species [4, 47, 48]. Lichens are often composed of multiple organisms, including both fungal and algal components, which can make DNA extraction and amplification rather difficult. To overcome this challenge, researchers use a variety of molecular techniques, including PCR-based methods and next-generation sequencing, to obtain and analyze DNA from *U. decussata* samples. With these techniques, researchers have been able to generate high-quality genetic data for use in phylogenetic analysis [49]. As a result of the molecular phylogenetic analyses performed in the present study, the diagnosis gene expression differences were found between the *U. decussata* lichen specimens collected from both the Horseshoe Island and those from the southern coast of Türkiye.

When considering the geographical distribution of a single lichen species, lichens encounter a range of location-specific abiotic stresses, including factors like low temperatures, desiccation, intense sunlight and oxidative stress [15, 19]. A limited number of studies have shown that the expression levels of genes such as *MBF-1* [20, 47, 50], *psbA* [26, 28, 47] and *PKS* [22, 23, 47] are significantly altered under various abiotic and biotic stress conditions. Our findings clearly indicate that these genes play important roles in stress tolerance in the lichenized fungal species *U. decussata*.

Some recent research has shed new light on the *MBF-1* gene expression of some plants under cold stress. In these studies, plants samples were subjected to low-temperature conditions for a period of time and the expression of the *MBF-1* gene was analyzed through a variety of techniques. The results indicated that the *MBF-1* gene was significantly upregulated in response to cold stress [47, 51]. Similarly, in our study, significant differences were

detected in the *MBF-1* gene in samples collected from the Horseshoe Island and the southern coast of Türkiye. Compared to the samples collected from the southern coast of Türkiye, the *MFP-1* gene was expressed at levels approximately 3 times higher in the samples collected from Horseshoe Island, providing resistance to extreme cold.

The *PKS* gene encodes the polyketide synthase enzyme, pivotal for generating bioactive polyketide-type metabolites. Its expression is intricately controlled by diverse environmental factors, temperature among them. However, under many stress conditions, including cold stress, the transcription and translation of the *PKS* gene may be significantly inhibited, which could reduce the production of these metabolites. Especially under cold stress, the expression of *PKS* can be upregulated or downregulated depending on the severity and duration. Recent studies have shown that the expression of polyketide synthase genes is altered under cold stress conditions, leading to changes in the production of important natural products [47, 52, 53]. This could be particularly problematic in extreme environments like Antarctica. Our results showed that the *PKS* gene was inhibited in extreme cold. The expression of the *PKS* gene was determined at 5.74-fold in the samples collected from the Horseshoe Island, which is dominated by extreme cold stress. This constituted a comparative decrease in the expression of the *PKS* gene by approximately 2.1-fold, revealing that *U. decussata* could cope with extreme cold stress by reducing the level of *PKS* gene expression.

Another analyzed gene, *psbA* is responsible for synthesizing the D1 protein, which is critical to the functioning of PSII in the biophysical processes of photosynthesis. The D1 protein, encoded by the *psbA* gene, is an essential subunit of the PSII complex. *psbA* gene expression is known to be influenced by various stress conditions, photoinhibition in particular [54] and photoinhibition under chilling conditions [55]. Thus, exposure to environmental stress can increase the production of ROS, which can cause oxidative damage to the PSII complex and result in decreased D1 protein expression. Previous studies have reported that salt stress, oxidative stress [56], metal stress [29] and cold stress [47, 57] prevented the repair of photodamaged PSII subunits by inhibiting the transcription and translation of *psbA*. The *psbA* gene expression levels of the *U. decussata* samples collected from the south coast of Türkiye were approximately 2.1 times higher compared to the samples from Horseshoe Island. Thus, similar to the *PKS* gene, the *psbA* gene was found to be inhibited in extreme cold, as also stated in the literature.

All these findings collectively indicate that the widely distributed lichen species *U. decussata* has evolved intricate mechanisms to thrive in challenging environmental conditions, and the analysis of gene expression can yield valuable insights into these mechanisms. Among these complex adaptations employed by *U. decussata* to confront stress is the regulation of the *MBF*-1, *PKS* and *psbA* genes in response to cold stress. Such adaptive mechanisms hold immense importance for the survival of lichens in the harshest of environments.

In conclusion**,**

This study on gene expression in *Umbilicaria decussata* (Vill.) Zahlbr. offers valuable insights into how lichens adapt to environmental stress. The variations in the expression levels of *MBF*-1, *PKS* and *psbA* genes in samples from different regions suggest that environmental stress may influence gene expression patterns. For example, under cold stress conditions characteristic of Horseshoe Island, the *MBF*-1 gene showed higher expression, while *PKS* and *psbA* expression levels were relatively lower compared to samples from the south coast of Türkiye. These findings indicate that *U. decussata* may regulate its gene expression in response to different stress conditions across geographic locations. The results serve as a preliminary environmental observation, paving the way for more detailed experimental studies in the future.

Funding

This study was conducted under the auspices of the Presidency of the Republic of Türkiye, with support from the Ministry of Industry and Technology. And also, the authors gratefully acknowledge the financial support of this research by Scientific and Technological Research Council of Türkiye (Project No: 121Z771).

Acknowledgment

The authors thank two anonymous reviewers for their valuable feedback, which helped to improve the manuscript. Additionally, the authors wish to express their gratitude to the Marmara Research Centre (TÜBİTAK-MAM-KARE)-Polar Research Institute and the General Directorate of Meteorology.

Appendices

The data that support the findings of this study are available in the supplementary material of this article. **Appendix A;** ITS sequences used in the phylogenetic analysis. **Appendix B;** Expression data of normalized *MBF*-1, *psbA*, and *PKS* genes of *Umbilicaria decussata* collected from Horseshoe Island and the south coast of Türkiye. **Appendix C;** Mean, standard deviation, and standard error values of expression data of normalized *MBF*-1, *psbA*, and *PKS* genes of *Umbilicaria decussata* collected from Horseshoe Island and the south coast of Türkiye.

Conflicts of interest

Authors have no any financial or personal relationships with other individuals or organizations that might inappropriately influence this work during the submission process.

Statement contribution of the authors

This study's experimentation, analysis and writing, etc. all steps were made by the authors.

Statement of ethics

There is no need for an ethics committee decision for the studies in the article.

References

[1] Green, T.A., Schroeter, B., Sancho, L.G. 2007. Plant life in Antarctica. Func. Plant Eco. 1, 389-434. CRC press.

[2] Convey, P., Chown, S.L., Clarke, A., Barnes, D.K., Bokhorst, S., Cummings, V., Wall, D.H. 2014. The spatial structure of Antarctic biodiversity. Ecological Monographs 84, 203-244. doi.org/10.1890/12-2216.1

[3] Park, C.H., Kim, K.M., Elvebakk, A., Kim, O.S., Jeong, G., Hong, S.G. 2015. Algal and fungal diversity in Antarctic lichens. J. Eukaryot. Microbiol. 62, 196-205. doi.org/10.1111/jeu.12159

[4] Halici, M.G., Timdal. E., Möller. E., Bölükbaşı. E., Kahraman-Yiğit, M. 2022a. *Rhizocarpon ozsoyae* sp. nova (Rhizocarpaceae, lichenized Ascomycetes) from James Ross Island (Antarctic Peninsula). Herzogia 35, 105-114. doi: 10.13158/heia.35.1.2022.105

[5] Halici, M.G., Güllü, M., Bölükbaşı, E., Kahraman-Yiğit, M. 2022b. *Shackletonia backorii*-A new species of lichenised fungus from James Ross Island (Antarctic Peninsula). Turk. J. Bot. 46, 500-506. doi: 10.55730/1300-008X.2725. 10

[6] Øvstedal, D.O., Smith, R.I.L. 2001. Lichens of Antarctica and South Georgia: A guide to their identification and ecology. Cambridge University Press. Cambridge.

[7] Lamb, I.M. 1948. New rare or interesting lichens from the Southern Hemisphere I. Lilloa, 14, 203-251.

[8] Lamb, I.M. 1970. Antarctic terrestrial plants and their ecology. Holdgate, MW Antarctic Ecology.

[9] Seppelt, R.D., Nimis, P.L., Castello, M. 1998. The genus *Sarcogyne* (Acarosporaceae) in Antarctica. The Lichenologist 30, 249-258. doi.org/10.1006/lich.1998.0135

[10] Nimis, P.L. 2003. Checklist of the Lichens of Italy 3.0.Trieste: University of Trieste, Department of Biology. http://dbiodbs.univ.trieste.it/, accessed on July 2022.

[11] Halici, M.G., Güllü, M., Bölükbaşı, E., Kahraman-Yiğit, M. 2023a. *Thamnolecania yunusii* (Ramalinaceae)-A new species of lichenised fungus from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula). Polar Rec. 59, 1-7. doi:10.1017/S003224742300030X

[12] Ying, S.H., Ji, X.P., Wang, X.X., Feng, M.G., Keyhani, N.O. 2014. The *transcriptional co-activator multiprotein bridging factor* 1 from the fungal insect pathogen, *Beauveria bassiana*, mediates regulation of hyphal morphogenesis, stress tolerance and virulence. Environ. Microbio. 16, 1879-1897. doi.org/10.1111/1462-2920.12450

[13] Qin, D., Wang, F., Geng, X., Zhang, L., Yao, Y., Ni, Z., Sun, Q. 2015. Overexpression of heat stress-responsive *TaMBF1c*, a wheat (*Triticum aestivum* L.) Multiprotein Bridging Factor, confers heat tolerance in both yeast and rice. Plant Mol. Bio. 87, 31-45. doi.org/10.1007/s11103-014-0259-9

[14] Bölükbaşı, E. 2021. Expression analysis of some stress-related genes induced by cadmium on tomato (*S. lycopersicum*) plants. Hittite J. Sci. and Engine. 8, 339-345. doi.org/10.17350/HJSE19030000247

[15] Zhang, T., Wei, J. 2011. Survival analyses of symbionts isolated from *Endocarpon pusillum* Hedwig to desiccation and starvation stress. China Life Sci. 54, 480-489. doi.org/10.1007/s11427-011-4164-z

[16] Bölükbaşı, E. 2022. Influence of boron treatments on fatty acid desaturase metabolism in different safflower cultivars. Plant, Soil and Environ. 68, 479-486. doi.org/10.17221/228/2022-PSE

[17] Zhou, J., Chen, Q., Zhang, Y., Fan, L., Qin, Z., Chen, Q., Zhao, L. 2018. *Chitooligosaccharides* enhance cold tolerance by repairing photodamaged PS II in rice. J. Agri. Sci. 156, 888-899. doi:10.1017/S0021859618000862

[18] Arce, D.P., Godoy, A.V., Tsuda, K., Yamazaki. K., Valle, E.M., Iglesias, M.J., Mauro, M.F.D., Casalongué, C.A. 2010. The analysis of an *Arabidopsis* triple knock-down mutant reveals functions for *MBF1* genes under oxidative stress conditions. J. Plant Physiol. 167, 194-200. doi.org/10.1016/j.jplph.2009.09.003

[19] Arce, D.P., Tonón, C., Zanetti, M.E., Godoy, A.V., Hirose, S., Casalongué, C.A. 2006. The potato transcriptional co-activator *StMBF1* is up-regulated in response to oxidative stress and interacts with the TATA-box binding protein. J. Biochem. Mol. Biol. 39, 355-360. doi.org/10.5483/BMBRep.2006.39.4.355

[20] Wang, Y.Y., Wei, X.L., Huang, J.P., Wei, J.C. 2017a. Modification and functional adaptation of the *MBF1* gene family in the lichenized fungus *Endocarpon pusillum* under environmental stress. Sci. Rep. 7, 16333. doi.org/10.1038/s41598-017-16716-4

[21] Gagunashvili, A.N., Davíðsson, S.P., Jónsson, Z.O., Andrésson, Ó.S. 2009. Cloning and heterologous transcription of a *polyketide synthase* gene from the lichen *Solorina crocea*. Mycological Res. 113, 354-363. doi.org/10.1016/j.mycres.2008.11.011

[22] Timsina, B.A., Hausner, G., Piercey-Normore, M.D. 2014. Evolution of ketosynthase domains of *polyketide synthase* genes in the *Cladonia chlorophaea* species complex (Cladoniaceae). Fungal Bio. 118, 896-909. doi.org/10.1016/j.funbio.2014.08.001

[23] Wang, Y., Zhou, X., Hur, J.S., Wang, J. 2014. Isolation and charcterizaiton of a *polyketide synthase* gene cluster from *Usnea longissima*. Acta Microbiologica Sinica 54, 770-777. PMID: 25252458

[24] Abdel-Hameed, M., Bertrand, R.L., Piercey-Normore, M.D., Sorensen, J.L. 2016. Putative identification of the usnic acid biosynthetic gene cluster by de novo whole-genome sequencing of a lichen-forming fungus. Fungal Bio. 120, 306-316. doi.org/10.1016/j.funbio.2015.10.009

[25] Klein, R.R., Mullet, J.E. 1987. Control of gene expression during higher plant chloroplast biogenesis protein synthesis and transcript levels of *psbA*, *psaC, psaB* and *rblc* in dark-grown and illuminated Barley seedlings. J. Biol. Chem. 262, 4341-4348. doi.org/10.1016/S0021-9258(18)61353-5

[26] Mulo, P., Sicora, C., Aro, E.M. 2009. Cyanobacterial *psbA* Gene family: Optimization of oxygenic photosynthesis. Cell. Mol. Life. Sci. 66, 3697-3710. doi.org/10.1007/s00018-009-0103-6

[27] Kos, P.B., Deak, Z., Cheregi, O., Vass, I. 2008. Differential regulation of *psbA* and *psbD* gene expression, and the role of the different D1 protein copies in the cyanobacterium *Thermosynechococcus elongatus* BP-1. Biochim Biophys Acta 1777, 74-83. doi.org/10.1016/j.bbabio.2007.10.015

[28] Sander, J., Nowaczyk, M., Kopczak, M., Rögner, M. 2008. Role of the *psbA* gene family of PSII from the thermophilic cyanobacterium *Thermosynechococcus elongatus*. In Photosynthesis. Energy from the Sun. 14th International Congress on Photosynthesis 1, 745-748. Springer Netherlands.

[29] Qian, H., Li, J., Sun, L., Chen, W., Sheng, G.D., Liu, W., Fu, Z. 2009. Combined effect of copper and cadmium on *Chlorella vulgaris* growth and photosynthesis-relatedgene transcription. Aquat. Toxicol. 94, 56-61. doi.org/10.1016/j.aquatox.2009.05.014 30,31,32

[30] Kamitani, M., Nagano, A.J., Honjo, M.N., Kudoh, H., 2016. RNA-Seq reveals virüs-virus and virüs-plant interactions in nature. J. Microbiol. Ecol. 92, 176. doi:10.1093/femsec/fiw176

[31] Honjo, M.N., Emura, N., Kawagoe, T., Sugisaka, J., Kamitani, M., Nagano, A.J., 2020. Seasonality of interactions between a plant virus and its host during persistent infection in a natural environment. J. Microbiol. Eco. 14, 506-518. doi:10.1038/ s41396-019-0519-4

[32] Hamim, I., Suzuki, J.Y., Borth, W.B., Melzer, M.J., Wall, M.M., Hu, J.S., 2022. Preserving plant samples from remote locations for detection of RNA and DNA viruses. Frontiers in Microbio. 13, 930329. doi:10.3389/fmicb.2022.930329

[33] Gardes, M., Bruns, T.D. 1993. *ITS* primers with enhanced specificity for basidiomycetes14 application to the identification of mycorrhizae and rusts. Mol. Eco. 2, 113-118. doi: 10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x

[34] Seymour, F., Crittenden, P., Wirtz, N., Øvstedal, D., Dyer, P., Lumbsch, H. 2007. Phylogenetic and morphological analysis of Antarctic lichen-forming *Usnea* species in the group Neuropogon. Antarctic Sci. 19, 71-82. doi: 10.1017/S0954102007000107

[35] White, T. J., Bruns, T., Lee, S., Taylor, J. 1990. Amplification and direct sequencing of *fungal 7 ribosomal RNA* genes for phylogenetics. *In*: Innis, M.A., Gelfand, D.H., Sninsky, J.J., White, T.J. (eds.) PCR protocols: A guide to methods and applications. Academic Press 1, 315-322.

[36] Altschul, S.F., Gish, W., Miller, W., Myers, E.W., Lipman, D.J. 1990. Basic local alignment search tool. J. Mol. Bio. 215, 403-410. doi.org/10.1016/S0022-2836(05)80360-2

[37] Hall, T.A. 1999. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. In Nucleic acids symposium series 41, 95-98, London Information Retrieval Ltd.

[38] Tamura, K., Stecher, G., Kumar, S. 2021. MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. Mol. Bio. and Evo. 38, 3022-3027. doi.org/10.1093/molbev/msab120

[39] Kim, D.G., Lee, C., Park, S.M., Choi, Y.E. 2014. Manipulation of light wavelength at appropriate growth stage to enhance biomass productivity and fatty acid methyl ester yield using *Chlorella vulgaris*. Bioresource Techno. 159, 240-248. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.078

[40] Sen, G., Eryilmaz, I.E., Ozakca, D. 2014. The effect of aluminium-stress and exogenous spermidine on chlorophyll degradation, glutathione reductase activity and the *photosystem II D1 protein gene* (*psbA*) transcript level in lichen *Xanthoria parietina*. Phytochem. 98, 54-59. doi.org/10.1016/j.phytochem.2013.11.021

[41] Livak, J.K., Schmittgen, D.T. 2001. Analysis of relative gene expression data using Real-Time Quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta Ct}$ method. Methods 25, 402-408. doi: 10.1006/meth.2001.1262

[42] Kubista, M., Andrade, J.M., Bengtsson, M., Forootan, A., Jonak, J. 2006. The real-time polymerase chain reaction. Mol. Aspects Med. 2, 95-125. doi:10.1016/j.mam.2005.12.007

[43] Barták, M., Váczi, P., Hájek, J. 2007. Low-temperature limitation of primary photosynthetic processes in Antarctic lichens *Umbilicaria antarctica* and *Xanthoria elegans*. Polar Bio. 31, 47-51. doi.org/10.1007/s00300-007-0331-x

[44] Kyriatzi, A., Tzivras, G., Pirintsos, S., Kotzabasis, K. 2021. Biotechnology under extreme conditions: Lichens after extreme UVB radiation and extreme temperatures produce large amounts of hydrogen. J. Biotech. 342, 128-138. doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.10.011.

[45] Da Silva, M.K., Da Silva, A.V., Fernandez, P.M., Montone, R.C., Alves, R.P., De Queiroz, A.C., Duarte, A.W. 2022. Extracellular hydrolytic enzymes produced by yeasts from Antarctic lichens. Anais da Academia Brasileira de Ciências 94. doi 10.1590/0001-3765202220210540

[46] Halici, M.G., Kahraman-Yiğit, M., Bölükbaşı, E., Güllü, M. 2023b. New record and new species of lichenized fungal genus *Candelariella* Müll. Arg. in Antarctica. Polish Polar Res. 44, 1-15. 10.24425/ppr.2023.144537

[47] Bölükbaşı, E., Halıcı, M.G. 2024. Molecular signatures of environmental adaptation mechanisms of *Rhizocarpon geographicum* in Horseshoe Island (west of the Antarctic Peninsula) and Türkiye. Polar Science, 101134.

[48] McCarthy, P., Elix, J. 2014. The lichen genus *Rhizocarpon* in mainland Australia. Telopea 16, 195-211. doi.org/10.7751/telopea20148124

[49] Roca-Valiente, B., Hawksworth, D., Pérez-Ortega. S. 2016. Type studies in the *Rhizocarpon geographicum* group (Rhizocarpaceae, lichenized Ascomycota). The Lichenologist 48(2) 97-110. doi:10.1017/S002428291500050X

[50] Wang, Y.Y., Liu, R.D., Wang, W.C., Wei, X., Wei, J. 2017b. Nucleotide differences in the *MBF*-1 gene of the lichenized fungus *Umbilicaria decussata* collected in polar and non-polar regions. Adv. Polar Sci. 28, 43-49. doi.org 10.13679/j.advps.2017.1.00043

[51] Suzuki, N., Rizhsky, L., Liang, H., Shuman, J., Shulaev, V., Mittler, R. 2005. Enhanced tolerance to environmental stress in transgenic plants expressing the *transcriptional coactivator multiprotein bridging factor* 1c. Plant Physio. 139, 1313-1322. doi.org/10.1104/pp.105.070110

[52] Ma, Z., Tan, Y., Cui, G., Feng, Y., Cui, Q., Song, X. 2015. Transcriptome and gene expression analysis of DHA producer *Aurantiochytrium* under low temperature conditions. Sci. Rep. 5, 1-13. doi:10.1038/srep14446

[53] Kraft, M., Scheidegger, C., Werth, S. 2022. Stressed out: The effects of heat stress and parasitism on gene expression of the lichen-forming fungus *Lobaria pulmonaria*. The Lichenologist 54, 71-83. doi:10.1017/S0024282921000463

[54] Zhuang, K., Kong, F., Zhang, S., Meng, C., Yang, M., Liu, Z., Wang, Y., Ma, N., Meng, Q. 2019. *Whirly1* enhances tolerance to chilling stress in tomato via protection of *photosystem II* and regulation of starch degradation. New Phytol. 221, 1998-2012.

[55] Zhuang, K., Wang, J., Jiao, B., Chen, C., Zhang, J., Ma, N., Meng, Q. 2020. *SlWHIRLY1* maintains leaf photosynthetic capacity in tomato by regulating the expression of *SlRbcS1* under chilling stress. J. Exp. Bot. 71, 3653-3663.

[56] Allakhverdiev, S.I., Nishiyama, Y., Miyairi, S., Yamamoto, H., Inagaki, N., Kanesaki, Y., Murata, N. 2002. Salt stress inhibits the repair of photodamaged photosystem II by suppressing the transcription and translation of *psbA* genes in *Synechocystis*. Plant Physiol. 130, 1443-1453. doi.org/10.1104/pp.011114

[57] Rogalski, M., Schottler, M.A., Thiele, W., Schulze, W.X., Bock, R. 2008. *Rpl33*, a nonessential plastid-encoded ribosomal protein in tobacco, is required under cold stress conditions. The Plant Cell 20, 2221-2237. doi.org/10.1105/tpc.108.060392

Appendices

Appendix A. *ITS* sequences used in the phylogenetic analysis, with newly generated data in bold

	Genbank Number	**Locality**
ERCH HS 0.013 *Umbilicaria decussata*	**OR506209**	Horseshoe Island, Antarctica
ERCH STR 0.046 *Umbilicaria decussata*	**OR506252**	Lake Bafa, Muğla, Türkiye
Umbilicaria africana	KY947844	Ethiopia
Umbilicaria antarctica	JQ739980	Antarctica
Umbilicaria antarctica	AY603128	Lagoon Island, Antarctica
Umbilicaria antarctica	AY603126	Lagoon Island, Antarctica
Umbilicaria aprina	JQ739981	China
Umbilicaria aprina	HM161483	Bolivia
Umbilicaria arctica	JQ739982	Arctic
Umbilicaria arctica	KP314405	Svalbard
Umbilicaria calvescens	HM161486	Bolivia
Umbilicaria cinerascens	JQ739983	China
Umbilicaria cinereorufescens	MK812545	Norway
Umbilicaria crustulosa	HM161499	Bolivia
Umbilicaria crustulosa	MN959980	-
Umbilicaria cylindrica	MZ159747	United Kingdom
Umbilicaria decussata	HM161510	Bolivia
Umbilicaria decussata	KP314429	Svalbard
Umbilicaria decussata	KP314408	Svalbard
Umbilicaria dendrophora	HM161509	Bolivia
Umbilicaria deusta	ON362181	Canada
Umbilicaria exasperata	JQ739986	Arctic
Umbilicaria flocculosa	JQ036209	-
Umbilicaria formosana	JQ739988	China
Umbilicaria formosana	KY947806	China
Umbilicaria grisea	KY947848	Ukraine
Umbilicaria hirsuta	MK812437	Norway
Umbilicaria hyperborea	MH302518	USA
Umbilicaria hyperborea	ON362180	Canada

Umbilicaria iberica	NR119740	Spain
Umbilicaria kappeni	AJ431597	Lagoon Island, Antarctica
Umbilicaria kappenii	AY603130	Leonie Island, Antarctica
Umbilicaria kisovana	JQ739993	China
Umbilicaria krascheninnikovii	KY947752	Russia
Umbilicaria leiocarpa	KY947850	France
Umbilicaria loboperipherica	AF297671	-
Umbilicaria lyngei	MK812559	Norway
Umbilicaria maculata	KY947863	France
Umbilicaria nodulospora	KJ740720	USA
Umbilicaria nylanderiana	AY603133	Livingston Island, Antarctica
Umbilicaria nylanderiana	MK812316	Norway
Umbilicaria polyrrhiza	MK812352	Norway
Umbilicaria proboscidea	MH302526	USA
Umbilicaria proboscidea	ON362174	Canada
Umbilicaria ruebeliana	KY947851	Norway
Umbilicaria spodochroa	MK812519	Norway
Umbilicaria squamosa	JQ739998	China
Umbilicaria subglabra	JQ739999	China
Umbilicaria subglabra	KY947861	France
Umbilicaria subpolyphylla	MK336753	France
Umbilicaria thamnodes	KY947825	China
Umbilicaria torrefacta	JQ764744	USA
Umbilicaria umbilicarioides	AY603121	Lagoon Island, Antarctica
Umbilicaria umbilicarioides	KY947842	Chile
Umbilicaria vellea	HM161490	Bolivia
Umbilicaria virginis	MZ244163	USA
Umbilicaria yunnana	JQ740004	China
Mycocalicium albonigrum	AF223969	New Zealand

Appendix B. Expression data of normalized *MBF-1*, *psbA*, and *PKS* genes of *Umbilicaria decussata* collected from Horseshoe Island (HS) and the south coast of Türkiye (STR)

	Umbilicaria decussata (Horseshoe Island) (ERCH HS 0.013)											
	MBF-1-a	***MBF-1-b***	***MBF-1-c***	**Mean**	***psbA-1***	***psbA-2***	***psbA-3***	**Mean**	***PKS-1***	***PKS-2***	***PKS-3***	**Mean**
Control	32,12	32,45	32,48	**32,350**	30,12	31,45	31,48	**31,017**	30,12	30,45	30,48	**30,350**
ERCH HS 0.013	28,986	29,36	28,754	**29,033**	30,996	29,891	29,954	**30,280**	29,879	28,125	30,005	**29,336**
	Umbilicaria decussata (south coast of Türkiye) (ERCH STR 0.046)											
	MBF-1-a	***MBF-1-b***	***MBF-1-c***	**Mean**	***psbA-1***	***psbA-2***	***psbA-3***	**Mean**	***PKS-1***	***PKS-2***	***PKS-3***	**Mean**
Control	29,36	29,98	29,44	**29,593**	29,36	29,98	29,44	**29,593**	29,36	29,98	30,44	**29,927**
ERCH STR 0.046	27,698	28,102	28,0025	**27,934**	27,175	27,058	27,091	**27,108**	28,125	28,365	27,074	**27,855**

Appendix C. Mean, standard deviation, and standard error values of expression data of normalized *MBF-1*, *psbA* and *PKS* genes of *Umbilicaria decussata* collected from Horseshoe Island (ERCH HS 0.013) and the south coast of Türkiye (ERCH STR 0.046)

	Mean			**Standard deviation**			**Standard error**		
	MBF-1	***psbA***	***PKS***						
Control	1	1	1	***MBF-1***	***psbA***	***PKS***	***MBF-1***	***psbA***	***PKS***
ERCH HS 0.013	**10,18**	**2,12**	**2,53**	2,651	1,368	2,153	1,530	0,790	1,243
ERCH STR 0.046	**3,18**	**5,74**	**5,24**	0,484	1,616	4,403	0,279	0,933	2,542

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institute of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Geothermal Power Plant Design of Double-Flash Type using EES Numerical Analysis

Erva Kalkan[*1] **, Akin İlhan**[2]

[*1] Department of Mechanical Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, ANKARA
[2] Department of Energy Systems Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, ANKARA

(Alınış / Received: 22.09.2024, Kabul / Accepted: 31.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Geothermal energy facility,
Double-flash,
Renewable power,
EES numerical analysis

Abstract: The need for energy is rapidly increasing due to the meteoric increase in the population as well as economic and social life. However, moving forward with non-renewable energy sources such as fossil fuels. The depleting characteristics of fossil fuels have increased the demand for clean, sustainable, and renewable sources. In this way, with the utilization of green energy sources, it would not only be possible to meet the further growing global demand for energy, but also alleviate global warming. Double-flash geothermal power plants can be considered an alternative approach to meet today's energy demand. In geothermal power plants, the electrical power is obtained by the high enthalpy content of hot water. Such power plants provide environmentally friendly and sustainable energy production by utilizing reserves found in various parts of the World. In this study, a 40 MW double-flash geothermal power plant was specially designed with the numerical calculations using the Engineering Equation Solver (EES) program. Initially, the design of the geothermal power plant was determined using various methods. Plus, the detailed analyses of the efficiency, power computations, and the power plant were carried out. Eventually, depending on the necessary computations, it was concluded that the designed geothermal power plant with the rated power of 40 MW may meet the needs of electricity for the half of a medium-sized city of Türkiye has a population of 100,000.

EES Yazılım Programı Kullanılarak Çift Flaşlı Jeotermal Enerji Santrali Tasarımı ve Sayısal Analizi

Anahtar Kelimeler
Jeotermal enerji tesisi,
Çift flaş,
Yenilenebilir güç,
EES sayısal analizi

Öz: Nüfusun ve ekonomik ve sosyal yaşamın meteorik artışı nedeniyle enerjiye olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Ancak, fosil yakıtlar gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarıyla ilerlemek artık mümkün değildir. Fosil yakıtların tükenen özellikleri, temiz, sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklara olan talebin artmasına neden olmuştur. Bu şekilde, yeşil enerji kaynaklarının kullanımıyla, yalnızca daha da artan küresel enerji talebini karşılamak mümkün olmayacak, aynı zamanda küresel ısınma üzerinde de hafifletmeler elde edilebilecektir. Buna göre, çift flaşlı jeotermal enerji santralleri, günümüz enerji talebini karşılamak için alternatif bir yaklaşım olarak dikkate alınabilir. Jeotermal enerji santrallerinde, elektrik gücü sıcak suyun yüksek entalpi içeriğinden elde edilir. Bu tür santraller, dünyanın çeşitli yerlerinde bulunan rezervleri kullanarak çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlar. Bu çalışmada, Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılarak sayısal hesaplamalar yapılarak özel olarak 40 MW'lık çift flaşlı jeotermal enerji santrali tasarlanmıştır. Başlangıçta, jeotermal santralin tasarımı çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, verimlilik, güç hesaplamaları ve santral üzerinde detaylı analizler yapılmıştır. Sonunda, gerekli hesaplamalara bağlı olarak, 40 MW nominal güce sahip tasarlanan jeotermal santralin, 100.000 nüfusa sahip

Türkiye'nin orta büyüklükteki bir şehrinin yarısının elektrik ihtiyacını karşılayabileceği sonucuna varılmıştır.

*İlgili Yazar, email: erva.klkn@gmail.com

1. Introduction

Exploiting from the geothermal energy has significantly increased recently, as the general trend of power applications includes shifting from fossil fuel-powered energy generation methods to the renewable ones. This type of energy production can be defined as power obtained from the heat naturally found within the earth's crust. It is therefore captured for useful electric generation, as well as considered for space heating else in industrial steam. It is naturally available everywhere under the earth's surface, however, the highest temperatures, therefore the most preferred resources are found in the exact or close places to active volcanoes or close to volcanoes of geologically young types [1]. Geothermal energy is a clean and renewable power source since the heat coming from the inner parts of the earth is substantially unlimited. Besides, geothermal energy sources obtained from deep inside the crust are available at all hours of the day as well as at all days of the year [2].

On the other hand, unlike the geothermal energy, solar and wind energy sources, in the opposite, are depending on lots of different factors, which include power fluctuations in a daily or seasonal manner, and as well as the power generations from those technologies also depend on the variations of the weather situations. For these reasons, the electric energy obtained from geothermal facilities is more consistently reliable, as soon as the resource is found and prepared for power exploitation, the facility will continue to generate useful power for years. Double-flash geothermal power plants are superior to single-flash systems in terms of energy efficiency and sustainability and are particularly preferred in areas with medium- to high-temperature geothermal resources. However, due to their higher investment costs and more complex infrastructure, various analyses should be conducted. Kulasekara and Seynulabdeen (2019) stated in their study that geothermal energy is a renewable energy source that can be effectively used for electricity generation. They also compared geothermal power with other renewable sources such as solar and wind energy, noting disadvantages such as higher initial costs and geographical dependency [3]. Özer (2018) provided detailed information on the application areas of double-flash geothermal power plants. This study examined in detail how double-flash cycles are utilized for electricity generation, especially from high-temperature geothermal resources, as well as their other applications. It was noted that such plants are used to meet the energy needs of industrial zones with high energy demands or densely populated cities [4].

The influence of the geothermal energy on the environment is significantly small and that is controllable, therefore it is regarded as an environmentally friendly renewable power source. Air emissions from such facilities are negligibly small. Besides, emission from the greenhouse gases including nitrous oxide, hydrogen sulfide, sulfur dioxide, ammonia, methane, particulate matter, as well as carbon dioxide are pretty low. Those are especially so low when compared to the emissions obtained from the fossil fuels. However, some toxic chemical elements may be found inside the water or the condensed steam of the geothermal power plants, such as arsenic, mercury, lead, zinc, boron as well as Sulphur may be found in those waters. And, their toxicity effects generally depend on the concentration of those substances [5]. DiPippo (2012) provides comprehensive information on the design and environmental impacts of geothermal power plants. It includes detailed analyses, particularly regarding the potential of double-flash systems to reduce carbon emissions. The study highlights that geothermal power plants have significantly lower CO_2 emissions compared to fossil fuel-based plants [6]. Bosnjakovic et al. (2019) focus on the advantages and environmental impacts of double-flash systems, emphasizing that geothermal power plants contribute to combating climate change by reducing carbon dioxide emissions [7]. Fridleifsson et al. (2008) state that geothermal power plants have lower greenhouse gas emissions throughout their lifecycle compared to fossil fuel power plants. This indicates that geothermal energy can play a crucial role in addressing climate change [8]. On the other hand, most portion of such elements remain in the water solution which is reinjected back into the same reservoir of the rock. This hot rock mainly serves as the source of extracting hot water or steam.

Some main elements are included in a geothermal system, which could be given as the heat source, reservoir, and the fluid that is the carrier needed for heat transfer from underground to the ground level. A recharge area and an impermeable cap rock are also found together with those elements to obtain the seal of the aquifer. The simplified presentation of such systems is given in Figure 1.

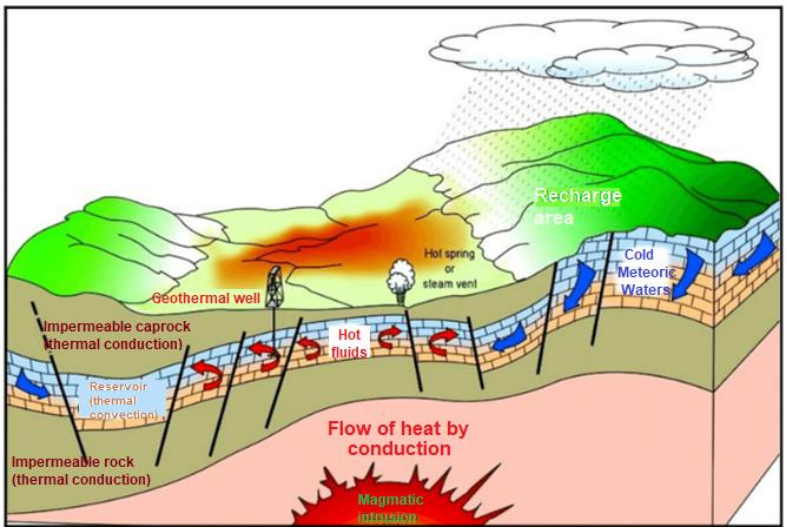


Figure 1. An ideal geothermal system

Fluid convection is the type of heat transfer mechanism responsible for conveying the heat between different locations in the geothermal systems. This heat transfer mechanism takes place due to the heating and consequent fluid thermal expansion in the gravity field. The heat that is provided at the circulation system base is the energy responsible for driving the system. As obeying the laws of physics, the fluid that is heated will have a lower density and it will rise, and will be replaced by the cold fluid having a high density, which comes from the system margins and will have the trend of sinking. Depending on the convection nature, temperatures in the upper system part have a tendency to increase, whereas, the temperatures in the lower system part tend to decrease [9].

The heated water by geothermal means is separated into hot water and steam in a surface vessel. This vessel is known to be the steam separator, whereas, the hot water is also referred to as the brine. Later, the produced steam is given to the steam turbine, and the turbine powers the generator. The low-energized fluid is then given back to the reservoir [10].

Especially, in higher-temperature geothermal locations, power facilities of the double-flash types can be operated with a high effectiveness and efficiency. Therefore, in the case of installing a double-flash system to a geothermal facility instead of installing a conventional geothermal system to the same facility, considering the same value of the temperature and the pressure, the double-flash type will generally produce a higher power output [11].

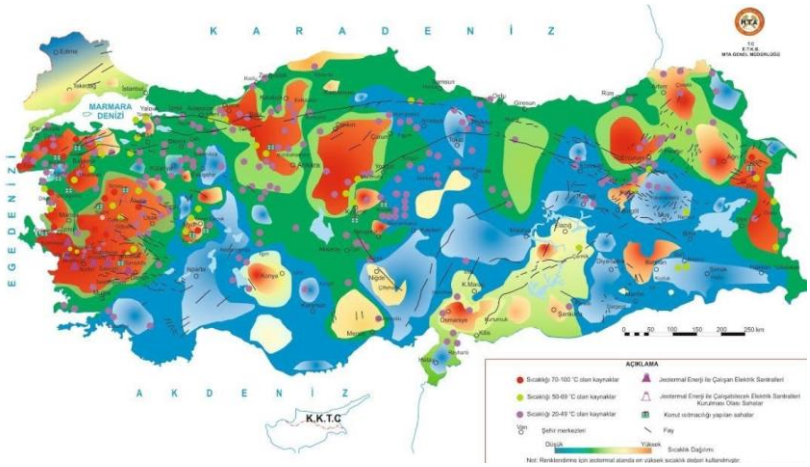


Figure 2. Map of Türkiye's Geothermal Resources and Applications [12]

In Figure 2, red regions represent high-temperature sources, while green and blue regions represent medium- and low-temperature sources, respectively. As shown on the map, Türkiye's known geothermal fields with high temperatures (average 70–100°C) and flow rates are located in the regions of Denizli (Pamukkale), Aydın (Germencik), and Manisa (Salihli). Türkiye's geothermal resources exhibit regional variations in terms of temperature and flow rates. While high-temperature sources are found in Western Anatolia, medium- and low-temperature sources are present in Central and Eastern Anatolia [13]. For example, a well drilled in 2016 in the Bozköy district of Niğde measured a bottom-hole temperature of 341°C at a depth of 3,845 meters [14]. Additionally, as of 2014, flash steam systems accounted for the majority of the world's installed geothermal power

generation capacity, with approximately 42% for single-flash systems and 19% for double-flash systems [15]. These data reveal that Türkiye has significant geothermal energy potential with notable regional differences.

Recent studies have been reviewed. Zağralıoğlu (2020) examined different power plant types used for electricity generation from geothermal resources and stated that double-flash systems can generate 10-15% more energy compared to single-flash systems using the same amount of steam [16]. Ates (2016) conducted a comparison of various geothermal power plant types, highlighting that double-flash systems produce more electricity by utilizing a two-stage separation system and turbines with dual inlet pressures [17]. Yılmaz (2019) performed a lifecycle cost analysis of a hydrogen production system integrated with a combined flash-binary geothermal power plant. The study evaluates the economic and environmental performance of geothermal power plants [18]. Akbay and Yılmaz (2021) conducted a thermodynamic performance analysis of a flash-binary geothermal power plant using different working fluids (n-butane, isobutane, and isopentane). The results showed that when using n-butane, the total power generation was 3,624 kW, with the highest energy efficiency calculated at 13.49% [19].

2. Materials and Methods

Double-flash geothermal power plants are a technology used to achieve higher efficiency from geothermal energy resources. One significant advantage of these plants is their ability to provide high energy efficiency. They offer the possibility of generating more energy from the same geothermal resource, enabling a more effective utilization of resources. However, challenges such as high installation costs and their applicability only in specific geological regions are notable. Therefore, these systems must be designed with all these issues in mind. Details regarding their design and analysis are provided in this section.

In a geothermal system, hot water is captured from an underground reservoir of water-dominated. By the utilization of the production wells that are either constructed artificially or found naturally, the fluid rises to the surface. However, a production valve can be utilized to form isolation of the system underground part from the surface part.

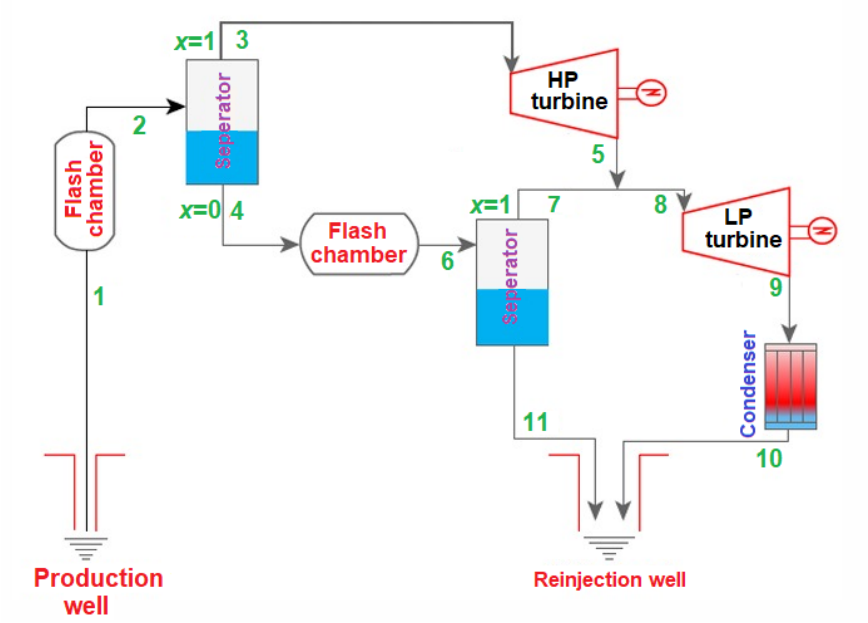


Figure 3. The double-flash type of geothermal power plant [20]

In the path from the production well towards the flash chamber, shown via 1, the hot water mixed with the high enthalpy steam that is captured from the geothermal reservoir is provided as a mixture to the flash chamber, before location 2. In this system referred as the double flash system, an initial separator is utilized to separate the high-pressure steam from the geothermal fluid. At location 2, the fluid is ready to be separated at the separator. The high-pressure steam at the exit of the separator having the quality value of 1 is now directed to the first turbine of high-pressure type. Namely, along with path 3, the steam of the high pressure is utilized for driving this first turbine, which is connected to the generator for output power generation. Due to the rotation of the turbine, the generator also rotates to produce useful power.

At the exit side of the separator having the quality value of 0, the geothermal fluid is found in the form of having high temperature, which is provided to the second separator, towards the path from 4 to 6. Here, separation of the

water from the steam is again performed to be fed to the second turbine, referred to as a low-pressure turbine. At location 5, namely, along with the exit of the first high-pressure turbine, the high-pressure steam that was used to drive the first turbine now has relatively lower energy, mixed with the steam coming along path 7, to be given to the second low-pressure turbine, at location 8. Accordingly, the steam at the exit of the first turbine and the steam coming from the second separator with the quality of 1, pass respectively towards the directions of 5 to 8 and 7 to 8, to produce power in the low-pressure turbine, in the path of 8 to 9. The mechanical power captured at the mechanical blades of the second turbine is converted to electrical energy at its generator, to produce additional electrical energy.

Along with the path from 9 to 10, the steam of low pressure obtained from the second turbine is condensed to liquid water with the utilization of the condenser. The liquid water that is obtained in the separator exit having the quality of 0 at the location of 11 is given to the reinjection well together with the liquid water at the exit side of the condenser at the location of 10. Namely, this geothermal water is not wasted but reinjected back into the reservoir. During the reinjection process in geothermal power plants, certain challenges may arise. The geothermal fluid extracted from underground can contain high concentrations of dissolved minerals and metals. These substances may require proper treatment before reinjection. Additionally, mineral precipitation can lead to blockages in reinjection wells, which can reduce system efficiency. During reinjection, microseisms may be triggered depending on local geological conditions. This could increase seismic activity and raise concerns among residents in the area, making it another drawback. In some cases, the reinjection process may release carbon dioxide, methane, or other gases from underground, potentially increasing environmental impact. As potential solutions, filtration and treatment systems can be used prior to reinjection. Furthermore, continuous monitoring can help detect potential anomalies. Another solution involves controlling the reinjection rate, which could mitigate potential seismic effects.

In a geothermal power plant of double-flash type, the saturated liquid geothermal water found with the temperature of 260°C and the mass flow rate of 200 kg/s is flashed in an isentropic manner in the flash chamber with the pressure ratio of 2. In the vapor-liquid separator, its steam is separated from the liquid water, and then the stream is used. The isentropic efficiency of the steam turbine is assumed to be 85% in the power conversion. The geothermal water that is discharged from the turbine is later condensed to be given to the reinjection well. Under these circumstances, a 40 MW rated power geothermal power plant was designed with the utilization of the EES program.

In the system design of the double-flash geothermal power plant, initially, a cumulative of 11 numbers is used to indicate different locations of the system components, demonstrated in Figure 3. The same codes have been also taken into consideration in the EES program, during the design of this double-flash geothermal power plant. The codes utilized in the EES are presented in the appendix.

In state 1, information on the fluid that is captured from the geothermal production well has been entered into the EES program. On the other hand, at state 2, the outlet side of the flash chamber is introduced, namely before entering the first separator, to obtain fluids of zero and unity qualities. At state 3, the coding has been performed for the part where the fluid is now at a state having a complete vapor, referred to as the unity quality. Therefore, this vapor leaving the separator is now ready to enter the high-pressure turbine at the inlet side. Besides, at state 4, the fluid separated to the zero quality at the separator exit again enters the flash chamber, and the necessary coding for this state is also given in the appendix part. As also revealed from the codes provided in the appendix, at the state of 3 with full steam of unity quality, the temperature value at this point is the same as the source temperature of state 2. On the other hand, at the state of 4 with full liquid water of zero quality, the pressure value at this point is the same as the source pressure of state 2.

The code for state 5 has been written with the assumption of 85% efficiency of the high-pressure turbine at the outlet side of this turbine. At state 6, there is the connection of the outlet of the flash chamber to the separator inlet, and the related codes of EES are provided. At state 7, which is the outlet side of the second separator, quality of the fluid is x=1 with full vapor. At the inlet side of the low-pressure turbine, the codes for state 8 give the relevant information. Furthermore, the inlet side on the condenser of the low-pressure turbine is demonstrated with the path of 9. Similarly, related coding on the EES program for this state of 9 is indicated in the appendix section. At the condenser outlet, the phase of the liquid water is obtained from the initial water vapor phase found at the condenser inlet, therefore the fluid becomes ready to be injected back into the reinjection well along this path of 10. Similarly, the phase of liquid water is acquired along with the path of 11, to be ready for injection to the reinjection well together with the liquid water coming along the path of 10.

In a double-flash geothermal power plant, x (quality) represents the mass fraction of the vapor phase. When the quality value is equal to the value of 0, the system is referred to be found completely in the liquid phase. In this

case, the generated power in the value of MW will be low, since there is no available steam for the power production. In this study, the quality value has been taken to be equal to the value of 0.

On the other hand, when the quality value has increased to the value of 0.1, the amount of the mass ratio regarding the vapor phase in the system will accordingly increase. This means more steam passes through the mechanical blades of the turbine, thus increasing the overall energy production. As a result, when the quality value increases, the power generation from the facility given in MW value also increases accordingly, and in this case, when the study is re-examined again, the power rating is found to correspond to 70 MW. This increase is occurring due to the higher energy-carrying capacity of the steam. Therefore, it is concluded that the higher the quality value of the steam is the higher the energy production will be.

3. Results and Discussions

The aim of the study includes the design of a 40 MW geothermal power plant in the form of double flash type, and accordingly, the required codes for each of the 11 states for this system shown in Figure 3, have been initially written. On the other hand, concerning the rated power assumption corresponding to 40 MW, the thermal efficiency (η_{th}) has been computed using the formula presented in Eq. (1):

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_9)}{\dot{m}_1 h_1 - (\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{10} h_{10})} \quad (1)$$

In Eq. (1), the designations $\dot{m}$, h, and η_{th} refer to the mass flow rate, enthalpy, and the thermal efficiency, respectively. In this regard, the thermal efficiency of the system is defined by the ratio of the difference of the enthalpies between states 3 and 9, which are respectively exit sides of the first separator and the exit side of the low-pressure turbine, that is multiplied by the mass flow rate of the vapor fluid with full unity, divided to the initial energy content of the water captured from the production well excluding the energy contents given to the sink without utilization at the locations 10 and 11, respectively standing for condenser exit and the exit of the second separator. In this respect, the thermal efficiency is computed as η_{th} =0.1499, which is approximately assumed to be 15%. This result accompanying the other outputs of the EES computation is exhibited in Figure 4. On the other hand, various thermodynamic parameters derived from the EES study have been indicated in Figure 5. These parameters are, respectively, *h*: Enthalpy, *hs*: Isentropic enthalpy, $\dot{m}$: Mass flow rate, *P*: Pressure, *s*: Entropy, *ss*: Isentropic Entropy, *T*: Temperature, *x*: Evaporation quality and it is used only in two-phase systems, expressing the vapor ratio. Here, the subscript of i stands for the instant state from 1 to 11. To support this result from the literature, Argün has concluded the cumulative thermodynamic efficiency of his studied geothermal power plant corresponded to the value of 12-13%; accordingly, that was demonstrated to be much lower than the result of the current study [21].

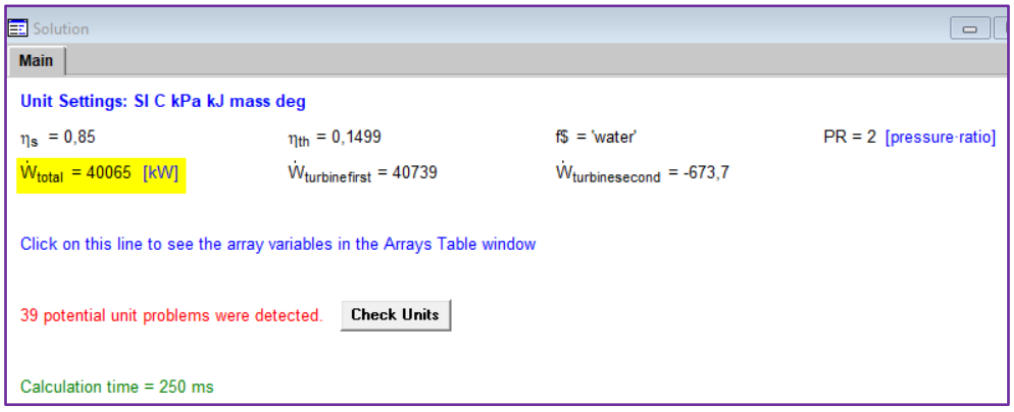


Figure 4. The analysis computation outcomes of the EES

Arrays Table

Main

Sort	h_i	hs_i	$\dot{m}_i$	P_i	s_i	ss_i	T_i	x_i
[1]	1135		200	4692	2,885		260	0
[2]	1135		200	2346	2,905		220,6	0,1016
[3]	2801		20,33	2346	6,28		220,6	1
[4]	946,3		179,7	2346	2,523		220,6	0
[5]	797,1	770,8	179,7	6	2,608	2,523	36,16	0,2673
[6]	946,3		179,7	1173	2,538		186,9	0,07668
[7]	2783		13,78	1173	6,53		186,9	1
[8]	2063	1936	13,78	3	6,957	6,53	24,08	0,803
[9]	2112	2121	13,78	5	4,885	6,957	32,87	0,8149
[10]	137,7		13,78	5	0,4762		32,87	0
[11]	793,8		165,9	1173	2,206		186,9	0

Figure 5. The analysis computation outcomes of the EES for the various parameters

Now, two turbines are available in the system that generate useful power and the power conversion on those turbines are indicated with the following relation of Eq. (2):

$$\dot{W}_{total} = \dot{m}_3\ (h_3 - h_5) + \dot{m}_8(h_8 - h_9) \tag{2}$$

Eq. (2) indicates the products of the rate of the mass flow of vapor entering both high-pressure and low-pressure turbines multiplied by the enthalpy dissipated from the high-energized vapor during the power conversion. The enthalpy dissipations responsible for power conversions that are multiplied by vapor flow rates for both turbines are then added with each other to give the total power generation, is exhibited in Eq. (2). In this context, the total power revealed with the thermodynamic unit of kW has been reported to correspond to 40,065 kW.

Along with the path from 1 to 2, at a mass flow rate of 200 kg/s at 260°C of geothermal water temperature, the isentropic flash has occurred in the flash chamber keeping the pressure ratio equal to 2. Then the flashed fluid found in the saturated state is further separated into vapor water and liquid water, where vapor water is used for power conversion. Later, the power is generated in the steam turbine at an isentropic efficiency of 85%. During the design of this geothermal power plant that has a power rating of 40 MW, the capacity factor for the assumed power plant was selected as 30%. The capacity factor refers to the actual amount of energy produced by a power plant over a specific period compared to the theoretical maximum energy it could generate. This factor typically depends on the quality of the resource used in geothermal plants, reservoir pressure, cycle technology (e.g., single flash, double flash, or binary cycle), and the plant's operating time. A 30% capacity factor is generally adopted for plants utilizing low-temperature resources or in cases where reservoir temperature and flow rate are inconsistent. The reason for this is that, although geothermal reservoirs are a sustainable energy source, they are limited by the renewal rate of the reservoir and the amount of geothermal fluid available. A 30% capacity factor is chosen as a precaution to ensure the long-term utilization of the reservoir. In short, a lower capacity factor is often preferred to minimize the risk of reservoir depletion and secure long-term energy production. This approach can be considered a strategy to extend the operational lifespan of the plant.

After completing the design stage of the power plant, the energy produced by this power plant in 1 year is calculated and presented in kWh. Similarly, the approximately 1-year energy need of a house is calculated and shown again in kWh. Ultimately, the total amount of houses that can be fed by the energy generated in this power plant is determined by dividing the annual energy generated from this power plant by the approximate energy need of a house. In the analysis, with the assumption of a city having a population of 100,000, where 4 people live in every house is assumed, will yield a total of 25,000 houses in total in this city. The computations demonstrated below will show that the power obtained from this power plant will meet the needs of 12,000 houses approximately. Consequently, it was determined that a designed 40kW power plant meets the electricity needs of half of a city with a population of 100,000. In an ordinary house, the following electrical appliances may be found, in which their amounts and rated powers and their daily power consumptions are exposed in Table 1.

Table 1. Electrical appliances used in an ordinary home

Appliance	Power (W)	Amount	Total power (W)	Hours/days use	Energy per day (Wh)
Television (1)	75	1	75	5	375
Refrigerator (2)	650	1	650	24	15,600
Dish washer (3)	870	1	870	0.67	582.9
Washing machine (4)	650	1	650	0.67	435.5
Furnace (5)	900	1	900	0.67	603
Toaster (6)	1,000	1	1,000	0.17	170
Vacuum cleaner (7)	600	1	600	0.33	198
Computer (8)	120	1	120	1	120
Modem (9)	10	1	10	24	240
Lamp (10)	30	10	300	5	1,500
Hair dryer (11)	2,100	1	2,100	0.02	42
Water heater (12)	7,000	1	7,000	0.5	3,500
Iron (13)	2,200	1	2,200	0.17	374

The approximate electricity consumption of an ordinary house is projected in Table 1. In this table, initially, the electrical devices in the house were identified, and then the number of each device in the house was projected and noted. Their rated power has been also plotted in this table, given in the thermodynamic unit of Watts. As demonstrated in this table, there are about 13 different types of electrical devices in total. Accordingly, they are numbered from 1 to 13. The total power for each appliance is determined again in Watts. Similarly, the number of hours that we benefit from those devices has been determined and shown in the same table. Finally, in the rightest column, the total energy dissipation in one day for each device given at a certain amount has been determined and revealed. The usage of devices numbered 1 and 2 are taken as 5 and 24 hours, respectively. Considering the device numbered with 3, i.e., referring to the dishwasher, if it is used for a total of 2 hours every three days, the daily usage of this device can be configured with the coefficient of 0.67. The same applies to devices 4 and 5. For device number 6, if it is used for a total of 1 hour every 6 days, the daily usage of this device can be configured as 0.17. For device number 7, if it is used for 1 hour every 3 days, the daily usage of the device is counted as 0.33 hours. Devices number 8, 9, and 10 have usage times of 1, 24, and 5 hours, respectively. For device number 11, if it is used for a total of 5 minutes in 3 days, approximately 0.02 hours per day is counted in the calculation. For device number 12, if it is used for a total of 1 hour in 2 days, it is taken as 0.5 hours in 1 day. Device number 13 is similar to device number 7. Necessary calculations are shown in Eq. (3)-(17):

$$75W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{5h}{24h} = \frac{375Wh}{day} \tag{3}$$

$$650W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{24h}{24h} = \frac{15{,}600Wh}{day} \tag{4}$$

$$870W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.67h}{24h} = \frac{582.9Wh}{day} \tag{5}$$

$$650W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.67h}{24h} = \frac{435.5Wh}{day} \tag{6}$$

$$900W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.67h}{24h} = \frac{603Wh}{day} \tag{7}$$

$$1{,}000W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.17h}{24h} = \frac{170Wh}{day} \tag{8}$$

$$600W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.33h}{24h} = \frac{198Wh}{day} \tag{9}$$

$$120W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{1h}{24h} = \frac{120Wh}{day} \tag{10}$$

$$10W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{24h}{24h} = \frac{240Wh}{day} \tag{11}$$

$$30W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{5h}{24h} = \frac{1{,}500Wh}{day} \tag{12}$$

$$2{,}100W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.02h}{24h} = \frac{42Wh}{day} \quad (13)$$

$$7{,}000W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.5h}{24h} = \frac{3500Wh}{day} \quad (14)$$

$$2{,}200W\ x\ \frac{24h}{1\ day} x \frac{0.17h}{24h} = \frac{374Wh}{day} \quad (15)$$

For all electrical appliances, the Wh/day data is collected, to find the cumulative, as provided in Eq. (16):

$$Total = \frac{23{,}740.4\ Wh}{day} \quad (16)$$

Finally, the unit of Watt-hour given in Eq. (16) has been converted to the unit of kilowatt-hour, as indicated in Eq. (17):

$$Total: 23{,}740.4\ \frac{Wh}{day} x \frac{1\ kWh}{1000\ Wh} \cong 24\ \frac{kWh}{day} \quad (17)$$

Therefore, the approximate daily energy consumption is calculated and exhibited as 24 kWh. Now, the annual energy consumption can be determined with Eq. (18):

$$Annual\ total = \frac{24\ kWh}{1\ day} x \frac{30\ day}{1\ month} x \frac{12\ month}{1\ year} = \frac{8{,}640\ kWh}{1\ year} \quad (18)$$

According to these derived data, the average energy consumption of an ordinary house annually can be found and demonstrated as 8,640 kWh, given in Eq. (18). As also indicated by [22], the annual electricity consumption of a house is reported to be around 5,000 kWh, in which the configured calculation in the current study is displayed to be compatible with this value [22].

In the case of integrating the 40 MW double flash type geothermal power plant to the city grid lines, the total annual energy generation of this power facility can be computed as provided in Eq. (19):

$$Annual\ generation = P_{rated} x capacity\ factor x total\ hours =$$

$$40MWx\ 0.30x \frac{8{,}760h}{1\ year} = \frac{105{,}120\ MWh}{1\ year} \quad (19)$$

The kWh equivalence of Eq. (19) is indicated in Eq. (20):

$$Annual\ generation = 105{,}120\ MWh\ x\ \frac{10^3\ kWh}{1MWh} = \frac{105{,}120{,}000\ kWh}{1\ year} \quad (20)$$

Eventually, the number of houses that will be fed by this annual power generation can be determined and exhibited with Eq. (21):

$$\frac{105{,}120{,}000\ kWh}{8{,}640\ kWh} = 12{,}166.67\ houses \quad (21)$$

At this moment, the total energy value of the power generation of the geothermal power facility that has been obtained in Eq. (20), corresponding to the value of 105,120,000 kWh has been divided to the power need of a single house that has been acquired in Eq. (18), that corresponds to the value of 8,640 kWh gives the value of 12,166.67 houses that has been indicated in Eq. (21). In scientific interpretation this stands for meeting the energy need of approximately 12,167 houses, that is to be obtained from geothermal power plant. In the case of integrating this conclusion to the needs of a city, and in the case of assuming the population of a city to correspond to 100,000, as well as in the case of assuming that 4 family people live in a house; in line with these data, it can be roughly assumed that there will be approximately 25,000 houses in a province with a population of 100,000. Ultimately, Eq. (22) can be computed as follows:

$$100{,}000\ person\ x \frac{1\ house}{4\ person} = 25{,}000\ houses \quad (22)$$

Since Eq. (21) shows the electricity that is produced from this designed power plant could be sufficient for approximately 12,167 houses; and due to Eq. (22), it is assumed that approximately 25,000 houses are found in a city; in this case, it may be concluded that the energy needs of approximately half of the houses in the city can be

met, by this geothermal power plant facility. In a similar approach, under the utilization of this 40 MW rated power plant geothermal facility, the energy requirements of half of a province with a population of 100,000 could be met using renewable power.

The outputs of the design trials obtained from the EES program have been presented in Figure 6. Accordingly, the power plant having the rated power of 40,000 kW at the pressure ratio of 2 was chosen. This situation is well shown in Figure 7, which exhibits the variation of the rated power in kW, depending on the pressure ratio, Pr of the dimensionless quantity.

Parametric Table

Table 1

1..10	1 PR [pressure-ratio]	2 $\dot{W}_{total}$ [kW]
Run 1	1	0,0000198
Run 2	1,5	24869
Run 3	2	40065
Run 4	2,5	50761
Run 5	3	58902
Run 6	3,5	65415
Run 7	4	70808
Run 8	4,5	75388
Run 9	5	79354
Run 10	5,5	82842

Figure 6. Total power versus pressure ratio during design trials

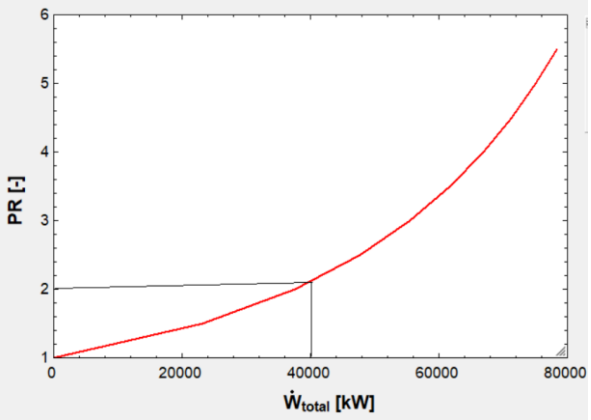


Figure 7. Total power functional variation against the pressure ratio

As depicted in Figures 6 and 7, the value of the pressure ratio is significantly important to obtain enhancements in both the system efficiency as well as the output energy. In this regard, the low-pressure ratio means the system is fairly inefficient. Namely, the pressure ratio value increase will provide more electricity production obtained from the geothermal power plant facility. In the analysis, the pressure ratio value was taken as 2. As can be seen, the total power value was found to be 40,065 kW, shown in Figure 6.

On the other hand, isentropic efficiency is a thermodynamic terminology often encountered in machines or thermodynamic systems, this is the case, especially in turbines. In geothermal power plants, the isentropic system of turbines and other energy conversion systems has a significant effect on the total system processes. In this frame, in the case of this value approaching 1, more system efficiency will be observed. Figure 8 shows the change in the total power due to the variation of isentropic efficiency. Besides, Figure 9 displays the functional relation of the total power in kW given to the thermal efficiency presented in percentage (%).

Parametric Table

Table 1 | Table 2

1..10	η_s	$\dot{W}_{total}$ [kW]
Run 1	0,2	38189
Run 2	0,2889	38443
Run 3	0,3778	38693
Run 4	0,4667	38939
Run 5	0,5556	39191
Run 6	0,6444	39449
Run 7	0,7333	39712
Run 8	0,8222	39980
Run 9	0,9111	40254
Run 10	1	40533

Figure 8. Total power versus the isentropic efficiency

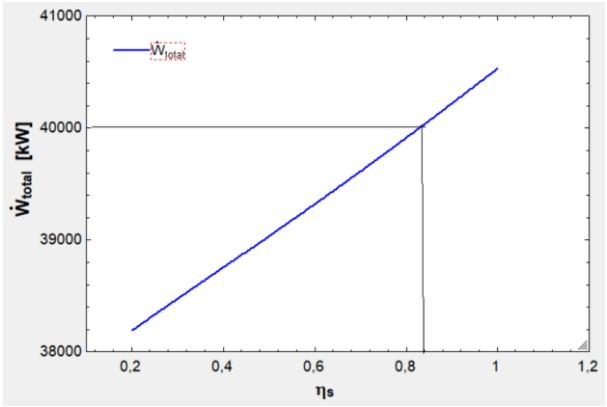


Figure 9. Total power functional variation against the thermal efficiency

In this study, the isentropic efficiency of the geothermal power plant was determined to correspond to 85%. As can be seen from the graph, as the efficiency increased, thus the value of the total power. In this respect, at the efficiency value of 85%, the cumulative power is reported and exposed to be 40,065 kW.

4. Conclusions

In the facilities of the geothermal power plants, the energy source is hot water, and considering the high enthalpy of this water, the thermal energy could be converted to useful electrical energy. To produce this useful energy, either the hot water is captured from naturally occurring wells or artificial wells are constructed to capture the hot water from them. These wells provide distribution of hot water and steam, sometimes only one of them, and sometimes a fluid that has the combination of both, at a certain value of thermal quality. In this analysis, a double-flash geothermal power plant was designed and examined. In this way, the hot water at a high pressure will evaporate at a low temperature. The resulting steam and the concentration of the steam that is increased at the separator will turn the mechanical blades of the geothermal turbine. Ultimately, the mechanical blade energy of the geothermal turbine will be transformed into useful electrical energy at the generator component of the turbine attached to the mechanical blades via the mechanical shaft. Cooling of the system will be performed using the cooling towers, however, the cooling towers are not considered in this analysis of the current study. Finally, electrical energy is transmitted to the regions through the electrical grid. Such power plants can meet the sustainable energy needs of a specific region or location for many years, with a high efficiency. Double-flash geothermal power plants have many advantages. For example, initially, their carbon emissions are significantly low, and in this way, the damage to the environment is minimized during the utilization of such systems. Besides, energy security is increased with those systems, because local resources of the country are used and the country's dependence on fossil fuels is reduced. Finally, it provides sustainable energy production, which offers economic and environmental benefits in the long term.

In the current study, a geothermal power plant designed in a double-flash type has been examined. The efficiency of the power plant, operating pressure, its rated power, annual output power generation, and the ability of the facility to feed the total number of houses are discussed. The EES program was used in numerical calculations to

select this double-flash geothermal power plant having the capacity of 40 MW, and the other necessary thermodynamic parameters have been computed. As a result of the computations, it has been concluded that this power plant can produce significant amounts of electricity by operating at high efficiency. The computations were grounded depending on the projections of the annual electricity consumption of an ordinary house. Accordingly, it was demonstrated that the designed geothermal power plant can meet approximately half of the electricity needs of a city, whose population is selected to be 100,000. This study showed the effectiveness and the reliability of the geothermal energy source, by an applied study approach.

On the other hand, confidence in this technology will increase depending on the fact that a power plant having 40 MW power capacity meets the electricity needs of the half of the cited population. Besides, such a facility will contribute to local economic development, as well as during the installation and operation of the power plant, it will create employment and ultimately, as soon as the power plant operates, energy costs will decline. Furthermore, those types of power plants will contribute to diversifying the energy supply, and fossil fuel utilizations will be reduced. Therefore, it will play a significant role in fighting against climate change.

A 40 MW capacity double flash geothermal power plant can be proposed with this current study as a solution to the energy demand of medium-sized cities. Geothermal power plants have an important place among sustainable energy and meeting half the electricity requirements of a city with 100,000 population reveals how effective such power plants are. Environmental sustainability and economic advantages will pave the way for double-flash geothermal power plants to be used more widely in the future. This is a promising development in terms of increasing the integration of renewable energy sources and reducing the use of fossil fuels. Geothermal energy will continue to play a vital role in a sustainable future. With the encouragement and integration of such geothermal projects, cities can build a more sustainable and resilient future.

The results not only highlight the environmental sustainability of geothermal power plants, which provide high efficiency in energy production, but also reveal their contributions to local economies. Detailed analyses demonstrate the feasibility of this technology. Such power plants can play a critical role in reducing carbon emissions. Particularly in rural or medium-sized cities, promoting the use of these energy facilities can lower energy costs while strengthening regional energy independence. For future studies, energy generated from geothermal systems can be utilized not only for electricity production but also for secondary energy applications such as district heating or greenhouse operations. The economic and environmental impacts of such applications could be analyzed. Another example of future work could include designing power plants tailored to geothermal resources in different regions of Türkiye. These suggestions could enhance the scientific value of the study while paving the way for more comprehensive applications that would resonate widely in the energy sector and academia.

References

[1] Dickson, M. H., Fanelli, M. 1990. Geothermal Energy: Utilization and Technology. 1st, UNESCO, 2003, Paris, 224s.

[2] National Geographic, ENCYCLOPEDIC Entry, Geothermal Energy. https://education.nationalgeographic.org/resource/geothermal-energy/ (Date Accessed: 18.03.2024).

[3] Kulasekara, H., Seynulabdeen, V. 2019. A Review of Geothermal Energy for Future Power Generation. 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE).

[4] Özer, Ö. 2018. Jeotermal Elektrik Santrallerinde Optimum Performans ve Verim İçin Sistem Tasarımı ve İşletme Şartlarının İncelenmesi. Pamukkale University, Institution Of Sciences, Department Of Mechanical Engineering, Master's Thesis, Denizli.

[5] Kristmannsdóttir, H., & Ármannsson, H. (2003). Environmental impact of geothermal energy utilization. Geothermics, 32(4–6), 451–461.

[6] DiPippo, R. 2012. Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

[7] Bošnjaković, M., Stojkov, M., & Jurjević, M. 2019. Environmental impact of geothermal power plants. Tehnički, 26(5), 1515–1522.

[8] Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J., Ragnarsson, Á., & Rybach, L. 2008. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In O. Hohmeyer & T. Trittin (Eds.), IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources: Proceedings. Intergovernmental Panel on Climate Change. 59-80.

[9] Bilal, O. Y., 2024. Analysis of Geothermal Circuit of Balçova-Narlidere Geothermal District Heating System. Master of Science in Energy Engineering Program, Sciences of İzmir Institute of Technology, Master's Thesis, Izmir.

[10] Dinçer, İ., Ezzat, M. F., 2018. Renewable Energy Production. Comprehensive Energy Systems, (3), 126-207.

[11] DiPippo R. 2016. Double- and Triple-Flash Steam Power Plants", Geothermal Power Plants. 143-168.

[12] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.). Jeotermal - Kaynaklar - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal (Date Accessed: 12.01.2025).

[13] Etemoğlu, A. B., İşman, M. K., & Can, M. 2006. Bursa ve çevresinde jeotermal enerjinin kullanılabilirliğinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 11(1), 55–66.

[14] Şener, M. F., Uzelli, T., Akkuş, İ., Mertoğlu, O., & Baba, A. 2023. Türkiye jeotermal enerjisinin potansiyeli, kullanımı ve gelişimi. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 171, 69–90.

[15] Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. 2016. Geothermics, 60:31–43.

[16] Zağralıoğlu, T., Coşkun, O. 2020. The use of geothermal energy in electricity production. Marmara University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering.

[17] Kıvanç, A. H., & Serpen, U. 2011. Jeotermal santrallerin karşılaştırılması. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Teskon+Sodex Fuarı, 111-128.

[18] Yilmaz, C. 2020. Life cycle cost analysis of combined flash binary geothermal plant and integrated hydrogen generation system. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(1), 1-16.

[19] Akbay, O., Yılmaz, F. (2021). Flaş İkili Jeotermal Güç Üretim Santralinin Termodinamik Analizi ve Performans Karşılaştırması. El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 8(1), 445-461.

[20] Dincer, I., & Ozcan, H. (2018). 1.17 Geothermal Energy. Comprehensive Energy Systems, 702–732.

[21] Argün, M., 2009. Jeotermal Enerji Santralleri ve Ulusal Elektrik Dağıtım Sistemine Bağlantısı. 26-27.

[22] SB Solar Official Website. https://sbsolar.com.tr/turkiyede-ortalama-bir-evin-aylik-yillik-elektrik-ihtiyaci-ne-kadardir#:~:text=T%C3%BCrkiye'de%20evlerin%20ortalama%20y%C4%B1ll%C4%B1k,SB%20Solar%20Uzman%20Ekibine%20dan%C4%B1%C5%9Fabilirsiniz. (Date Accessed: 03.04.2024).

Appendices

```
PR=2

// state 1

T[1]=260
x[1]=0
m_dot[1]=200
f$='water'
P[1]=pressure(f$;T=T[1]; x=x[1])
h[1]=enthalpy(f$;T=T[1]; x=x[1])
s[1]=entropy(f$;T=T[1]; x=x[1])

// state 2 - flash chamber outlet

h[2]=h[1]
P[2]=P[1]/PR
m_dot[2]=m_dot[1]
s[2]=entropy(f$;P=P[2]; h=h[2])
T[2]=temperature(f$;P=P[2]; h=h[2])
x[2]=quality(f$;P=P[2]; h=h[2])

// State 3 - turbine inlet

T[3]=T[2]
x[3]=1
s[3]=entropy(f$;T=T[3]; x=x[3])
h[3]=enthalpy(f$;T=T[3]; x=x[3])
P[3]=pressure(f$;T=T[3]; x=x[3])
m_dot[3]=m_dot[2]*x[2]


// State 4 - again flash chamber inlet

P[4]=P[2]
x[4]=0
s[4]=entropy(f$;P=P[4]; x=x[4])
h[4]=enthalpy(f$;P=P[4]; x=x[4])
T[4]=temperature(f$;P=P[4]; x=x[4])
m_dot[4]=m_dot[2]*(1-x[2])

// State 5 - HP turbine outlet

eta_s=0,85
P[5]=6
ss[5]=s[4]
hs[5]=enthalpy(f$;P=P[5];s=ss[5])
eta_s=(h[4]-h[5])/(h[4]-hs[5])
s[5]=entropy(f$;P=P[5];h=h[5])
T[5]=temperature(f$;P=P[5];h=h[5])
m_dot[5]=m_dot[4]
x[5]=quality(f$;P=P[5];h=h[5])

// State 6 - flash chamber outlet and seperator inlet

h[6]=h[4]
P[6]=P[4]/PR
m_dot[6]=m_dot[4]
s[6]=entropy(f$;P=P[6]; h=h[6])
T[6]=temperature(f$;P=P[6]; h=h[6])
```

```
x[6]=quality(f$;P=P[6]; h=h[6])

// State 7 - Seperator outlet

T[7]=T[6]
x[7]=1
s[7]=entropy(f$;T=T[7]; x=x[7])
h[7]=enthalpy(f$;T=T[7]; x=x[7])
P[7]=pressure(f$;T=T[7]; x=x[7])
m_dot[7]=m_dot[6]*x[6]

// State 8 - LP turbine

P[8]=3
ss[8]=s[7]
hs[8]=enthalpy(f$;P=P[8];s=ss[8])
eta_s=(h[7]-h[8])/(h[7]-hs[8])
s[8]=entropy(f$;P=P[8];h=h[8])
T[8]=temperature(f$;P=P[8];h=h[8])
m_dot[8]=m_dot[7]
x[8]=quality(f$;P=P[8];h=h[8])

// State 9 - LP turbine outlet

P[9]=5
ss[9]=s[8]
hs[9]=enthalpy(f$;P=P[9];s=ss[9])
eta_s=(h[8]-h[9])/(h[8]-hs[9])
s[9]=entropy(f$;P=P[4];h=h[9])
T[9]=temperature(f$;P=P[9];h=h[9])
m_dot[9]=m_dot[8]
x[9]=quality(f$;P=P[9];h=h[9])

// State 10 - condenser outlet

P[10]=P[9]
x[10]=0
s[10]=entropy(f$;P=P[10]; x=x[10])
h[10]=enthalpy(f$;P=P[10]; x=x[10])
T[10]=temperature(f$;P=P[10]; x=x[10])
m_dot[10]=m_dot[9]

// State 11 - seperator outlet

P[11]=P[6]
x[11]=0
s[11]=entropy(f$;P=P[11]; x=x[11])
h[11]=enthalpy(f$;P=P[11]; x=x[11])
T[11]=temperature(f$;P=P[11]; x=x[11])
m_dot[11]=m_dot[6]*(1-x[6])

eta_th=(m_dot[3]*(h[3]-h[9]))/(m_dot[1]*h[1]-(m_dot[11]*h[11]+m_dot[10]*h[10]))

W_dot_turbinefirst=m_dot[3]*(h[3]-h[5])
W_dot_turbinesecond=m_dot[8]*(h[8]-h[9])
W_dot_total=(m_dot[3]*(h[3]-h[5]))+(m_dot[8]*(h[8]-h[9]))
```

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Aljinat/Sumak Mikroboncuklarından Metformin Salımı

Asiye Nur Çetinkaya[1*], Demet Baybaş[2]

*[1] Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Biyokimya, SİVAS
[2] Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Biyokimya, SİVAS

(Alınış / Received: 30.10.2024, Kabul / Accepted: 19.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Aljinat,
İlaç salım,
Metformin,
PEG,
PVA,
Sumak,

Öz: Çalışmanın amacı; yüksek mol kütleli bir polisakkarit olan Aljinatın (A), fitoterapide de kullanılan sumak (S) baharatı ile ikili (AS) kompozit mikroboncuklarının sentezlenmesi ve antidiyabetik bir ilaç olan metformin (MET)'in salımında kullanılmasıdır. MET tutunma ve salım verimi iki parametre değişimi ile araştırılmıştır.

Birinci parametre, iyonotropik jelasyon yöntemiyle AS mikroboncukların hazırlanmasında genellikle kullanılan çapraz bağlayıcı rolündeki Ca^{2+} yanı sıra Cu^{2+} ve Ni^{2+} iyonlarının da kullanılmasıdır. Bu kapsamda, MET yüklü mikroboncuklar (AS-M) iki yöntem ile hazırlanmıştır. Birincide seçili çapraz bağlayıcı metal iyonları ile AS jel oluşum ortamına MET katılmış, ikincide ise MET'siz oluşturulmuş AS üzerine farklı MET derişim içerikli çözeltilerden MET yüklemesi yapılmıştır.

İkinci değişken, mikroboncukların yapısının güçlendirilmesi amacıyla, AS kompozit yapısına ilaç salımında yaygın olarak kullanılan iki polimerin (Poli(etilen glikol; PEG) ve Poli(vinil alkol); PVA) katılmasıdır. Polimerlerin ortama katılmasında iki farklı yöntem izlenmiştir. Birinci yöntemde AS ve AS-M boncuklar PEG ve PVA ortamına karıştırılarak kaplanmıştır (AS-PEG*, AS-PVA*). İkinci yöntemde ise, jel ortamına polimerler katılarak boncuklar oluşturulmuştur (AS-PEG ve AS-PVA). Mikroboncukların karakterizasyonu FTIR ve SEM analizleri ile yapılmıştır.

Sonraki aşama olan salım çalışmalarında boncukların HCl içerikli mide (pH=1.2) ve fosfat tampon içerikli (pH=7.4) bağırsak pH koşullarında bıraktıkları ilaç miktarları belirlenmiştir. Salım sonuçları %Toplam salım-zaman grafikleri ile sunulmuştur.

Metformin Release from Alginate/Sumac Microbeads

Keywords

Alginate,
Drug delivery,
Metformin,
PEG,
PVA,
Sumac,

Abstract: The aim of this study is to synthesize binary composite microbeads (AS) of a high molecular weight polysaccharide alginate (A) with sumac (S), a spice also used in phytotherapy, and to use them for the release of an antidiabetic drug metformin (MET). The retention and release efficiency of MET were investigated by its dependence on two parameters.

The first parameter is the use of Cu^{2+} and Ni^{2+} ions acting as the cross-linkers besides Ca^{2+} which is generally used in the preparation of AS microbeads by the ionotropic gelation method. In this context, MET loaded microbeads (AS-M) were prepared by two methods. In the first, MET was contained in the AS gelation medium containing the selected cross-linker metal ions, whereas MET was loaded to AS as prepared in the absence MET from MET solutions containing different MET concentrations in the second.

The second parameter is the inclusion of two polymers (Poly(ethylene glycol); PEG) and Poly(vinyl alcohol); PVA) commonly used in drug release studies to strengthen the structure of AS composite. Two different methods were employed in the addition of the polymers. In the first, AS and AS-M microbeads were plated with the polymers by addition of the microbeads in to the polymerization medium (AS-PEG*,

AS-PVA*) whereas the polymerizations were formed by addition of the polymer reagents to the gelation medium of AS (AS-PEG, AS-PVA). The formation of microbeads was characterized by means of FT-IR and SEM analysis.
In next stage of the drug release studies, the released amounts from the MET loaded microbeads at the pH conditions of HCl representing stomach and of phosphate buffer contained representing were determined. The results were submitted by 'Total release %-Time' depictions.

---

*İlgili Yazar, email: asynctnky9@gmail.com

1. Giriş

Tüm ilaç salım yöntemleri arasında en yaygın olan oral uygulamadır. Oral uygulama olarak bilinen yöntemin dezavantajlarından birisi ilacın midede bozulmaya uğramasıdır. Yeni ilaç dağıtım sisteminin (DDS) başlıca amacı ilacı daha az miktarda içerip, yan etkilerini azaltarak ilacın etkinliğini arttırmaktır [1]. Kontrollü ilaç salım uygulamalarındaki temel neden ilacın vücut içerisindeki yayılımını, hedefini, zamanlamasını ya da dozunu kontrol altına almaktır. İlaçların vücuttaki etkilerinin miktar aralığı değişmektedir. Bu yüzden de etkili miktardan az veya fazla kullanımı ilacın yan etkilerine sebep olabilir. Bu nedenle, klasik yaklaşımın aksine kontrollü ilaç salımı yardımıyla vücuttaki ilaç miktarı etkin ve hassas bir şekilde tutularak tedavi olasılığı arttırılır. Böylece zamanda ilaç tasarrufu da sağlanabilmektedir [2]. Bu araştırmada salım araştırması yapılan metformin ilacı ve bunun tutturulduğu taşıyıcı kompozit boncukların sentezinde kullanılan bileşenler ile ilgili öz bilgi aşağıda sunulmuştur.

Metformin etken maddesi, *Galega Officinalis* (aka keçisedefi, İspanyol korunga ve profesör otu) olarak bilinen bitkiden üretilmiştir. "Metformin; beyaz renkli, kokusu olmayan, kristal yapıda, toz şeklinde bir ilaçtır". Suda çok iyi çözünürken; aseton, eter, kloroformda çözünmez. Metformin hidroklorür $C_4H_{11}N_4$.HCl kapalı formülüne sahip, kimyasal isimleri; N,N-dimetilimidodikarbonimidik diamid hidroklorür, imidodikarbonimidik diamid, N,N-dimetil-monohidroklorür, N,N-dimetilbiguanid hidroklorür olan, tip 2 diyabet hastalarında kullanılan anti-hiperglisemik bir ilaçtır [3]. Tip 2 diyabet hastaları metabolik sendrom ve bozulmuş lipit metabolizmasına sebep olan obezite ve insülin direncine sahiptir. Oral anti-diyabetik bir ilaç olan metformin, tip 2 diyabet hastalarının % 60'ı tarafından kullanılmaktadır. 2010 yılından itibaren Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Model Esansiyel İlaç Listesindeki iki oral anti-diyabetik ilaçtan birisi olarak yer almaktadır [3,4]. Diğer diyabet ilaçları ile kıyaslandığında ise, insülin salgısını arttırmaz ve kandaki glikoz derişiminin normal düzeylerin altına düşmesine neden olmaz. Başka bir ifadeyle, periferik dokularda insülinin aktivitesini reseptör sonrası düzeyde arttırır. Anaerobik glikolizi hızlandırarak, glikoz kullanımını arttırır ve laktik asit oluşumunun hızlanmasını sağlar [3]. Metforminin ayrıca, anti-enflamatuar yolla nöroprotektif ve anti-oksidan etkileri vardır. Geçmişte Ortaçağ Avrupa'sında geleneksel bir ilaç olarak yaygın halde kullanılmaya başlanmıştır. 1949'da Filipinler'de Eusebio Garcia tarafından yapılan anti-malaryal aktivite testleri, metformin hidroklorürün anti-influenza olarak kullanılmasına sebep olmuş ve influenza hastalarında kan şekerini düşürmeye daha yatkın olduğu tespit edilmiştir [5,6].

Aljinat kahverengi deniz yosunlarından (*Phaeophycea*, *Laminaria hyperborea, Laminaria japonica)*, bakterilerden ve alglerden elde edilen, mukoadhezif, biyoyumlu, biyobozunmaya uğrayan, immünojenik olmayan, suda çözünebilen, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen önemli bir polisakkarittir. 1,4-glikozidik bağlarla bağlanmış α-L-guluronik asit (G) ve β-D-mannuronik asit (M) kalıntılarından oluşur. İlaç dağıtım sistemlerini oluşturmak için kullanılan malzemelerden biridir. Toksik olmayan, biyobozunur, düşük maliyetli, biyouyumlu, kolay bir şekilde bulunabilen ve nanotaşıyıcı olarak avantaja sahip olan önemli bir maddedir [7]. Aljinatın bahsedilen avantajları sayesinde pek çok kullanım alanı vardır. Örnekleri ise şu şekildedir; kimyasal değişimleri kolaylaştırmaları, düşük maliyetli olmaları nedenleriyle ilaç dağıtım sistemlerinde önemli role sahiptir. Tekstil sanayide kumaş boyamada, boyaların kıvamını arttırıp ve koyulaşmasını sağlar. Koruyucu madde, kıvam arttırıcı, köpük oluşturucu, jelleştirici ve kolloidal stabilizatör, çeşitli protein hücre dağılımı ve/veya tutulması özellikleriyle gıda endüstrisinde kullanılır.
Tuz ve şelatlayıcı ajanlara karşı yüksek toleransı nedeniyle biyomedikal endüstrisinde ve ağız-diş sağlığı, açık yaraların tedavisinde medikal alanda kullanımı söz konusudur [7-9]. Aljinat (aljinik asidin sodyum tuzu) oluşturduğu jelin karakteristik niteliği bakımından kullanılan maddeye göre değişiklik gösterebilir ve molekül yapısı yosunun yetiştiği alanın coğrafiği özelliklerine bağlı olarak değişir ve farklı türde aljinat elde edilmesini sağlar. Aljinatın bazı önemli özellikleri; yapıda bulunan karboksil gruplarıyla çok değerlikli katyonlarla tepkime verip, jel oluşturma kapasitesidir. Metal katyonların aljinatla jel oluşturma sıralaması Pb > Cu > Cd > Ba > Ca > Ni, Zn şeklindedir. Aljinatın jel oluşum aşamasında; pH etkisi, sıcaklık etkisi ve film oluşturma gibi özelliklerinden bahsedilir [8].

Sumak *Rhus coriaria L.* olarak bilinen meyvenin kabaca öğütülmesiyle elde edilir. Türkiye'de yetişen ve tek türü olan bu bitki Akdeniz, Ege, Güneydoğu Anadolu gibi bölgelerde, Dünya genelinde ise çoğunlukla Afrika, Kuzey Amerika ve Güneydoğu Asya'nın tropikal ve ılıman bölgelerinde yetişmektedir. Sumak bitkisi içerdiği fenolik bileşiklerden gallik asit ve türevlerinden dolayı zengin antioksidan kaynağıdır. Meyvelerinin yağ ve yağ asitlerini barındırması, onu oksidatif bozulmalara karşı dayanıklı ve çok uzun süre saklanabilir duruma getirmektedir. Sumak bitkisinin meyvelerinde, ortalama % 4.3 tanen ile uçucu yağ, sitrik, malik ve tartarik asit bulunmaktadır [10]. Geçmişten bugüne bitkinin yaprak ve meyveleri içerdiği önemli bileşenlerden kaynaklı ilaç ham maddesi olarak, bitkisel tedavide kullanılmıştır. Ağızdaki yaraların iyileşmesinde, göz hastalıklarında, el ve ayak çatlaklarında tedavi için önerilmiştir. Ayrıca bitkinin yaprakları, sapı ve kabukları fazla miktarda tanen içerdiğinden dolayı diş çürüğü ve plağın bakteri sebebi olan *Streptococcus mutans'ı* baskılayıp diş hekimliğinde diş telindeki diğer bakterilerin de engellenmesine olanak sağlamıştır [10]. Baharat olarak tüketiminin yanında, boyacılıkta, mürekkep yapımında, deri işleme teknolojisinde, kozmetik ve veterinerlikte kullanımı da ekonomik yönden fayda sağlamaktadır [11]. Gıda endüstrisinde kullanılabilecek ve sentetik bileşiklerin yerini alacak antioksidan değerinin yüksek olması da bu bitkinin önemini arttırmaktadır. Sumak meyvelerinin yağ ve yağ asitleri açısından zengin olması gıdalarda kullanımında değerli bir kaynak olduğunun göstergesidir [12]. Özellikle son zamanlarda yaygın olan şeker hastalığının tedavi edilmesine katkı sağlamıştır. Sumak bitkisinin sağlık alanında; şeker hastalıkları, hipertansiyon, karaciğer ve cilt hastalıklarında tedavi amaçlı kullanımı söz konusudur. Sumağın mutajenik olmayan anti-septik, anti-oksidan, hipoürisemik, hipoglisemik, oksidatif stresi önleme gibi ön plana çıkan özellikleri bulunmaktadır ve bu etkileriyle geleneksel kullanımları desteklenmektedir. Örneğin; Doğan ve Çeliğin çalışmasında, *R.coriaria* meyvesinden elde edilen liyofilize hidrofilik ekstraktın (RC) toksik etkisi olmadan streptozotosin (STZ) diyabetiklerde *in vivo* iyileştirici ve anti-diyabetik özelliklerini göstermiştir. RC ekstraktının serum enzimleri, böbrek fonksiyon belirteçleri α-glukozidaz ve lipid peroksidasyon seviyeleri üzerindeki etkiyi azaltarak anti-diyabetik aktivitelere ve sıçanlarda anti-oksidatif bir role sahip olabileceği vurgulanmıştır. Bitkisel ilaçlar arasında bulunan sumak (*Rhus coriaria L.*) tip II diyabet tedavisinde kullanılır [13]. Bir başka çalışmada ise; Mirhadi ve arkadaşları sumak meyvesini sıçanlara ağızdan vererek serumdaki kan şekeri seviyelerinde artış sağladığını kanıtlamışlardır ve bu sonuçlara göre kan şekerini düşürebileceğini bu sayede diyabetik hastalarda göz önünde bulunması gerektiğini vurgulamışlardır [14]. Tüm bu önemli özellikleri nedeniyle, çalışmada destek katkı malzemesi olarak sumak bitkisi seçilmiştir.

Polimerler, günümüzde ilaç endüstrisinde ve ilaç taşıma sistemlerinde sıklıkla kullanılan malzemelerdir. İlaç taşıma sistemlerinde kullanılan polimerlerin, bazı yapısal üstün özelliklere sahip olması gerekir. Bu özelliklerden en önemlileri, kullanılacak olan polimer çeşitlerinin, biyouyumlu ve biyobozunur olmasıdır. İkincil olarak ise, ilaç kapsül maddelerinin parçacık boyutlarının kontrol edilebilir ve aynı zamanda yoğunluklarının ayarlanabilir olmasıdır. Bu durum, vücutta her doku ve organ için istenen özelliklere göre değişiklik göstermelerini sağlar. Bu özellikleri barındıran polimerlerden ikisi; polietilen glikol (PEG) ve poli(vinil alkol) (PVA)'dır [15].

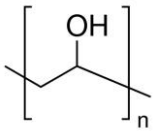
Mol kütlesi 500-20000 g mol^{-1} arasında olan PEG, etilen oksit monomerlerinden oluşan polieter sınıfında yer alan, antijenik ve toksik olmayan, suda ve birçok çözücüde çözünebilen bir polimerdir. Polietilen glikollerin şekilleri, beyaz sıvıdan mumsu katıya kadar değişebilmektedir. "PEGilasyon" terimi, protein, peptid gibi moleküllerin bir ya da daha fazla PEG zincirinin bağlanmasıyla modifikasyona uğratılmaları olarak tanımlanır. PEG, Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi'nden onay almış, aynı zamanda da ilacı taşıyıp bıraktıktan sonra basit şekilde vücutta absorbe edilebilmeleri ve böylece vücuttan hızlı bir şekilde atılabilmelerinden dolayı ilaç endüstrisinde tercih edilen ilk polimer olmuştur [16]. PEG'in zayıf hidrojen bağlarına sahip aktif bileşenler ile kolay bir şekilde etkileşime girebilmesi diğer polimerlere göre avantajını göstermiştir. [17]. Ayrıca PEG'in organik çözücülerde çözünürlüğünün yüksek olması katı dispersiyonların hazırlanmasında kolaylık sağlar. Rumondor ve Taylor'un yaptıkları bir çalışmada ise su tutma yeteneğinin ilaç stabilitesini etkileyen önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir. Nemin kompozit tarafından tutulması, polimerik yapı içerisinde faz ayrımlarının oluşmasına ve böylece ilaç etken maddesinin hava ve su ile temas ederek işlevsiz hale gelip ilaçtan erken salınmasına yol açmıştır [15, 18]. Bunların yanı sıra modifikasyon amaçlı kullanılan PEG ve türevleri bağlayıcı, çözücü ve vezikül olarak gıda, kağıt,kozmetik, lastik, tekstil, ziraat ve petrol gibi birçok endüstri alanında kullanılabilmektedir [16]. Şekil 1.'de polietilen glikol'ün kimyasal yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Polietilen glikol yapısı (PEG) [19]

Poli(vinil alkol), poli(vinil) asetatın hidrolizlenmesiyle elde edilen, suda çözünebilen, kokusuz ve toksik olmayan, biyobozunur, biyouyumlu sentetik bir polimerdir. Ayrıca bünyesinde bulundurduğu hidroksil gruplarından dolayı pek çok kimyasal çapraz bağlayıcılar ile çapraz bağlanmakta ve bunun sonucunda kullanım alanları yaygınlaşmaktadır (Şekil 2). Yüksek su içeriği ve şişme kapasitesinin kontrol edilebilmesi, yüksek termal dayanımları, insan vücudunda biyouyumlu ve zehir etkisi yaratmamaları nedeniyle farmosötik uygulamalarda

önem kazanmıştır. Bunların yanı sıra kağıt kaplamada, suda çözünebilen esnek ambalaj filmlerinde ve biyomedikal cihazlarda kullanılmaktadır [20]. Oral filmler esnek yapıda ve hızlı çözünen ilaç şekilleridir ve PVA'da oral filmlerde plastikleştirici olarak görev alır [21]. Son zamanlarda kıkırdak doku mühendisliğinde hücrelerin yer aldığı üç boyutlu iskeleti yapmak için PVA üzerinde durulmuştur. Ortopedik cerrahide tespit ve dikiş materyallerinde yaygın olarak kullanılmıştır [2].



Şekil 2. Polivinil alkol (PVA) yapısı [19]

Aljinat içerikli taşıyıcılarla Metformin salımı ile ilgili literatür çalışmaları mevcuttur. Örneğin; Sodyum aljinat-fesleğen tohumu müsilajlı boncuklardan metformin salımı yapılan bir çalışmada; pH 1.2 ve pH 7.4' te salım gerçekleştirilmiş ve en düşük salımın asidik ortamda olduğu bulunmuştur [1]. Kumar ve arkadaşlarının çalışmalarında gastrointestinal emilimi ve bağırsak geçirgenliğini aynı anda kolaylaştırmak için metformin emülsiyon çapraz bağlama teknolojisi ile hazırlanan aljinat nanokapsüllere yüklenmiştir. Metformin yüklü nanopartiküller (MLAN'lar) *in vivo* hayvan çalışmalarında kullanılmış ve kapsülleme etkinliği %78 olarak bulunmuştur [22]. Martínez-Gómez ve arkadaşlarının sodyum aljinat-polivinil alkol hidrojellerinden metformin salımı ile ilgili çalışmasında; pH 1.2'de en yüksek ilaç salımı %55 ve pH 8.0'de 6 saat sonra salım elde edilmiştir [23]. Başka bir çalışmada ise; Hariyadi ve arkadaşlarının çalışmalarında aerosolizasyon tekniği kullanarak iyonotropik jelleşme ile aljinatlı mikro-kürelere metformin yüklemesi yapılmıştır. Metformin yüklü mikro-kürelerin pH 1.2'deki ilaç salımı 2 saatlik sürede % 22 ve %28 arasında değişmiştir. pH 7.4'te ise ilaç salımı 10 saat içerisinde %67 ve %95 olarak gerçekleşmiştir [24]. Bir başka çalışmada sodyum aljinatın tiyoglikolik asitle tiyolleştirilmesi sonucu mikroadhezif kürelerden metformin salımı yapılmıştır [25].

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen metforminin salım çalışmalarından farklı olarak tip II diyabette etkili olduğu bilinen anti-oksidan değeri yüksek olup fitoterapide yaygın olarak kullanılan sumak baharatı, aljinat ve polietilen glikol (PEG) veya polivinil alkol (PVA) polimerlerinin birlikte kullanıldığı kompozit mikroboncuklar hazırlanmış ve bunların metforminin salım özellikleri araştırılmıştır. Üç farklı koşulda gerçekleştirilen araştırmamızın birincisinde doğal bir polimer olan aljinat ile sumak içerikli malzemeler Ca^{2+}, Cu^{2+} veya Ni^{2+} varlığında sentezlenmiştir. İkincisinde ilaçsız sentezlenen mikro-kürelere adsorpsiyon yöntemiyle ilaç yüklenmiş ve üçüncüsünde ise sentetik polimerler (PVA/PEG) kullanılarak birlikte sentez ve kaplama yöntemiyle ilaçlı mikro-küreler oluşturulmuştur. Oluşturulan mikro-kürelerin metformin tutma miktarları hesaplanmış ve daha sonra mide ve bağırsak pH ortamlarında *in vitro* salım deneyleri yapılmıştır. Son olarak bu malzemeler arasından en uygun olanları seçilerek FTIR ve SEM analizleriyle karakterize edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmanın deneyleri, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Biyokimya Bölümü Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyde sentezlenen materyaller ve bileşenlerine ait FT-IR spektrum ve SEM görüntüleri alınması için Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (CÜTAM) laboratuvarı olanaklarından yararlanılmıştır.

2.1. Kullanılan kimyasallar ve cihazlar

Çalışmada sentezlenen boncukların temel bileşenleri olan Sodyum Aljinat (A) (Carlo Erba France), Poli(vinil) alkol (PVA), Poli(Etilen) Glikol (PEG) (Sigma-Aldrich, USA) katı halde kullanılmıştır. Sumak baharatı, Kaz Dağları'nda doğal yetişen öğütülmüş bitki olarak satın alınmıştır. Baharat 35 µm elek altına elenmiş olarak kullanılmıştır. Elenen baharat, sentezlerden hemen önce 35°C sıcaklıkta bir etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Aljinat jelin mikro-küre haline gelmesi için kullanılan Ca^{2+}, Ni^{2+}ve Cu^{2+} iyon çözeltileri $CaCl_2$, $Ni(NO_3)_2.6H_2O$ ve $CuSO_4.5H_2O$ tuzlarını kullanılarak hazırlanmıştır.

Etken madde olarak, Biguanidler sınıfına dahil, anti-diyabetik Metformin-HCl (MET) tercih edilmiştir. Etken madde SANOVEL firmasından saf olarak temin edilmiştir.

Boncukların sentez aşamasında, Jeio Tech Marka manyetik karıştırıcı, salım aşamasında sabit sıcaklık ve karıştırma için dolap tipi inkübatör (J.P. Selecta) kullanılmıştır. Bütün tartım işlemleri ±0,001mg duyarlılıklı analitik terazide (SARTORIUS) yapılmıştır. pH ölçümleri için Orion Model 250A marka pH metre kullanılmıştır.

Salım deneylerinde yapay (enzimsiz) mide pH'sını sağlamak için HCl (Merck, Germany), yapay barsak ortamı sağlamak için tampon çözelti hazırlanmasında monosodyum fosfat ($NaH_2PO_4.2H_2O$) ve disodyum fosfat tuzları ($Na_2HPO_4.12H_2O$) (Sigma Aldrich) kullanılmıştır. İlaç ve baharat derişimleri UV-GB (UV-VIS) spektrofotometre (Shimadzu/UV-1800) kullanılarak ölçülmüştür.

2.2. Kompozit mikro-kürelerin sentezi

Metformin salımında kullanılan mikro-küre kompozit taşıyıcılar, iyonotropik jelasyon yöntemiyle sentezlenmiştir. İyonotropik jelasyon yöntemi aljinatın zincirleri arasında iyonik köprüler oluşturmak için çok değerlikli katyonlarla etkileşime girmesi ve boncuk oluşturması temeline dayanır [24]. Mikro-kürelerin tümü aynı koşullarda etken madde içeren (İlaçlı) ve etken madde içermeyen (İlaçsız) şekilde sentezlenmiştir. İlaçsız ortam ya da sentezde kullanılan ilgili çözeltiler UV-Viz ölçümlerinde kör (blank) olarak kullanılmıştır. Genel anlamda sentez işlemi aşağıdaki iki aşamadan oluşmaktadır.

2.2.1. Jel oluşumu

Damıtık suda kütlece %1 oranında aljinat içeren çözeltiler hazırlanmış ve bu çözeltilere hazırlanacak bileşime göre sumak ve polimerik bileşenler (PEG/PVA) eşit miktarlarda eklenmiştir. Karışımlar homojen jel oluşturmak amacıyla ortam sıcaklığında 24 saat 200-300 rpm'de karıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan ikili karışımlardan birine katı metformin eklenmiş ve karışımlar ilacın çözünmesi/homojen dağılması için 2 saat daha karıştırılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Oluşum aşamasında aljinat-sumak-metformin (ASM) ve aljinat-sumak (AS) jel

2.2.2. Boncuk oluşumu

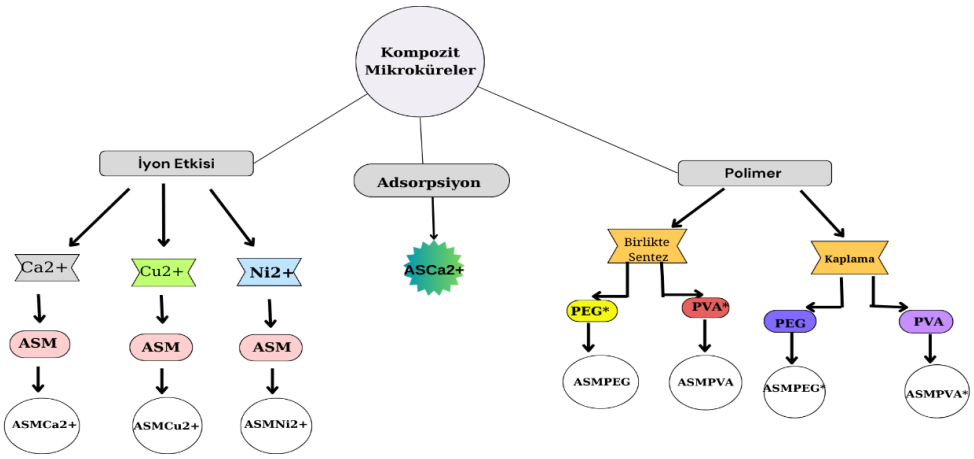
10 mL'lik şırıngaya çekilen jel, kütlece % 2 iki değerlikli iyon (Ca^{2+}, Cu^{2+} veya Ni^{2+}) içeren 10 mL çözeltiye damla damla eklenmiştir (İlaç tutunma ve salım verimine iyonik ortam katkısının incelenmesi dışındaki deneylerde yalnızca %2'lik Ca^{2+} çözeltilerinde oluşturulan boncuklar kullanılmıştır). Oluşan boncuklar 2 saat karıştırılarak kararlı hale getirilmiştir. Boncuklar süzülerek çökme ortamından ayrılmış ve iki ya da üç kez 10'ar mL damıtık su ile yıkandıktan sonra kurutulmaksızın tartılarak kapalı kaplarda buzdolabında muhafaza edilmiştir. Farklı üç iyon ortamında sentezlenen boncukların fotoğrafları Şekil 4'de görülmektedir. Üç farklı iyon varlığında oluşan boncukların rengi birbirinden farklıdır.



(a) (b) (c)

Şekil 4. Farklı (a) Ni^{2+}, (b) Ca^{2+},(c) Cu^{2+} iyon ortamlarında sentezlenen boncuklar

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen kompozit mikro-kürelerin sentezi ile ilgili süreçler, Şekil 5'de şematik olarak özetlenmiştir. Şemada Aljinat 'A', Sumak 'S', Metformin 'M', Polietilen Glikol 'PEG', Polivinil Alkol 'PVA' olarak kodlanmıştır. Süreçler, Aljinat-Sumak-Metformin içeren mikro-kürelerin farklı iyon ortamlarında sentezlenmesi (ASMCa^{2+},Cu^{2+},Ni^{2+}), M'siz hazırlanmış ASCa^{2+} kompoziti üzerine M'nin adsorpiyon yöntemiyle tutturulması ve ASMCa^{2+}'nin PEG ve PVA için polimer ortamında sentezi (ASMPEG ve ASMPVA) ve polimerle kaplanmasını (ASMPEG* ve ASMPVA*) içermekte olup ayrıntılar aşağıdaki ilgili başlıklarda sunulmuştur.



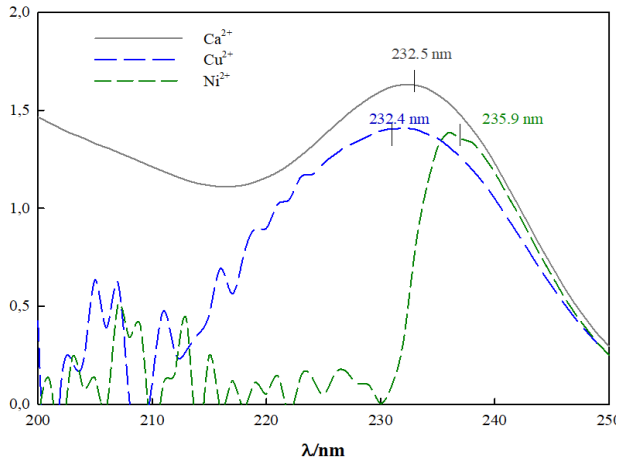
Şekil 5. Sentezlenen kompozit mikro-kürelerin sınıflandırılması

1. İyon etkisi ile mikro-kürelerin sentezi: Mikro-küreler, sentez koşullarına bağlı kalarak oluşturulan A, S ve M bileşimli ASM jellerinin Ca^{2+}, Cu^{2+} veya Ni^{2+} iyon çözeltilerine şırıngayla damlatılarak eklenmesiyle sentezlenmiştir. UV-Viz ölçümlerde çalışılan iyon metformin pik maksimumunda değişime neden olduğundan (Şekil 6) derişim hesaplamalarda kullanılan kalibrasyon eğrilerinin oluşturulmasında ilgilenilen iyon ortamında hazırlanan standartlar kullanılmıştır.

2. Adsorpsiyon yöntemiyle $ASCa^{2+}$-M mikro-küre sentezi: 'M' içermeyen ve $ASCa^{2+}$ mikro-kürelerin 0.1'er gram kütleleri tüplere konulmuş ve üzerine farklı derişimlerde (50, 100 ve 250 ppm) 10 mL ilaç eklenip su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Süre sonunda denge çözeltilerinin ilaç derişimleri spektrofotometrik yöntemle ölçülüp, adsorpsiyon değerleri hesaplanmıştır.

3. Polimer katkılı aljinat/sumak içerikli mikro-kürelerin sentezi: Aljinat, sumak ve metformin içerikli jel ortamına PEG veya PVA polimeri katılarak polimer içerikli jelleşme gerçekleştirilmiştir. Bu bileşimler Ca^{2+} çözeltilerine damlatılarak ASM-PEG veya ASM-PVA mikro-küreleri oluşturulmuştur.

4. Polimer kaplı aljinat/sumak içerikli mikro-kürelerin sentezi: 0.1 g kütleli Ca^{2+} iyonu ortamında oluşturulmuş $ASMCa^{2+}$ mikro-küreler kütlece %1 PEG veya PVA içeren 10 mL çözeltilere eklenip karıştırılarak polimer kaplı ASM-PEG* ve ASM-PVA* mikro-küreleri oluşturulmuştur.



Şekil 6. Mikro-küre sentezlerinde kullanılan iyon ortamlarının metformin pik maksimumuna değişim etkisi

2.3. Mikro-boncukların karakterizasyonu

Mikro-boncukların sentez bölümünde metformin içeren (ilaçlı) ve metformin içermeyen (ilaçsız) boncuk türlerinden yalnızca tutunma ve salım verimi yüksek olan örneklerin FT-IR ve SEM analizleri yapılmıştır.

FTIR analizlerinde KBr ile pelet hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Kuru boncukların yapısı çok sert olduğu için toz haline getirilememiştir. Bu nedenle boncukların su ile şişmesi sağlanıp yumuşak hale getirilmiş ve agat havanda parçalanarak KBr ile karıştırılmıştır. Homojen haldeki karışımlar etüvde kurutulup, pelet hale preslenerek FTIR spektrumları alınmıştır.

Taramalı elektron mikroskopu analizi için seçilmiş ve kurutulmuş boncuklar Au ile kaplanıp görüntülenmiştir.

2.4. Salım deneyleri

Salım çalışmaları 2 ortamda yapılmış olup 37.5°C sıcaklıkta, yapay (enzimsiz) mide (pH=1.2 0.1 M HCl çözeltisi) ve yapay (enzimsiz) bağırsak (pH=7.4 10 mM, fosfat tamponu çözeltisi) ortamlarında gerçekleştirilmiştir.

1. Mikro-kürelerin asitte metformin salımı: Mikro-küreler (1g) 10'ar mL pH=1.2 HCl çözelti içerisine atılarak, 37.5°C'de karıştırmalı inkübatörde 5 dk süreyle bekletilmiş ve süre sonunda çözeltiden ayrılıp aynı koşullardaki yeni asit çözeltisine alınmıştır. Bu ortamda 5-120 dk aralığında alınan örneklerin metformin içerikleri hesaplanarak salım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir beher için bulunan metformin derişimleri ardışık olarak birbirine eklenmiş ve % Toplam salım - t/dk grafikleri çizilmiştir. Deneyler paralel yürütülen ikili örnekler için yapılmıştır. ASMCu^{2+} mikro-kürenin asitte salım örneğinin fotoğrafı Şekil 7'de gösterilmiştir. Örneklemelerin metformin içerikleri derişimi pH=1.2 çözeltisinde hazırlanan metformin standartlarından elde edilen kalibrasyon doğrusundan bulunmuştur.



Şekil 7. ASMCu^{2+} mikro-kürenin asitte salım örneği

2. Mikro-kürelerin tamponda metformin salımı: 120 dk'lık süre boyunca asit salımı yapılan mikro-küre örnekleri, ardından 10 mL pH=7.4 olan fosfat tampon çözeltisine alınarak 5 dk şartlandırılmış ve süre sonunda yeni tampon aktarılmıştır. Asit salımında yapılan örnekleme işlemi belirli sürelerde tekrar edilmiştir. Ortamdaki mikro-kürelerin 30 dk etkileşim sonrasında parçalandığı gözlemlenmiştir. Tampon içeren beherlerdeki metformin derişimleri, pH=7.4 10 mM fosfat tamponu çözeltisinden hazırlanan metformin standartlarının kalibrasyon doğruları kullanılarak, spektrofotometrik yöntemle yapılmıştır.

Kör (blank) olarak kullanılacak olan ilaçsız mikro-küreler için tüm salım (asit/tampon) işlemleri ilaçlı sistemlerle yapılan şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 8).

2.5. İlaç tutunma ve salım veriminin hesaplanması

Çökme/yıkama ortamlarında tutunmadan kalan ve salım deneylerinden alınan çözeltilerin metformin içerikleri UV-Vis spektrofotometrik olarak belirlenmiştir. İlacın UV bölgedeki maksimum absorbansları ilaç içermeyip çalışma ortam koşullarını temsil eden referans çözeltilere karşı saptanmıştır. Çözeltilerin ilaç içeriklerinin hesaplanmasında ise yine çözelti ortamlarını temsil eden çözeltilerde hazırlanan Metformin standartları ile elde edilen kalibrasyon grafikleri kullanılmıştır.

Sentezlerdeki mikroboncukların % metformin tutması ve adsorpsiyonla tutunan miktarların; Q (mg g^{-1}) ve %Ads olarak hesaplanmasında 1-3 eşitlikleri kullanılmıştır. Eşitliklerde başlangıç derişimleri; C_0 (mg L^{-1}), çözelti hacmi;V (mL), ilaç çözeltilerine eklenen kütleler; m (g) ve denge derişimleri; C_d (mg L^{-1}) ölçülmüştür. Tutunma verimleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanan adsorpsiyon kapasitesi (Q, g adsorban başına mg ilaç) ve % adsorpsiyon (%Ads) değerleriyle sunulmuştur.

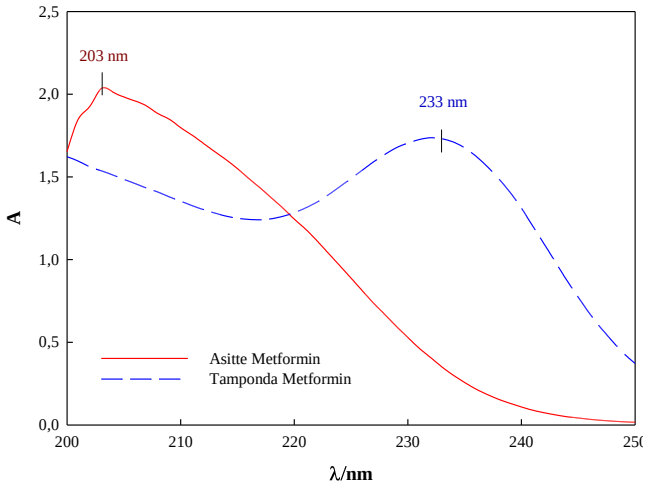
$$\%Tutunma\ verimi = \frac{(Başlangıç\ ilaç\ derişimi, C_0 - Tutunmayan\ derişim, C_d)}{Başlangıç\ derişimi, C_0}\ x\ 100 \qquad (1)$$

$$Q = \frac{(C_0 - C_d)}{m} x\ V \quad (2)$$

$$\%Ads = \frac{(C_0 - C_d)}{C_0} x\ 100 \quad (3)$$

%Salım deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan 4. eşitlik, ilaç tutmuş mikrokompozit ile temas hale getirilen mide (5-120 dk) ve ardından bağırsak (120-240 dk) pH'li çözeltilerindeki ölçülen %salımın temastan 't' süre sonraki miktarını tanımlar. Denklemde 10 (mL)xC_t (mg mL^{-1})' ve 'm_0 (mg)', sırasıyla 't' süre içinde 0.1 g ilaçlı mikro-küreden 10 mL çözeltiye salınan ilaç kütlesini ve 0.1 g mikro-küredeki tutuklu ilaç kütlesini tanımlamaktadır.

$$(\%Salım)_t = (\sum_{5dk}^{120dk} \frac{10\ mL x C_t mg/mL}{m_0\ mg} x\ 100)_{pH=1.2} + (\sum_{120dk}^{240dk} \frac{10\ mL x C_t\ mg/mL}{m_0\ mg} x\ 100)_{pH=7.4} \quad (4)$$



Şekil 8. Metformin içeren mikro-kürelerle yapılan salım ortamlarının metformin pik maksimumunun değişimine etkisi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Mikro-kürelere Metformin Tutunması

3.1.1 İyon Etkisi ile Tutunma

Aljinat-Sumak-Metformin içeren mikro-kürelerin farklı iyon ortamlarında sentezlenmesinin metformin tutunmasına olan etkisi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Mikro-kürelerin sentezinde kullanılan iyonların Metformin tutunma verimine (%TV) etkisi ve tutunan ilaç miktarlarının mg g^{-1} olarak değişimi

İyonlar	%TV	Q/mg g^{-1}
Ca^{2+}	64	11.6
Cu^{2+}	48	7.5
Ni^{2+}	45	6.9

Tabloda görüldüğü gibi sentez sürecinin Ca^{2+} ortamında gerçekleştirilmesi metformin tutunma oranını anlamlı bir şekilde artırmaktadır. İyonların tutunma verimi sıralaması Ca^{2+} (%64)>Cu^{2+} (%48)> Ni^{2+} (%45) şeklinde olup bu nedenle metformin tutunmasına iyon etkişi dışındaki sentezlerde kalsiyum iyonu ortamı kullanılmıştır.

Aljinat içerikli destek malzemelerine metformin yükleyen, örnek literatür çalışmalarından birinde, Kumar ve arkadaşları, metformini, gastrointestinal emilimi ve barsak geçirgenliğini kolaylaştırmak için, emülsiyon çapraz bağlama teknolojisi ile hazırlanan aljinat nanokapsüllere (MLAN) yüklemişlerdir. MLAN'lar, birincil mikroemülsiyon, metilen klorür içinde hazırlanmış sodyum dioktil sülfosüksinat çözeltisi içindeki homojen olan sulu sodyum aljinat çözeltisiyle oluşturulmuştur. Sonraki aşamada bunun, sulu PVA çözeltisine eklenmesiyle ikincil nanoemülsiyon hazırlanmıştır. Bu su-yağ-su emülsiyonuna, sulu kalsiyum çözeltisi damla damla eklenerek ve metilen klorürün uzaklaştırılmasıyla mikroboncuklar hazırlanmıştır. Çalışmanın sonucunda 100 mg nanopartikülde 3.12 mg metformin tutunduğu bulunmuştur [22]. Hariyadi ve arkadaşları Metformin HCl-Ca aljinat mikro-küreleri, aerosolleştirme tekniği kullanarak üretmişlerdir. Çalışmada metformin HCl-Ca aljinat mikro-

kürelerinin fiziksel özellikleri içinde çapraz bağlayıcı olan aljinat ve $CaCl_2$ üzerine yapılan deneyi incelemişlerdir. Yapılan çalışma, kullanılan yöntemin aljinat mikro-kürelerin partikül büyüklüğünü arttırdığını, metformin-HCl yükünü azaltıp, mikro-kürelerin hapsetme verimliliğini arttırdığı göstermiştir. Çapraz bağlayıcı $CaCl_2$ derişiminin artırılması mikro parçacık boyutunu artırırken metformin HCl yükünü ve mikro-kürelerin hapsetme verimliliğini azaltmıştır. $CaCl_2$ derişiminin azaltılması ise metformin HCl yükünü ve mikro-kürelerin hapsetme verimliliği artmıştır. Bu değerlendirmeler sonucu optimum koşullardaki merformin tutma verim %73 olarak gerçekleştirilmiştir [24]. Khalid ve arkadaşları emilsüyon çözücü buharlaştırma yöntemi ile soydum aljinatın (SA) esterifikasyonu ile tiyolatlanmıs sodyum aljinat (TSA) bazlı mikro-küreler oluşturmuşlar ve bunlara Metformin-HCl yükleyerek tutunmayı mukoadhezif etkileri açısından değerlendirmişlerdir; *in vitro* çalışma yaparak TSA'nın derecesi, disülfür bağı oluşumu, viskoelastik özellikler, yüzde verim gibi parametreleri değerlendirmişlerdir. MTF-HCl yükleme verimi %10.65 ve sodyum aljinat ve tiyollenmiş sodyum aljinat mikro-kürelerde ise verim % 24.52 dir [25]. Yukarıda değinilen kaynakçaların sonuçları, metforminin aljinat kürelere tutturulmasında uygulanan yöntemin etkisinin önemini ifade etmektedir. Kaynakçalarda sunulan tutunma verimleri bu çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslandığında, izlediğimiz yöntemin ilaç tutunmasına katkısının oldukça başarılı sonuçlar sunduğu görülmektedir.

Literatürdeki bir başka metformin salım çalışmasında, emilsiyon-çapraz bağlama yöntemi ile hazırlanan kitosan mikro-kürelerde, birlikte sentez yoluyla metformin tutunma veriminin yaklaşık %20 olduğu bulunmuştur. Bu düşük verim, Metformin-HCl'in sudaki yüksek çözünürlüğü ve etken maddenin organik ortamdan sulu ortama kaçışına bağlanmıştır [26].

3.1.2 Adsorpsiyon Yöntemiyle Tutunma

Bu bölümde sentez aşamalarıyla birlikte aljinat (A) ve sumak (S) jelleştikten sonra ilaçsız olarak AS-Ca^{2+} kodlu mikro-küre elde edilmiştir. Bu yöntemin amacı mikro-kürelere adsorpsiyon yöntemiyle ilaç tutturup tutunma değerlerinin, birlikte sentez ile kıyaslanmasıdır. Aşağıda Tablo 2'de ilaçsız mikro-küreye (AS-Ca^{2+}) belirli derişimlerde (50, 100 ve 250 ppm) ilaç tutturulması ile oluşan % Adsorpsiyon değerleri verilmiştir.

Tablo 2. İlaçsız mikro-kürelere (ASCa^{2+}) belirli derişimlerde (ppm, mg L^{-1}) adsorpsiyon yöntemiyle tutturulan metformin miktarlarının %Adsorpsiyon ve mg g^{-1} olarak değişimi

İyon	C_0/ppm	C_d/ppm	%Ads	Q/mg g^{-1}
AS-Ca^{2+}	50	45.7	8.57	0.423
	100	92.7	7.26	0.707
	250	230.1	7.96	0.699
		Ort. Adsorpsiyon	**7.93**	**0.610**

Tabloda verilen ortalama %Adsorpsiyon verileri değerlendirildiğinde, AS-Ca^{2+} mikro-kürenin metformin tutunma değeri %7.9'dur. Bu değer mikro-boncukların Ca^{2+} iyonu varlığında sentezlendiği durumdaki tutunmaya göre oldukça düşüktür. Bu durum adsorpsiyon yönteminin metformin tutuklanmasında yeterince verimli olmayacağı şeklinde yorumlanabilir. Düşük miktarda tutunma, adsorpsiyon ile tutunmanın mikroküre-yüzey etkileşimi ve yüzey özellikler ile ilişkili olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Birlikte sentezde ise mikro-küreler metforminle birlikte oluşmaktadır.

3.1.3. Tutunmaya Aljinat/Sumak İçerikli Mikro-kürelerin Polimerle Birlikte Sentezi ve Polimerle Kaplanması Süreçlerinin Etkisi

Araştırmada izlenen ASMPEG veya ASMPVA mikro-kürelerin polimeri içeren ortamda birlikte sentezi ve ASMPEG* veya ASMPVA* mikro-kürelerin ASMCa^{2+} mikro-kürelerin polimer ile kaplanması süreçlerinden elde edilen Metformin tutma değerleri Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3. Mikro-kürelerin polimer içeren ortamda sentezlenmesi ve polimerle kaplanmasının Metformin tutunmasına tutma verimi (%TV) ve tutma miktarı (Q=mg g^{-1})

Birlikte Sentez			Kaplama		
Mikro-küreler	**%TV**	**Q/mg g^{-1}**	**Mikro-küreler**	**%TV**	**Q/mg g^{-1}**
ASMPEG	58	7.6	ASMPEG*	23	4.8
ASMPVA	56	8.1	ASMPVA*	54	6.9

Tablo 1'deki Ca^{2+} iyonun tutunma verimi %64'tür. Bu tutunma değeri PEG ve PVA polimerleriyle karşılaştırıldığında bileşenlere PEG veya PVA katılmasıyla tutunma verimi yaklaşık aynı olarak %58 veya %56 olarak azalmıştır. PEG polimerinin kaplamada kullanılması tutunma verimini oldukça (%23) düşürmüştür. PVA polimeri için elde edilen verimler birlikte sentez yönteminde %56 ve kaplama yönteminde %54 olarak yaklaşık aynıdır. Bu durum birlikte sentez sürecinde PEG molekülleri arasında oluşan hidrojen bağlarının katkısıyla metforminin yapı içerisine yüksek

oranda tutuklanmasıyla açıklanabilir. Yüzey kaplama PEG'in mikro-kürelerin mekanik dayanıklılığını arttırırken ilacın tutunma verimini düşük kalmasına neden olmaktadır. PVA'nın kullanıldığı her iki yöntemden de elde % tutma verimleri benzerlik göstermiştir. Gözlemimiz, kaplama yönteminin PVA mikro-kürelerin dayanıklılık süresini arttırıyor olduğu şeklindedir.

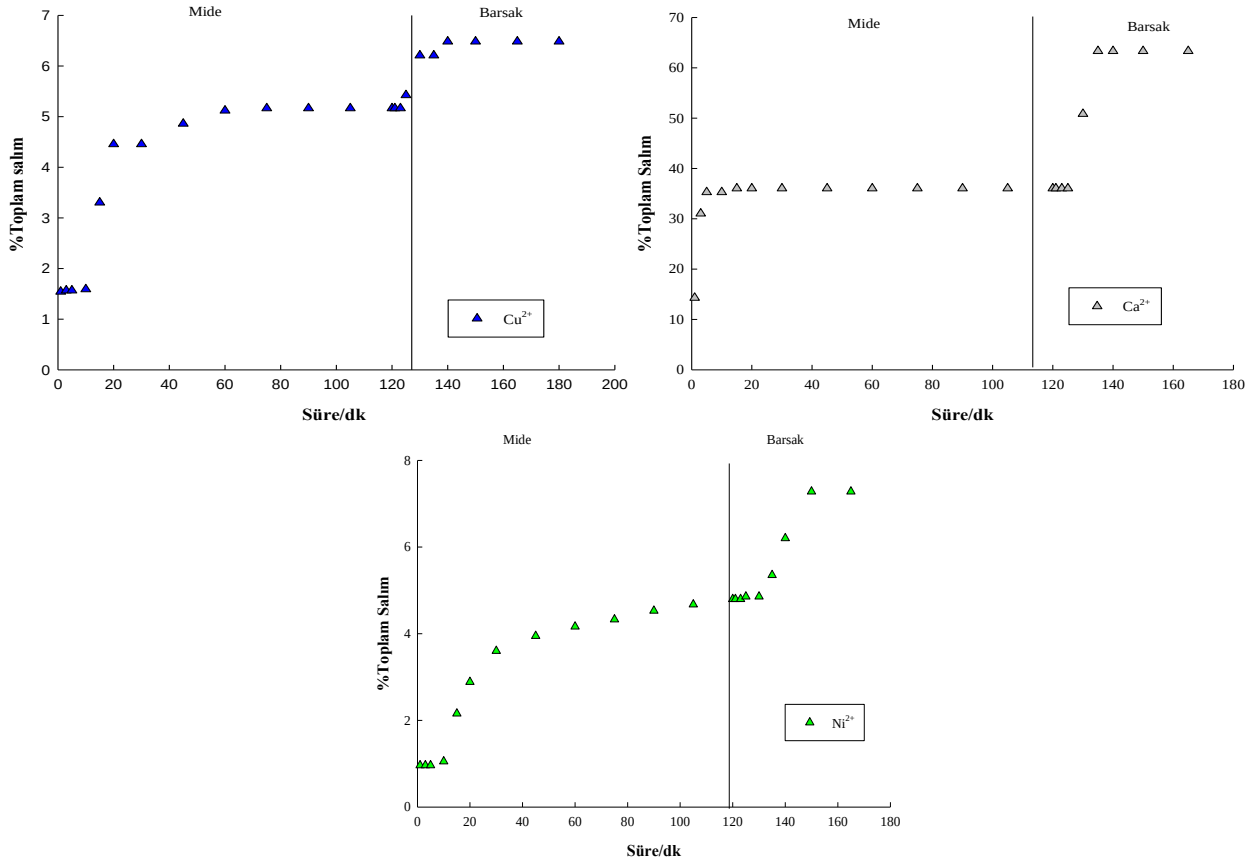
Sentezlenen tüm mikro-boncukların tutunma verimleri birlikte değerlendirildiğinde en yüksek tutunma veriminin (%64) kalsiyum ortamında sentezlenen AS boncuklarda gözlendiği görülmektedir. Bu sonuç Hariyadi ve arkadaşlarının çalışmalarındaki %73 verimden daha düşüktür [24]. Ancak çalışmada aerozilasyon tekniği kullanılmıştır ve destek malzemelerin yüzey alanı daha büyüktür. Bu da tutunmayı arttırmış olabilir. Tutunma verimi açısından birlikte sentez yönteminin adsorpsiyon yönteminden daha etkili olduğu görülmektedir. Polimerlerin (PEG veya PVA) destek malzemeye eklenmesinin tutunmaya katkısı olmasa da mikro-kürelerin bağırsak ortamında bozunmasını geciktirdiği görülmüştür.

3.2 Metformin'in Salım Sonuçları

Bu bölümde sentezlenen mikro-kürelerin yapay(enzimsiz) mide ve bağırsak ortamlarında zamana karşı metformin salımı incelenmiştir. Çözeltilerin ilaç içeriklerinin hesaplanmasında ise yine çözelti ortamlarını temsil eden çözeltilerde hazırlanan Metformin standartları ile elde edilen kalibrasyon grafikleri kullanılmıştır.

3.2.1. Farklı İyon Ortamlarında Hazırlanan Aljinat/Sumak İçerikli Kompozit Mikro-kürelerin Salımı

Şekil 9 çapraz bağlayıcı özelliği olan üç farklı iyonun (Ca^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}) varlığında sentezlenen ASM mikro-kürelerin yapay mide ve bağırsak ortamlarındaki %Toplam metformin salımını göstermektedir.



Şekil 9. Farklı iyon (Ca^{2+}, Cu^{2+} ve Ni^{2+}) ortamlarında sentezlenen ASM mikro-kürelerden mide ve bağırsak pH'lerinde %metformin salımının zamanla değişimi

Şekil 9'daki Ca^{2+} iyonu varlığında elde edilen ASMCa^{2+}'nin yapay mide ortamında (pH=1.2) ilaç salımı ilk 5. dakikaya kadar artış sağlayıp, 5. dakikadan sonra sabit salım yapmış ve patlama etkisi (burst effect gösterip maksimum salım değeri % 36'ya ulaşmıştır. Yapay bağırsak (pH=7.4) ortamında salımın bir süre daha sürdüğü (120-134 dk aralığında %64'e ulaşmıştır) ancak mikro-kürenin bir süre sonra dağıldığı belirlenmiştir.

Cu^{2+} iyonu varlığında elde edilen $ASMCu^{2+}$ mide ortamında 1-120 dakika aralığında toplamda % 4.9 ilaç salımı yapmıştır. Bu değer yapay barsak ortamında yaklaşık %6 değerine ulaşmıştır. Sentez sürecinde $ASMCu^{2+}$ üzerine tutunan metforminin Cu^{2+} iyonun tutunma veriminin aksine çok düşük ilaç salımı görülmüştür.

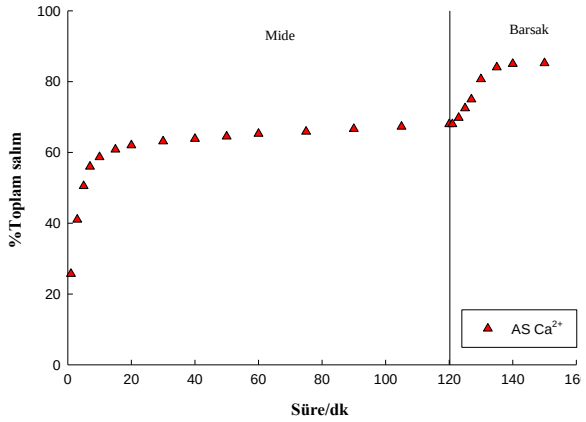
Ni^{2+} iyonu ortamındaki mikro-küreler incelendiğinde yapay mide ortamında 1-120 dk aralığında ulaşılan maksimum salımın % 4.8 olduğu görülmüştür. Bağırsak ortamındaki ulaşılan salım 120-165 dakika arasında %7 civarındadır.

Araştırmamız sonunda gözlenen salım değerleri, Hariyadi ve arkadaşlarının aerosolleştirme tekniği kullanarak ürettikleri metformin HCl-Ca aljinat mikro-kürelerinin pH=1.2'de HCl ortamında 2 saatlik sürede %22-%28 ve pH=7.4 tampon ortamında 10 saat içinde %67-95 salım değerlerinden oldukça düşüktür [24]. Khalid ve arkadaşlarının çalışmasında ise emülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi ile sentezlenen boncukların pH=6.8 fosfat tamponundaki ilaç salımı 12 saatte tutunanın %80'den fazladır [25].

İyonların toplam salım miktarları $Ca^{2+} > Cu^{2+} \cong Ni^{2+}$ sıralamasındadır. Bu durum ilaç ve bakır ya da nikel iyonlarının kararlı koordinasyon kompleks oluşturma ihtimalinden kaynaklanabilir. Bağırsak ortamlarında mikro-boncukların dağılmasının nedeni aljinat boncukların nötr ve bazik ortamdaki yapısal kararsızlığıdır.

3.2.2. Adsorpsiyon Yöntemiyle Tutturulmuş metformin içeren $ASCa^{2+}M$ Mikro-kürelerin İlaç Salımı

Şekil 10, adsorpsiyonla tutunmuş metformin içeren $ASCa^{2+}M$ mikro-kürenin %salım-zaman ilişkisini göstermektedir.



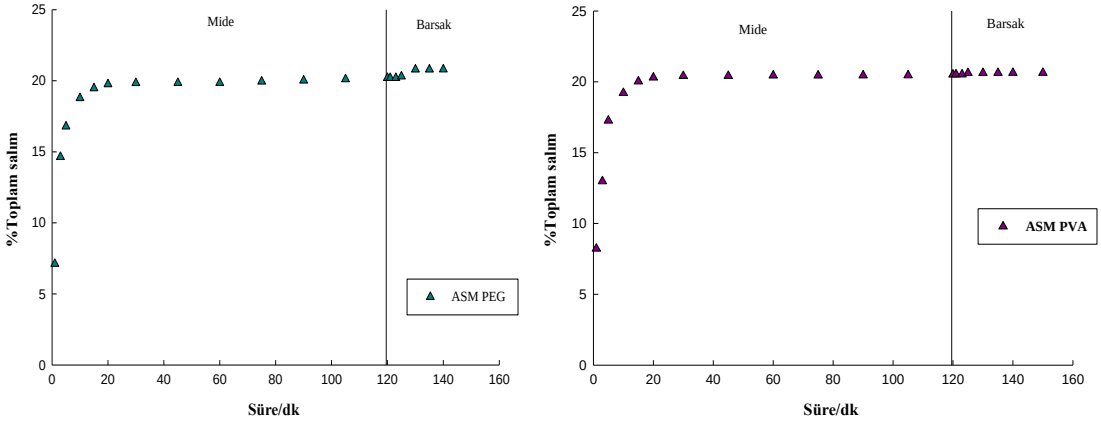
Şekil 10. Adsorpsiyon yöntemiyle tutunmuş $ASCa^{2+}M$ mikro-kürelerden mide ve bağırsak pH'lerinde %metformin salımının zamanla değişimi

Metformin salımı 1-10 dk aralığında %27'den %59 değerine, 20. dk'da %62 değerine ve buradan 120. dk'da %68'e ulaşmaktadır. Yapay bağırsak ortamındaki salım 123. dk'da %69 iken 140. dk'da kadar %85 yükselmektedir. $ASCa^{2+}$ mikro-kürenin sentez sürecindeki metformin tutma oranı düşük olmasına rağmen yüksek oranda salım yapması bu araştırmanın önemli bulgularından biridir.

3.2.3. Polimer Katkılı ASMPEG ve ASMPVA Mikro-kürelerin İlaç Salımı

Şekil11 Aljinat/Sumak ve polimer (PEG, PVA) içeren mikro-kürelerin %salım grafiklerini içermektedir.

Şekilde, ASM-PEG mikro-küreden salımın 1-10 dk aralığında yavaş bir artışla % 20 salıma ulaştığı ve bu değerin 20-120 dk aralığında yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Bağırsak pH ortamının izlenen salıma etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Benzer gözlem ve %salım değerlerinin ASM-PVA için de geçerli olduğu bulunmuştur.

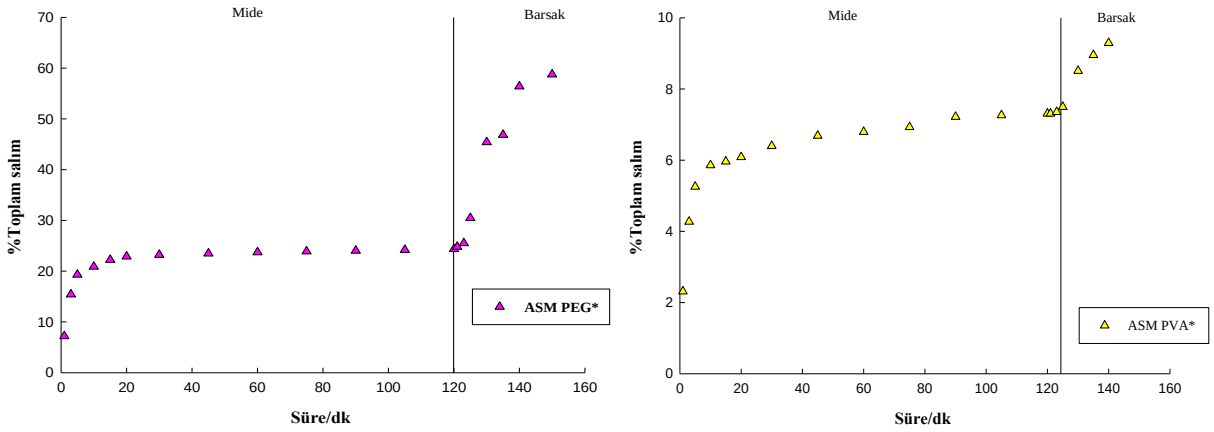


Şekil 11. Polimer katkılı ASM-PEG ve ASM-PVA mikro-kürelerin %metformin salımının zamanla değişimi

Gomez ve arkadaşlarının çalışmasına benzer şekilde, polimer katkılı salım sonuçlarına göre; ASM-PVA ve ASM-PEG mikro-kürelerin içeriğindeki sodyum aljinat ve PVA/PEG polimerlerinin etkileşimindeki karboksilat grubunun protonlanmasının elektrostatik itmeyi azaltmasından kaynaklı ilaç salımı mide ve bağırsak ortamlarında düşük çıkmıştır [23].

3.2.4 Polimerle kaplanmış ASMPEG* ve ASMPVA* Mikro-kürelerin İlaç Salımı

Şekil 12'deki ASMPEG* ile ilgili salım grafiği, bu yapının 1-20 dk aralığında yavaş bir artışla %23 ilaç salımı yaptığını ve salımın 20-120 dk aralığında maksimum %23'e kanıtlamaktadır. Salım, bağırsak pH ortamında 120-150 dakika sonucu kademeli artışla %59 olarak gerçekleşmektedir. Tutunma verimi düşük olan ASMPEG* yüksek oranda salım yapmıştır. Bu durum, PEG polimeriyle kaplama işleminin ilaç salımına birlikte sentezleme yöntemine göre daha işlevsel katkı sağladığını göstermektedir. Bu durum, PEG ile kaplama işleminin ASMPEG* mikro-kürenin mide ve bağırsak ortamlarında dayanıklılığını arttırması olarak da değerlendirilebilir.



Şekil 12. Polimerle kaplanmış ASM-PEG* ve ASM-PVA* mikro-kürelerin %metformin salımının zamanla değişimi

ASMPVA* ile ilgili salım grafiği, bu mikro-kürenin yapay mide ortamında 1-10 dk sürede %5'e ulaşan salım yaptığını bu durumun 10-120 dk aralığında %7'ye ulaştığını göstermektedir. Barsak ortamındaki 120-140 dk içinde ulaşılan değer %8'dir.

PEG ve PVA polimerlerinin birlikte sentez yönteminde tutunma verimleri yüksek olmasına rağmen salım grafikleri beklenildiği gibi olmamış ve düşük çıkmıştır. PEG polimerinin kaplama yönteminde tutunma verimi düşük çıkmasına rağmen salım etkinliği birlikte sentez yöntemine göre yüksek bulunmuştur.

Literatürde, Kumar ve arkadaşlarının çalışmalarında, oluşturdukları nanoformülasyonun (MLAN) ilacın sodyum aljinat ve PVA'da yüksek ve etkili emülsifikasyonu nedeniyle, saf metformine kıyasla kontrollü ilaç salınımı gösterdiği kanıtlanmıştır. Saf metformin, uygulamadan yaklaşık 1 saat sonra %100 oranında salınırken, MLAN'larda kontrollü/sürdürülebilir bir salınım gözlemlenmiştir [22]. Benzer çalışmalar arasında en verimli salım grafikleri izlenen destek malzemesi bu çalışmada sentezlenmiştir.

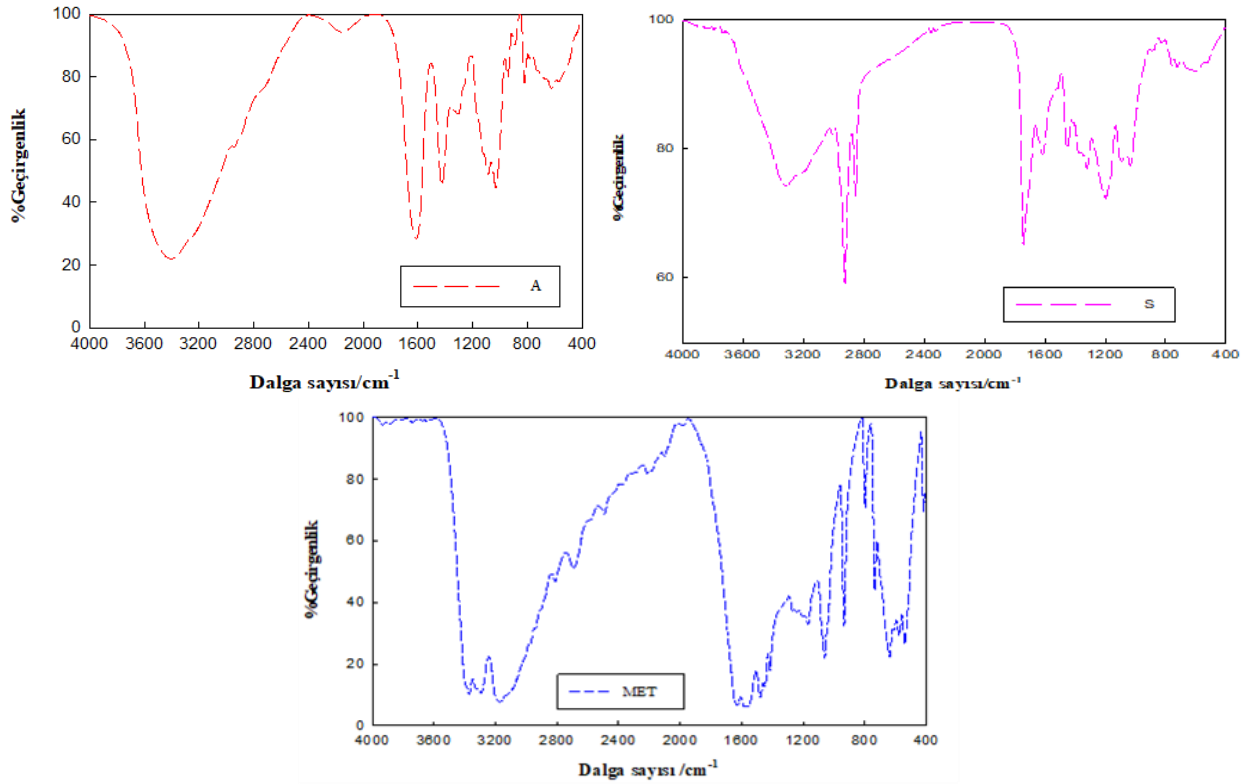
Martinez-Gomez ve arkadaşları donma-çözülme yöntemi kullanarak sodyum aljinat/PVA mikro-küreler elde etmişler ve bu mikro-kürelere metformin hidroklorür yüklemişlerdir. pH:1.2'de sodyum aljinat /PVA mikro-küreleri çok düşük metformin salımı gösterirken, pH: 8' de 6 saat sonra en yüksek salım %55'tir. pH'ın artması metformin salımı yüzdesini arttırmıştır[23]. Çalışmamızın yöntemleri Martigenez-Gomez ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile farklılık gösterir ve polimer katkılı yöntemde ASM-PVA kodlu mikro-kürenin metformin salımı pH: 1.2' de %20, pH:7.4'te de %20 'dir. Polimer kaplamalı yöntemde de ASM-PVA* kodlu mikro-kürenin salımı pH: 1.2 'de %7, pH: 7.4'te ise %8 olarak daha düşüktür. Bu verilere dayanarak PVA, Martinez-Gomez ve arkadaşlarının çalışmasında kullandıkları destek malzemenin ilaç salımı açısından daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

3.3. Mikro-kürelerin Karakterizasyonu

3.3.1 FTIR Analizleri

1. Aljinat, Sumak ve Metformin spektrumları

Araştırması yapılan mikrokompozitlerin temel bileşenleri olan Aljinat, Sumak ve Metforminin FT-IR spektrumları Şekil 13'te ilgili açıklamalar aşağıdaki metin içinde sunulmuştur.



Şekil 13. Sodyum aljinat, sumak ve metformine ait FT-IR spektrumları

Sodyum aljinat spektrumunda hidroksil, eter ve karboksilik fonksiyel gruplarının absorpsiyon bantları bulunur [27]; aljinatın 1029 cm^{-1}'deki karakteristik üçlü bandı ve sırasıyla 1615 ve 1418 cm^{-1} deki bandlar karboksilat grubu C-O asimetrik ve simetrik yapılarının karakteristik gerilme titreşimlerini göstermektedir [19, 23]. Diğer yandan 1303 ve 892 cm^{-1} bantlar ise zayıf bantlardır [28]. Sodyum aljinatın 945 cm^{-1}'deki bandı üronik asit kalıntılarının C-O gerilme titreşimini, 824 cm^{-1} deki bandı ise mannuronik asit kalıntılarını göstermektedir [23]. Parmak izi bölgesinde 950 -750 cm^{-1} aralığındaki zayıf bantlar karbohidrat analizinde kullanılır [28]. 3414 cm^{-1}'deki görülen geniş absorpsiyon bandı moleküllere bağlı suyun OH gerilmesini göstermektedir [25].

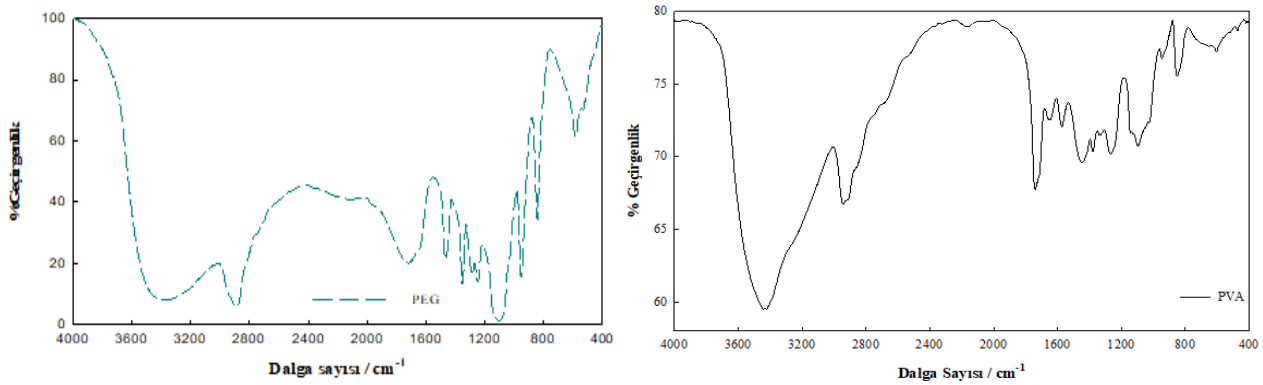
Sumak baharatının spektrumunda görülen 3600 cm^{-1} ve 3200 cm^{-1} arasındaki geniş ve güçlü OH bantları çoğunlukla sumak biyokütlesindeki fenolik bileşiklere karşılık gelmektedir. İkincil amin için N—H gerilmesi 3500 cm^{-1} ve 3300 cm^{-1} aralığında oluşan bandı, 2924 ve 2854 cm^{-1} ana pikler ise alifatik ve aromatik C-H bağlarını göstermektedir. 1469 cm^{-1} bandı metilen ve metan (C-H) gruplarının, 1733 cm^{-1} güçlü band ise sumak biyokütlesindeki C-O gerilmesiyle oluşan amid gruplarının bandıdır. Öte yandan C—N gerilmesi 1350 ve 1000 cm^{-1} aralığında oluşmaktadır. 1180 cm^{-1} yakınındaki band, C-O ile gösterilen organik bileşiklerin yaygınlığı olarak,

1050 cm^{-1} yakınındaki bandın ise (C-O ve C-O-H)'den kaynaklandığı ve polisakkaritlerin olduğu düşünülebilir. =CH ve N—H gruplarının düzlem dışı gerilmesi sonucu 1500 ve 600 cm^{-1} arasında pikler oluşur [29, 30].

Metformin-HCl'nin FT-IR spektrumundaki bantlardan 3367 cm^{-1} N-H asimetrik gerilmesine, 3293 ve 3149 cm^{-1} ise N-H simetrik gerilmesine karşılık gelmektedir [26]. Başka bir çalışmaya göre metforminin kimyasal yapısındaki C=N-H grubu N-H titreşimleri (simetrik-asimetrik gerilmeler) 3366 ve 3288 cm^{-1}'de bulunmaktadır. Guanidin ($HNC(NH_2)_2$) bağlarına sahip NH_2 deformasyon ve N-H salınma bandı 1540 ve 936 cm^{-1}'de, C=N gerilme bandı ise 1621 cm^{-1}'de görülmektedir [31]. CH_3 molekülünün orta yoğunluktaki üç deformasyon bantları sırasıyla 1413cm^{-1}, 1448cm^{-1} ve 1472 cm^{-1} şeklinde gözlenmektedir. 735cm^{-1} ve 936 cm^{-1}' de bulunan bantlar sırasıyla C-H ve CN-C gruplarına, 1038 cm^{-1} ve 1166 cm^{-1}'de bulunan iki band ise ikincil amin grubunun C-N titreşimine atfedilir [32].

2. PEG ve PVA spektrumları

Şekil14, PEG ve PVA polimerlerine ait FT-IR spektrumlarını içermektedir.



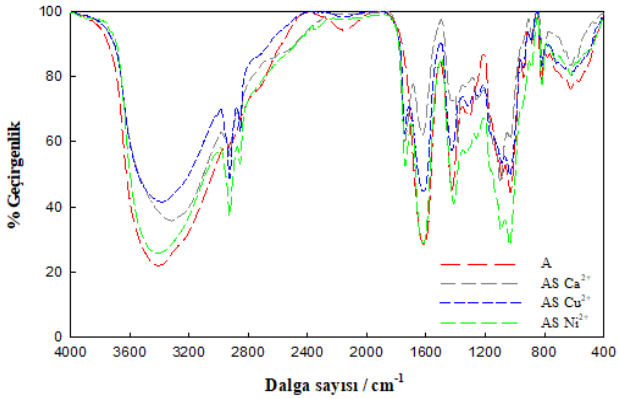
Şekil 14. Polietilen glikol (PEG) ve Polivinil alkol (PVA) polimerlerine ait FT-IR spektrumları

PEG'in spektrumundaki 3400 cm^{-1} bandının pik yoğunluğu O-H gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2889cm^{-1}, 1630 cm^{-1} ve 1111 cm^{-1} karakteristik absorpsiyon bantları ise C-H, C=O ve C-O'nun gerilme titreşimlerinden oluşur. 2900 cm^{-1} de güçlü absorpsiyon bandı alkan gruplarından meydana gelir. PEG' de bulunan metilen grubunun 2803 cm^{-1} bandında titreşim yaptığı, 966 cm^{-1} ve 849 cm^{-1}'deki keskin ve güçlü bantların C-C gerilmesinden kaynaklandığını göstermektedir. 1100-1060 cm^{-1}'deki bantların eter grubunun C-O-C gerilmesine atfedilmektedir. Parmak izi bölgesinde 531 cm^{-1} ve 508 cm^{-1} görülen bantlarda ise C-H grubunun düzlem dışı bükülmesini göstermektedir [19, 33-35].

PVA spektrumunda görülen 3550-3200 cm^{-1} arasında olan geniş bant, moleküller arası ve molekül içi hidrojen bağlarından meydana gelen O-H gerilmesiyle ilişkilidir. 2840-3000 cm^{-1} bandı alkil gruplarndaki C-H gerilmesinden kaynaklanır [36]. 2936 cm^{-1} ve 2906 cm^{-1} görülen bantlar CH_2 'nin sırasıyla asimetrik ve simetrik gerilmelerini göstermektedir. 1416 cm^{-1} bandı CH_2 bükülmesiyle, 1643 cm^{-1}'de gözlemlenen band ise CH_2'nin su absorpsiyonuna bağlı gerilmesiyle oluşur [37].

3. Mikro-küre oluşumuna iyon etkisi spektrumları

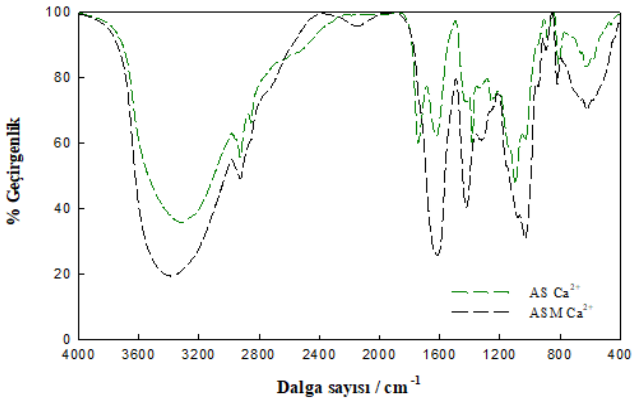
Farklı iyon ortamlarındaki (Ca^{2+}, Cu^{2+},Ni^{2+}) AS içerikli kompozit mikro-kürelere ait spektrumlar sodyum aljinat spektrumlarıyla karşılaştırıldığında aljinat spektrumundaki 1625 cm^{-1} ve 625 cm^{-1} karakteristik bantların kompozitlerde de gözlenmesi (Şekil15) Aljinat-Sumak bağlanmasına kanıt olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 15. Ca^{2+}, Cu^{2+},Ni^{2+} iyon ortamlarındaki Aljinat/Sumak içerikli kompozit mikro-kürelerin spektrumlarının sodyum aljinat FT-IR spektrumu ile karşılaştırılması

4. Metformin içerikli ASM mikro-küre oluşum spektrumları

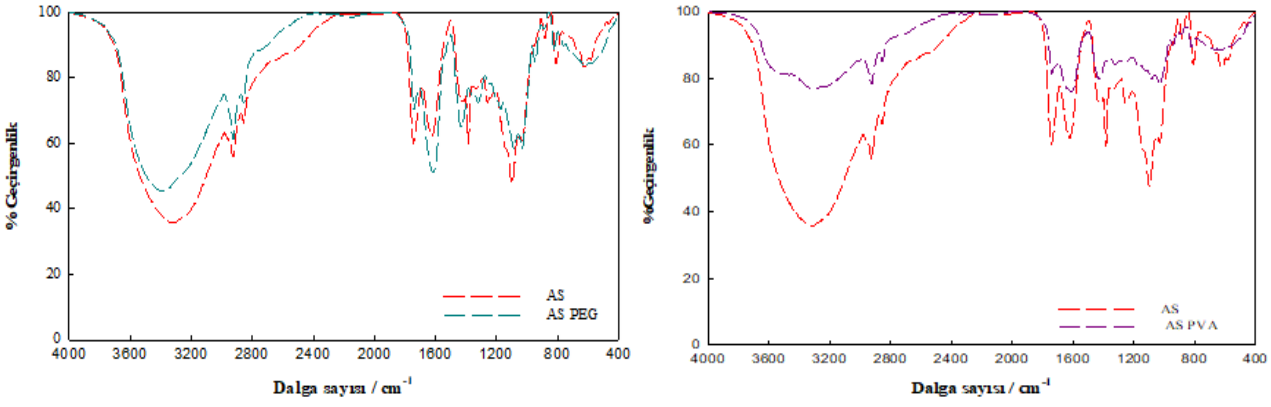
Şekil 16'da Ca^{2+} ortamında sentezlenen hem $ASCa^{2+}$ hem de $ASMCa^{2+}$ spektrumlarında gözlemlenen sodyum aljinata ait 1625cm^{-1} ve 625 cm^{-1} ortak bantları ve $ASMCa^{2+}$ spektrumunun ortak bantlar dışında tamamen farklı bir görünümde oluşu AS'ye M katılımının göstergesi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 16. Ca^{2+} iyonu ortamında oluşturulan Aljinat/Sumak (AS) mikro-küre spektrumunun ilaçlı Aljinat/Sumak (ASM) mikro-kürenin spektrumu ile karşılaştırılması

5. PEG ve PVA katkılı AS mikro-küreler

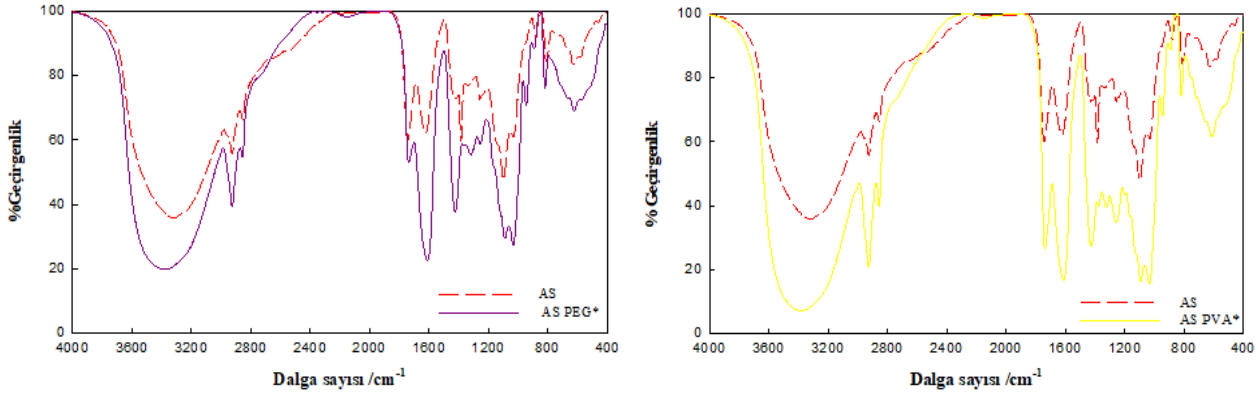
Şekil 17'de PEG veya PVA katkılı ilaçsız mikro-küreler (AS PEG veya AS PVA) ile AS mikro-kürenin spektrumları karşılaştırılmıştır. AS ile ilgili 2927cm^{-1}, 1630 ve 1097 cm^{-1} piklerindeki belirgin geri çekilmeler ile AS PEG veya AS PVA spektrumlarının AS'den belirgin farklılıkları polimer katkılı sentezlerin gerçekleşme kanıtlarıdır.



Şekil 17. PEG veya PVA katkılı Aljinat/Sumak kompozit mikro-küreler (AS PEG veya AS PVA) ve Aljinat/Sumak içerikli kompozit mikro-küre (AS) spektrumlarının karşılaştırılması

6. Yüzeyi PEG ve PVA kaplı AS mikro-küreler

Yüzeyi PEG veya PVA kaplı ilaçsız mikro-küreler (AS PEG* veya AS PVA*) ile AS mikro-kürenin spektrumları Şekil 18'de görülmektedir. AS ve polimer kaplı mikro-küre spektrumlarındaki ortak 1622 cm^{-1} ve 1517cm^{-1} piklerindeki belirgin geri çekilmeler ile birlikte AS PEG* veya AS PVA* spektrumlarının AS'den belirgin farklılıkları polimer kaplı sentezlerin gerçekleşme kanıtlarıdır. Kaplama mikro-kürelerin spektrumları, polimerle birlikte sentezle oluşturulanlardan farklıdır. Bu durum iki teknikle hazırlanan kompozit boncukların yapısal farklılığının da kanıtıdır.

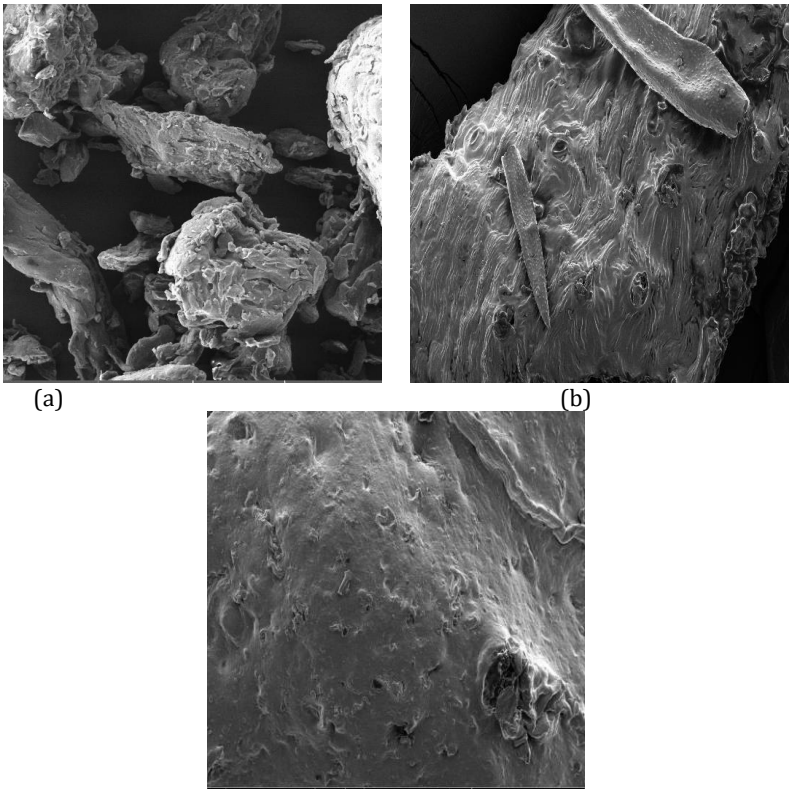


Şekil 18. PEG veya PVA ile kaplı ilaçsız Aljinat/Sumak kompozit mikro-küreler (ASPEG* veya AS PVA*) ve Aljinat/Sumak içerikli kompozit mikro-küre (AS) spektrumlarının karşılaştırılması

Tüm kompozit mikro-küreler kendilerine has özelliklere sahip ve kendilerini oluşturan bileşenlerinden farklı FT-IR spektrumları göstermişlerdir.

3.3.2 SEM Analizi

Aljinat (A), sumak (S) ve bunların kompozitinin (AS) SEM görünümleri Şekil 19'da karşılaştırılmıştır.



(a) (b)

(c)

Şekil 19. A (a), S (b), AS (c) materyallerinin 1000 kat büyütülmüş SEM fotoğrafları

Aljinatın yüzey morfolojisi belirli kümeler halinde, sumağın yüzey morfolojisi şeritli çizgiler halinde görülmektedir. AS kompozitin ise yüzey morfolojisi kendisini oluşturan aljinat ve sumak bileşenlerinin bir kombinasyonu olarak tanecikli ve pürüzlü şekilde görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada aljinatın iyonotropik jelasyon yöntemiyle iki değerlikli iyonlar ortamında aljinat kökenli mikro-küreler sentezlenmiştir. Terapötik alanda ve fitoterapide yaygın olarak kullanılan hipoglisemik etkisi yüksek olan sumak baharatı aljinat jele eklenip, tip II diyabette etkili ve antidiyabetik olan metformin etken maddesinin salımına katkıda bulunabileceği ön görülmüştür. Sumağın, metformin yanında diyabete olan katkısının araştırılması için *in-vivo* çalışmalara ihtiyaç vardır.

Çalışmada AS mikro-kürelerin etken madde tutunma verimini ve salım profillerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı yöntemler araştırılmıştır.

İlk yöntemde aljinatın mikro-boncuk oluşturacağı çapraz bağlayıcı iyonların etken madde tutunma ve salım değerlerine katkısı incelenmiştir. Ca^{2+} iyonu ortamında hazırlanmış AS Ca^{2+} mikro-küre en yüksek tutunma verimine (%64) sahip olmuştur. Salım açısından diğer iyonlara göre yüksek olan AS Ca^{2+} mide ortamında %36 salım yaparak patlama etkisi gösterdiği ve devamında barsak ortamında %64 ile sabit salım yaptığı görülmüştür.

İkinci yöntemde ilaçsız mikroboncuklara adsorpsiyon yöntemiyle belirli derişimlerde ilaç tutturulması incelenmiştir. AS-Ca^{2+} mikro-kürenin tutunma değeri %7.9'dur. Salım açısından ise ASCa^{2+} mikro-küre yapay mide ortamında %69, yapay bağırsak ortamında %85 salım yapmıştır.

Üçüncü yöntemde birlikte sentezle jele PEG/PVApolimerleri katılmış ve Ca^{2+} iyonu ortamında üçlü kompozitler hazırlanmıştır. ASPEG %58 yüksek tutunma, ASPVA ise %56 tutunma yapmıştır. Salımda her iki polimerli üçlü kompozitler %20 salım yaparak arttırıcı etkileri olmamıştır. Üçüncü yöntemin diğer aşamasında PEG/PVA polimerleriyle Ca^{2+} iyonu ortamında üçlü kompozitlere kaplama yapılmıştır. ASPEG* %23 tutunma verimine, ASPVA* ise %54 yüksek tutunma verimine sahip olduğu görülmektedir. Tutunma açısından ASPVA* kompoziti olumlu sonuç vermiştir. Salım açısından değerlendirildiğinde ise ASPEG*kompoziti mide ortamında %23, barsak ortamında % 59 yüksek salım yapmış ve iyileştirici yönde etkisi olmuştur. ASPVA* kompozit %8 salım yapmış ve etkisi olmamıştır.

Tüm bu sonuçlara bakılarak; sentezlenen aljinat içerikli mikro-boncukların, kolay sentezlenebilen, literatürdeki benzerlerinden bazılarına göre yüksek tutunma ve salım verimi gösteren destek malzemeleri olduğu söylenebilir.

FTIR analizleri, ikili ve üçlü kompozit mikro-kürelerin FT-IR spektrumları kendilerini oluşturan bileşenlerin karakteristik bantlarını da içeren bileşenlerinden farklı bantlar göstermiştir. AS'nin SEM görünümü, bu yapıya ait yüzey morfolojisinin kendisini oluşturan aljinat ve sumak bileşenlerinin bir kombinasyonu olarak tanecikli ve pürüzlü olduğunu kanıtlamıştır.

Teşekkür

Yazarlar, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri Komisyonu'na ve CÜBAP idari personeline, etken maddenin saf halinin temini için SANOVEL firmasına teşekkür ederler.

Kaynakça

[1] Yari, K., Akbari, I., Yazdi, S.A.V. 2020. Development and Evaluation of Sodium Alginate-Basil Seeds Mucilage Beads as A Suitable Carrier for Controlled Release of Metformin. International Journal of Biological Macromollecul, 5(2020) ,159, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.11

[2] Ceylan, S. 2021. PVA/Kitosan Biyomalzemelerin İlaç Salım Mekanizmasında Çapraz Bağlayıcı Etkisinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(3), (2021), 422-430 https://orcid.org/0000-0002-1088-7886

[3] Mahmuti, N. 2011. Türkiye Cumhuriyeti İlaç pazarında mevcut olmayan metformin içeren uzun etkili oral dozaj şekillerinin hazırlanması üzerine çalışmalar. İstanbul Üniversitesi, Yüksek lisans Tezi, 74s, İstanbul.

[4] Sauriasari, R., Syawalia, F., Azizahwati, A. 2022. Effect of Metformin and Metformin-Sulfonylurea on Lipid Profile of Type 2 Diabetes Mellitus patients: A Cross-Sectional Study. İstanbul Journal of Pharmacy, 52(2) (2022), 114-120. https://doi.org/10.26650/IstanbulJPharm.2022.957738

[5] Turan, İ., Erdem, S., Ergenc, M., Özaçmak, H.S. 2022. The Effects of 1,1-dimethylbiguanide Hydrochloride (Metformin) on Detrusor Muscle Contractile Response in Ovariectomized Female Rats. Turkish Journal of Diabet and Obesite, 2 (2022), 97-103. https://doi.org/10.25048/tudod.1066739

[6] Bailey, C.J. 2017. Metformin: Historical Overview. Diabetologia, 60(2017), 1566–1576. https://doi.org/10.1007/s00125-017-4318-z

[7] Erek, A., Aktaş, S.B., Özdemir, Y., Ak, G. 2021. Alginate/Chitosan Nanoparticles for Adsorption and Controlled Release of Pemetrexed. Erzincan University Journal of Science and Technology. 14(3)(2021), 1066-1076. https://doi.org/10.18185/erzifbed.1000206

[8] Tezcan, F. 2008. Aljinat / kil biyopolimer nanokompozit filmlerin eldesi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 53s, İstanbul.

[9] Gökbulut, İ., Öztürk, F. S. 2018. Gıda Mikrokapsülasyonunda Aljinat Kullanımı, Batman Üniversitesi, Yaşam Bilimleri Dergisi, 8(1/2), (2018), 16-28.

[10] Akay, E., Yılmaz, İ., Eyioğlu, U. 2023. Sumak *(Rhus coriaria L.*) Bitkisinin Fitoterapide Kullanımı ve Gastronomik Değeri. Journal of Academic Tourism Studies, 4(1), (2023), 56-65. http://dx.doi.org/10.29228/jatos.69344

[11] Saltan, F. Z, Ünder, D. 2019. Sumak ve Önemli Biyolojik Etkileri. Çukurova Tarım Gıda Bilimleri Dergisi, 34(1) (2019), 69-78.

[12] Karadaş, Ö., Yılmaz, İ., Geçgel, Ü. 2020. Sumak (*Rhus coriaria L.*) Meyvesinin Fizikokimyasal Özellikleri. Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(2) (2020), 87-94.

[13] Doğan, A., Çelik, İ., 2016. Healing Effects of Sumac (*Rhus coriaria*) in Streptozotocin-Induced Diabetic Rats, Pharmaceutical Biology. 54,10(2016), 2092-2102. https://doi.org/10.3109/13880209.2016.1145702

[14] Mirhadi, K., Daryoush, B., Saeid, S. 2011. Orally Administration Effect of Sumac on Blood Sugar in Rat. Journal of Advance in Environmental Biology, 5 (2011), 2077-2079.

[15] Hayta, E. 2014. Polikaprolakton – Polietilen Glikol - Kitosan bazlı mikro-kürecik üretimi ve kontrollü ilaç salımında kullanılması için ön çalışma. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 67s, İstanbul.

[16] Bayındır, Z. S., Yüksel, N., 2007. PEGylation: Preparatıon and Application of PEG Conjugates. Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University, 36 (4)(2007), 249-266. https://doi.org/10.1501/Eczfak_0000000540

[17] Özsağıroğlu, E. 2015. Püskürtmeli kurutucu ile biyokompozitlerin hazırlanması ve ilaç taşınım sistemlerinde kullanımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 113s, İstanbul.

[18] Rumondor, A. C., Taylor, L. S. 2009. Effect of Polymer Hygroscopicity on the Phase Behavior of Amorphous Solid Dispersions in the Presence of Moisture. Molecular Pharmaceutics, 7(2009), 477-4930. https://doi.org/10.1021/mp9002283

[19] Uşan, H. 2023. Aljinat, zencefil /zerdeçal, PEG/PVA içerikli kompozit mikro-kürelerin Sefaklor salımında kullanımı. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyokimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Sivas.

[20] Albayrak, İ. 2011. Poli(vinil) alkol esaslı nanokompozitler ve uygulamaları. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 88s, İstanbul.

[21] Türkyılmaz, A. 2013. Yeni İlaç Salım Sistemlerinin Geliştirilmesi. İlaç Kimyası Üretimi ve Teknolojisi Standardizasyonu Kongresi, Kimyagerler Derneği, 29-31 Mart 2013, Antalya, 1-8.

[22] Kumar, S., Bhanjana, G., Verma, R.K., Dhingra , D., Dilbaghi , N., Kim, K.H. 2017. Metformin-Loaded Alginate Nanoparticles as an Effective Antidiabetic Agent for Controlled Drug Release. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 69(2) (2017), 143-150. https://doi.org/10.1111/jphp.12672

[23] Martigenez –Gomez, F., Guerrero, J., Matsuhiro, B., Pavez, J., 2017. In vitro release of Metformin Hydrochloride from Sodium Alginate /Polyvinly Alcohol Hydrogels. Carbohydrate Polymers, 155 (2017), 182-191. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.079

[24] Hariyadi, D.M., Pathak, Y., Hendradı, E., Erawati, T., Hıdayah, I., Santos E., 2020. Formulation Metformin-Loaded Alginate Microspheres by Ionotropic Gelation-Aerosolization Technique. Sains Malaysiana, 49 (10), (2020), 2513-2525. http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2020-4910-17

[25] Khalid, S., Abbas, G., Hanif, M., Shah, S., Shah S.N.H., Jalil, A., Yaqoob, M., Ameer, N., Anum, A. 2020. Thiolated Sodium Alginate Conjugates for Mucoadhesive and Controlled Release Behavior of Metformin Microspheres, International Journal of Biological Macromolecules, 164 (2020), 2691–2700.

[26] Mokhtare, B., Çetin, M., Özakar, R.S., Bayrakceken, H. 2015. Metformin HCl yüklü kitosan mikro-kürelerinin hazırlanması ve *in vitro* karakterizasyon çalışmaları. Hacettepe Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi Dergisi, 1(2015), 74-86.

[27] Daemi, H., Barikani, M. 2012. Synthesis and characterization of calcium alginate nanoparticles, sodium homopolymannuronate salt and its calcium nanoparticles. Scientia Iranica, 19(6), (2012), 2023–2028.

[28] Semerci, B. 2019. Biyobozunur polimer/polisakkarit kompozitleri ile Sefaklor salımı. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyokimya Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi, 127s, Sivas.

[29] Anaee, R.A., Abdulahh, H.A., Tareq, M.A. 2016. Sumac (*Rhus*) extract as green inhibitor for steel in seawater, International Journal of Scientific Research In Science, Engineering And Technology. 2(2016), 353-358. https://www.researchgate.net/publication/294871779

[30] Ahmad, M.S., Liu, H., Alhumade, H., Tahir, M.H., Çakman, G., Yıldız, A., Ceylan, S., Elkamel, A., Shen B. 2020. A modified DAEM: To study the bioenergy potential of invasive Staghorn Sumac through pyrolysis, ANN, TGA, kinetic modeling, FTIR and GC–MS analysis, Energy Conversion and Management, 221, (2020), 113173. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113173

[31] Yağcı, B.S. 2018. Biyobozunur poliüretan bazlı sert doku destek malzemelerin geliştirilmesi. Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Eczacılık Temel Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Ankara.

[32] Yahoum, M.M..,Toumi, S., Tahraoui, H., Lefnaoui, S., Kebir, M., Amrane, A., Assadi, A.A., Zhang, J.,Mouni, L. 2023. Formulation and evaluation of xanthan gum microspheres for the sustained release of metformin hydrochloride, Micromachines (2023), 14, 609. https://doi.org/10.3390/mi14030609

[33] Polu, A.R., Kumar, R. 2011. Impedance spectroscopy and FTIR studies of PEG- based polymer electrolytes. E-Journal of Chemistry, 8(1), (2011), 347-353. https://doi.org/10.1155/2011/628790

[34] Khairuddin., Pramono, E., Utomo, S.B., Wulandari, V., Zahrotul, W A., Clegg F. 2016. FTIR studies on the effect of concentration of polyethylene glycol on polimerization of Shellac, Journal of Physics: Conference Series 776 (2016), 012053. doi:10.1088/1742-6596/776/1/012053

[35] Charmi, J., Nosrati, H., Mostafavi Amjad, J., Mohammadkhani, R., Danafar H. 2019. Polyethylene glycol (PEG) decorated graphene oxide nanosheets for controlled release curcumin delivery. 10(2019), 5(4). doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01466

[36] Alhosseini, N., Moztarzadeh, F., Masoud, M., Asgari., Dodel., Samadikuchaksaraei., Kargozar., Jalali. 2012. Synthesis and characterization of electrospun polyvinyl alcohol nanofibrous scaffolds modified by blending with chitosan for neural tissue engineering. Int J Nanomedicine,7(2012),25-34. https://doi.org/10.2147/IJN.S25376

[37] Jipa, I.M., Stoica, A., Stroescu, A., Dobre , L.M., Dobre, T., Jinga, S., Tardei, C. 2012. Potassium sorbate release from poly (vinyl alcohol)–bacterial cellulose films, Chemical Papers, 66(2)(2012), 138–143. https://doi.org/10.2478/s11696-011-0068-4

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Çevre Kirliliği Artışının Azaltılması için Geri Dönüşüm Noktalarının Çok Boyutlu K-ortalamalar Algoritması ile Belirlenmesi

Ertuğrul Gül[2] , Murat Taşyürek*[1]

*[1] Kayseri Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri
[2] Kayseri Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kayseri

(Alınış / Received: 07.11.2024, Kabul / Accepted: 21.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Geri dönüşüm,
K-ortalamalar,
Çok boyutlu,
Çevre kirliliği

Öz: Son yıllarda, insan kaynaklı atıkların geri dönüştürülerek kazanç sağlanması ve dolaylı olarak çevre kirliliği artışının azaltılması önemli bir problem haline gelmiştir. Geri dönüşüm için popüler uygulamalardan bir tanesi geri dönüşüm noktalarının belirlenerek insanların geri dönüşebilecek atıklarını bu noktalara bırakmalarını teşvik etmektir. Ancak bu noktaların insanların erişiminin kolay olacak şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada bina konumları ve binalarda bulunan hane sayıları da dikkate alınarak en optimum geri dönüşüm noktaları çok boyutlu K-ortalamalar algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda daha önce manuel belirlenen geri dönüşüm noktalarına nazaran önerilen yöntem ile belirlenen noktalara erişimin daha kolay olduğu görülmüştür. Dahası önerilen yöntemden, hane sayısını dikkate almayarak geri dönüşüm noktalarını belirleyen K-ortalamalar algoritmasına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntem ile belirlenen geri dönüşüm noktaları, manuel olarak belirlenen noktalardan ve K-ortalamalar algoritması ile belirlenen noktalardan ortalama Öklid mesafesi metriğinde sırasıyla 0,0527 ve 6,9576 daha azdır. Ayrıca önerilen yöntem en uzak mesafe metriğinde 43,4813 değeri ile en düşük mesafe değerine sahiptir.

Determination of Recycling Points to Reduce Environmental Pollution Increase Using the Multidimensional K-Means Algorithm

Keywords
Recycle,
K-means,
Multidimensional,
Environmental pollution

Abstract: In recent years, it has become an important problem to recycle man-made wastes to generate profit and indirectly reduce the increase in environmental pollution. One of the popular practices for recycling is to determine recycling points and encourage people to leave their recyclable waste at these points. However, it is very important that these points are easily accessible to people. In this study, the optimum recycling points are determined using the multidimensional K-means algorithm, taking into account the building locations and the number of households in the buildings. As a result of the experiments, it has been observed that it is easier to access the points determined by the proposed method compared to the recycling points determined manually. Moreover, better results were obtained from the proposed method compared to the K-means algorithm that determines the recycling points by ignoring the number of households. The recycling points determined by the proposed method are 0.0527 and 6.9576 less than the manually determined points and the points determined by the K-means algorithm in the average Euclidean distance metric, respectively. In addition, the proposed method has the lowest distance value with a value of 43.4813 in the farthest distance metric.

*İlgili Yazar, email: murattasyurek@kayseri.edu.tr

1. Giriş

Son on yıldaki, kentleşme ve sanayileşmedeki benzeri görülmemiş artış nedeniyle, plastikler gibi birçok madde insanlığın yararı için yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. İnsanların kullanımı için üretilen birçok eşya, madde ve besinler kullanıldıktan sonra toprağa, suya ve okyanusa bırakılmaktadır. Maliyet ve sonuçlarına bakılmaksızın çevreye bırakılan insan kaynaklı istenmeyen atıklar, insan sağlığı ve gezegen sağlığı için varoluşsal bir tehdittir ve modern toplumların sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır [2].

Çevre kirliliğini azaltmanın en önemli ve gerekli yollarından biri insan kaynaklı atıkların geri dönüştürülerek tekrardan kullanılması işlemidir. Geri dönüşüm olarak adlandırılan bu işlem hem çevre kirliliğini azaltılırken hem de insan kaynaklı atıkların dönüştürülerek tekrardan kullanılması ile ekonomik olarak kazanç sağlamaktadır. Bu yüzden geri dönüşüm konusunda halkın bilinçlendirilmesi ve kullanıma teşvik edilmesi gerekmektedir.

İnsanların atıklarını geri dönüşüm noktalarına bırakmalarını teşvik etmek için insanların bu noktalara ulaşımlarının kolaylaştırılması gerekmektedir. Belediyeler geri dönüşüm noktaları belirleyerek bu noktalara geri dönüşüm konteynırları koymaktadır. Ancak belirli insan kümesine hizmet verecek bu merkezler genellikle manuel olarak belirlenmektedir. Geri dönüşüm noktalarının konumları geri dönüşüm konteynırlarının verimli olarak kullanılmasını etkilemektedir. Bu konumlar insanların geri dönüşüm konteynırlarını kullanma oranını artırmak ve insanların bu konteynırlara ulaşımlarını kolaylaştırmak için en verimli şekilde ayarlanmalıdır. Bu işlem için veri madenciliği yöntemleri ile küme merkezlerinin bulunması ve bulunan bu merkezlerin geri dönüşüm noktaları olarak belirlenmesi geri dönüşüm noktalarının kullanılma oranını artıracaktır.

Geri dönüşüm noktaları olarak küme merkezlerinin belirlenmesi için nüfus verilerini ve geri dönüşüm noktalarına ulaşmak için katedilmesi gereken mesafeyi dikkate alan bir yaklaşım kullanılması gerekmektedir. Geri dönüşüm noktaları belirlenirken genellikle geri dönüşüm noktalarına koyulacak konteynır sayıları önceden belirlenmiş olduğu için geri dönüşüm noktalarının sayısı belirlidir. Küme merkezi sayısı belirli olan bu tür kümeleme problemleri için kullanılan veri madenciliği yöntemlerinin başında K-ortalamalar (K-means) algoritması gelmektedir. K-ortalamalar algoritması, yıllardır kullanılmasına rağmen, basit prensibi, kullanım kolaylığı ve yüksek verimliliği gibi özellikleri nedeniyle hâlâ birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir [3]. Ay ve arkadaşları, bazı küme merkezlerini sabit tutarken diğer noktalar için en uygun küme merkezlerini elde etmeye ve verilerin kümelere en iyi şekilde dağıtılmasını sağlamaya çalışmak için K-ortalamalar algoritmasını kullanmışlardır [4]. Jeong ve arkadaşları K-ortalamalar algoritmasını kullanarak dikey kalkış ve iniş terminallerinin konumlarını Seul metropol bölgesinde kentsel hava hareketliliğini (UAM) işletmek için belirlemişlerdir [5]. Zhang ve arkadaşları ise K-ortalamalar algoritması kullanarak küresel deniz kazalarını kümeleyip analiz etmişlerdir [6]. Niemsakul ve arkadaşları Tayland'daki hastaneler için merkezi depolama ve dağıtım merkezleri olarak hizmet edebilecek potansiyel konum merkezlerini belirlemek için hastane konum verilerini ve K-ortalamalar algoritmasını kullanmışlardır [7].

K-ortalamalar algoritması enlem boylam gibi mesafe verilerinin yanı sıra farklı özelliklerin de kümelemede etkili olduğu problemler için de kullanılmaktadır. Karo ve arkadaşları orman yangını lokasyonlarını kümelemek için K-ortalamalar algoritmasını dokuz önemli değişken kullanarak gerçekleştirmişlerdir [8]. Rini ve arkadaşları deprem kümelerini belirlemek için K-ortalamalar yöntemini kullanmışlardır. Kümeleme için kullanılan veriler, enlem, boylam, büyüklük ve derinlik dahil olmak üzere 1970'ten 2019'a kadar Bengkulu Eyaleti ve çevresindeki bölgelerde meydana gelen deprem olaylarına ilişkin verilerdir [9]. Puthige ve arkadaşları tehlike endeksi hesaplaması ve K-ortalamalar kümelemesi yoluyla girilen iki coğrafi konum arasındaki en güvenli rotayı belirlemeyi önermişlerdir [10]. Shao ve arkadaşları Kaggle'dan elde ettikleri Ozon'un 2018 yılındaki küresel değişim eğiliminin sınıflandırmasını K-ortalamalar kümeleme algoritması kullanarak gerçekleştirmişlerdir [11].

Bu çalışmada, hane sayısı ve çok boyutlu K-ortalamalar algoritması kullanılarak Kocasinan ilçesi için geri dönüşüm noktalarının dengeli bir şekilde yerleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kocasinan ilçesine ait binalardaki hane sayısı verileri, çok boyutlu K-ortalamalar algoritmasında küme merkezinin küme üyelerine uzaklıklarının yanı sıra üçüncü bir özellik olarak eklenmiştir. Nüfus bazlı bir kümeleme daha doğru olmasına rağmen bina bazlı nüfus verilerine erişim kişisel bilgileri koruma kanunundan dolayı mümkün değildir. Bu yüzden bina nüfus sayısı yerine binalardaki hane sayıları dikkate alınmıştır. Bu sayede küme merkezleri belirlenirken daha fazla insanın olduğu bölümler dikkate alınarak geri dönüşüm noktası belirlenmektedir ve daha fazla insana daha verimli bir hizmet verilebilmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde önerilen yöntem ile belirlenen geri dönüşüm noktaları, manuel olarak belirlenen ve hane sayısının dikkate alınmayarak kullanılan K-ortalamalar algoritması ile belirlenen geri dönüşüm noktaları ile kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda, önerilen yöntem ile belirlenen küme merkez konumlarının optimum geri dönüşüm noktası olarak hizmet etmesinin, noktaların manuel olarak belirlenmesinden ya da hane sayısı dikkate alınmadan gerçekleştirilen kümeleme yöntemine göre belirlenmesinden daha başarılı olduğu görülmüştür.

Makalenin geri kalan bölümü şu şekilde organize edilmektedir: Bölüm 2'de ön bilgiler ve yöntem; Bölüm 3'te deneysel sonuçlar; Bölüm 4'te ise tartışma ve sonuç verilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölüm ön bilgiler ve yöntemler olmak üzere iki ana alt başlıktan oluşmaktadır. Ön bilgiler bölümünde çalışmada kullanılan veri setleri ve kümeleme algoritması olarak kullanılan K-ortalamalar algoritması açıklanmaktadır. Yöntemler bölümünde ise, öncelikle geri dönüşüm noktalarının manuel olarak belirlenmesinin yol açtığı problemden bahsedilmektedir. Ardından, bağımsız bölüm sayısını ve çok boyutlu K-ortalamalar algoritmasını kullanan önerilen yöntemden bahsedilmektedir.

2.1. Ön Bilgiler

Bu bölümün 2.1.1 ve 2.1.2 alt bölümlerinde sırasıyla çalışmada kullanılan veri setleri ve çalışmada kullanılan K-ortalamalar algoritması hakkında ön bilgi verilmektedir.

2.1.1. Veri Seti

Bu çalışmada iki veri seti kullanılmıştır. Birinci veri seti Kocasinan Belediyesi tarafından yerleştirilen konteynırların konum bilgileri içermektedir. Veri seti ULASAV [12], Ulusal Akıllı Şehir Açık Veri Platformu, üzerinden temin edilmiştir. Söz konusu veri seti yalnızca konteynerlerin konum bilgilerini içermekte olup Kocasinan ilçesi sınırları içerisindeki alanları kapsamaktadır. Konteynerlerin kullanımı, ilçe sakinlerinin erişimini ve katılımını artırmak amacıyla planlanmıştır. İkinci veri seti ise Kocasinan Belediyesi'ndeki ilgili bina ve bağımsız bölüm bilgileri içermekte olan Mekânsal Adres Kayıt Sistemi [13]'nden temin edilmiştir.

2.1.2. K-ortalamalar Algoritması

MacQueen [14] tarafından önerilen K-ortalamalar kümelemesi, bir veri kümesini otomatik olarak k adet gruba ayırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [15]. Algoritmada belirtilen k değeri, algoritma başlamadan önce belirlenen küme sayısını temsil etmektedir. K-ortalamalar yönteminin amacı, farklı kümeler arasındaki benzerliği en aza indirirken her bir küme içindeki benzerliği en üst düzeye çıkarmaktır. Yöntem k adet rastgele merkez noktası ile başlatılır. Her veri noktası kendisine en yakın veri noktasına atanır. Her bir merkez noktası merkeze atanan noktaların ortalamasına taşınır. Bu işlemler merkezler artık değişmeyene kadar tekrarlanır. Sonuç olarak, yöntem tam olarak k farklı kümeyi optimum şekilde oluşturur. K-ortalamalar algoritmasında en yaygın kullanılan mesafe fonksiyonu Öklid mesafe fonksiyonudur ve iki nokta arasındaki mesafe Eşitlik 1 ile hesaplanır. Denklemde x ve y noktanın enlem ve boylamını temsil eder.

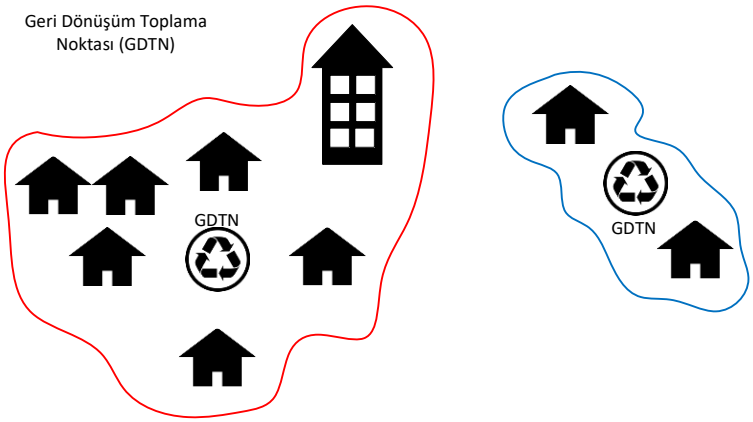
$$\text{Öklid mesafesi} = \sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)} \quad (1)$$

2.2. Problem ve Yöntem

Bu bölümde üzerinde çalışılan geri dönüşüm noktalarının manuel olarak belirlenmesinden kaynaklanan problem ve ilçe içerisindeki her haneye hizmet verebilecek en optimum geri dönüşüm noktasını belirleyen yöntemden bahsedilmektedir.

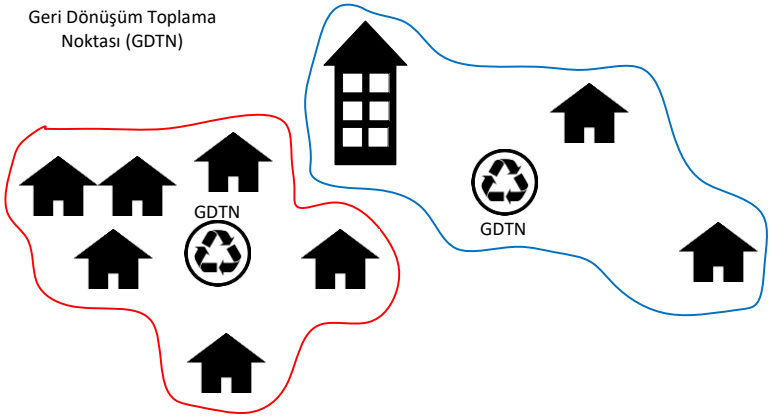
2.2.1. Problem

Kocasinan belediyesi mücavir alan sınırları içerisine yerleştireceği konteynırların konumlarını yerleşim yerlerini göz önünde bulundurarak belirlemesine rağmen bu konumlar manuel olarak belirlendiği için maksimum verim alınamayacağı öngörülmüştür. Belirlenen konteynır konumlarını küme merkezi ve bu konumdaki konteynırları kullanacak bireylerin barındıkları binalardaki haneleri ise küme elemanları olarak düşünürsek hanelerin en yakın küme merkezlerine olan uzaklıkları konteynır konumlarının yerleşim başarısını verebilmektedir. Manuel olarak küme merkezinin belirlenmesi ve binalardaki hane sayısının dikkate alınmaması durumunda düzgün bir dağılım gerçekleşememektedir.



Şekil 1. Belirlenen geri dönüşüm toplama noktalarının konumlarının düzensiz olması

Şekil 1'de düzgün dağılımı olmayan bir kümeleme örneği gösterilmektedir. Bu örnekten yola çıkarak iki küme merkezi seçilmiş olup bu küme merkezlerinin bir tanesi 7 binaya (7'den fazla haneye) hizmet ederken ikinci küme merkezi yalnızca iki haneye hizmet etmektedir. Ancak, bu küme merkezlerinin seçimi hane sayısı ve hanelerin küme merkezlerine olan uzaklıkları dikkate alınarak yapılırsa, ikinci küme merkezi birinci kümedeki bazı hanelere daha yakın bir konumda yerleştirilebilir. Bu sayede hem konteyner başına düşen hane sayısı dengelenir hem de hanelerin konteynerlere ulaşmak için katetmeleri gereken mesafe azalır. Şekil 2'de hane sayısı dikkate alınarak gerçekleştirilen bir kümeleme örneğini görebilirsiniz.



Şekil 2. Hane sayıları dikkate alınarak belirlenen geri dönüşüm noktalarının konumlarının belirlenmesi

2.2.1. Önerilen Yöntem

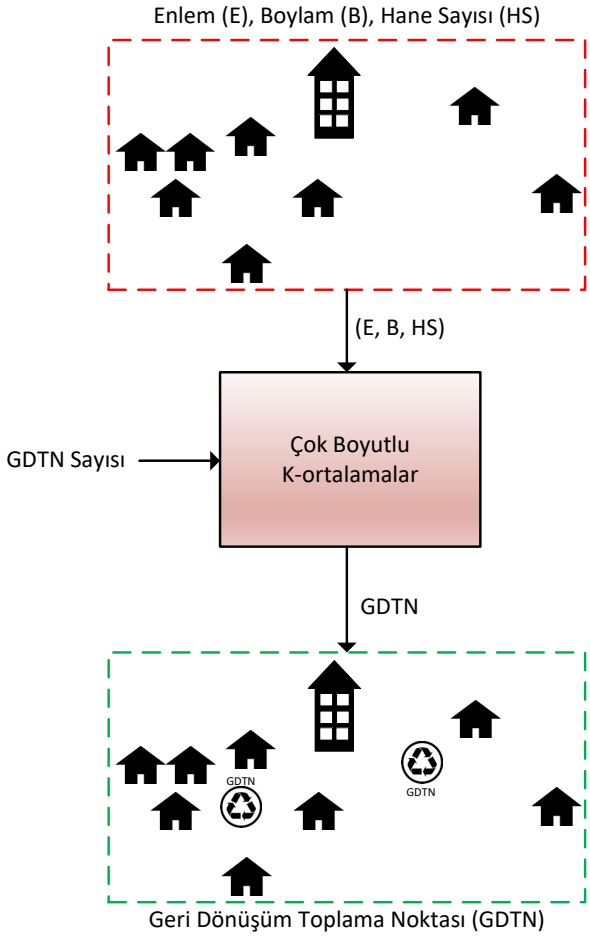
Geri dönüşüm noktalarının belirlenmesi probleminde, yalnızca bina konumları dikkate alınarak yapılan kümeleme işleminde elde edilecek sonuçlar, bina içerisindeki hane sayıları göz önünde bulundurulmadığı için yeterli olmayacaktır. Şekil 2'de görüldüğü üzere daha çok insana daha iyi bir hizmet verecek geri dönüşüm noktaların belirlenmesi için hane sayısının dikkate alınması gerekmektedir. Kümeleme işlemiyle belirlenen küme merkezlerinin geri dönüşüm noktası olarak kullanılacağı bu problemde, standart K-ortalamalar algoritmasının yetersiz kalacağı düşünülmektedir.

Önerilen yöntemde hane bazlı bir hizmet sunulması için en uygun geri dönüşüm noktaları çok boyutlu K-ortalamalar algoritması kullanılarak belirlenmektedir. Önerilen çok boyutlu K-ortalamalar algoritması binaların enlem ve boylam verilerinin yanı sıra her binada bulunan hane sayısını da dikkate alacak şekilde uygulanmıştır. Algoritma içerisinde binaların küme merkezlerine olan uzaklıkları Eşitlik 2'de verilen denklem ile hesaplanmaktadır. Denklem içerisinde binada bulunan hane sayısı denkleme klasik Öklid uzaklığına çarpım olarak dahil edilmiştir.

$$\text{Öklid mesafesi} = hs_i \cdot \sqrt{((e_i - e_c)^2 + (b_i - b_c)^2} \qquad (2)$$

burada c kümenin merkezi ve i kümeye dahil olan veya olacak bir nokta, e, b, ve hs sırasıyla enlem, boylamı ve hane sayısını temsil etmektedir

Geri dönüşüm toplama noktalarının çok boyutlu K-ortalamalar ile bulunması yönteminin blok diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere binaların enlem, boylam ve binalarda bulunan hane sayısı metrikleri çoklu K-ortalamalar algoritmasına girdi olarak verilmektedir. Bina verilerinin yanı sıra, planlanan geri dönüşüm noktası sayısı, K-ortalamalar algoritmasının bir diğer bileşeni olan küme sayısı olarak algoritmaya girdi olarak verilmektedir. Algoritmanın çıktı verisi olarak ise küme merkez noktaları elde edilmektedir ve bu küme merkezleri problem çözümü olarak kullanılacak geri dönüşüm noktalarıdır.



Şekil 3. Geri Dönüşüm Toplama Noktalarının Önerilen Çok Boyutlu K-ortalamalar ile Bulunması

3. Bulgular

Bu bölümde Kocasinan Belediyesindeki yerleşim yerlerine yerleştirilecek en optimum geri dönüşüm noktalarının belirlenmesi için önerilen yöntemin deneysel sonuçları verilmektedir. Önerilen yöntemde binaların küme merkezlerine olan uzaklıklarının yanı sıra binaların içerisinde bulunan hane sayıları da dikkate alınarak daha uygun bir küme merkezi belirleme gerçekleştirilmiştir. Binaların içerisinde yaşayan insan sayıları kişisel bilgilerin gizliliği sebebi ile paylaşılamadığından binalarda bulunan hane sayısı metriği dikkate alınmıştır. Önerilen yöntemin, hane sayısının dikkate alınmadığı K-ortalamalar algoritmasının ve halihazırda belediye tarafından manuel olarak belirlemiş geri dönüşüm noktalarının başarımları toplam mesafe, en uzak mesafe, en yakın mesafe, ortalama mesafe, maksimum ve minimum hane sayısı, merkez başına düşen hane sayısının standart sapması ve mesafelerin standart sapması olmak üzere sekiz farklı metrik ile gösterilmiştir. Maksimum hane sayısı, minimum hane sayısı, binaların toplam Öklid mesafesi, en uzak binanın Öklid mesafesi, en yakın binanın Öklid mesafesi, binaların ortalama Öklid mesafeleri, binaların Öklid mesafelerinin standart sapması ve kümelerdeki hane sayılarının standart sapması metrikleri sırasıyla Eşitlik 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'da verilmektedir. Kullanılan metriklerdeki uzaklıklar Öklid mesafeleridir.

$$Maksimum\ Hane\ Sayısı = Maksimum(hs_1, hs_2, \dots, hs_N) \tag{3}$$

$$Minimum\ Hane\ Sayısı = Minimum(hs_1, hs_2, \dots, hs_N) \tag{4}$$

$$Toplam\ Mesafe = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{K} b_{i,j} \tag{5}$$

$$En\ Uzak\ Mesafe\ =\ Maksimum\left(b_{1,1}, \dots, b_{N,K}\ \right) \tag{6}$$

$$En\ Yakın\ Mesafe = Minimum(b_{1,1}, \dots, b_{N,K}\ ) \tag{7}$$

$$Ortalama\ Mesafe =\ mb_{ort}\ =\ \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{K} b_{i,j}}{Tbs} \tag{8}$$

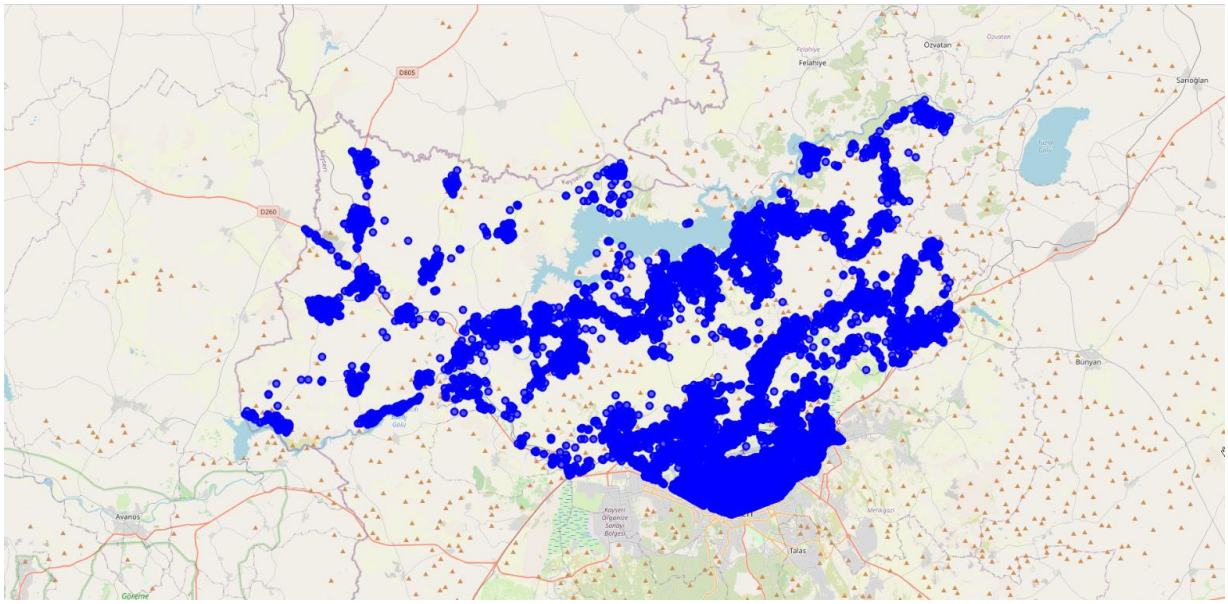
$$Mesafelerin\ Standart\ Sapması = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{K}(b_{i,j} - mb_{ort})^2}{Tbs}} \tag{9}$$

$$Hane\ Sayılarının\ Standart\ Sapması = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(hs_i - \overline{hs})^2}{N}} \tag{10}$$

burada hs_i i. kümede bulunan hane sayısını, N toplam küme sayısını, $b_{i,j}$ i. kümedeki j. binanın Öklid mesafesini, K i. kümedeki bina sayısını, Tbs toplam bina sayısını, mb_{ort} binaların ortalama Öklid mesafesini, ve $\overline{hs}$ küme başına düşen ortalama hane sayısını ifade etmektedir. $\overline{hs}$ Eşitlik 11 kullanılarak hesaplanmaktadır.

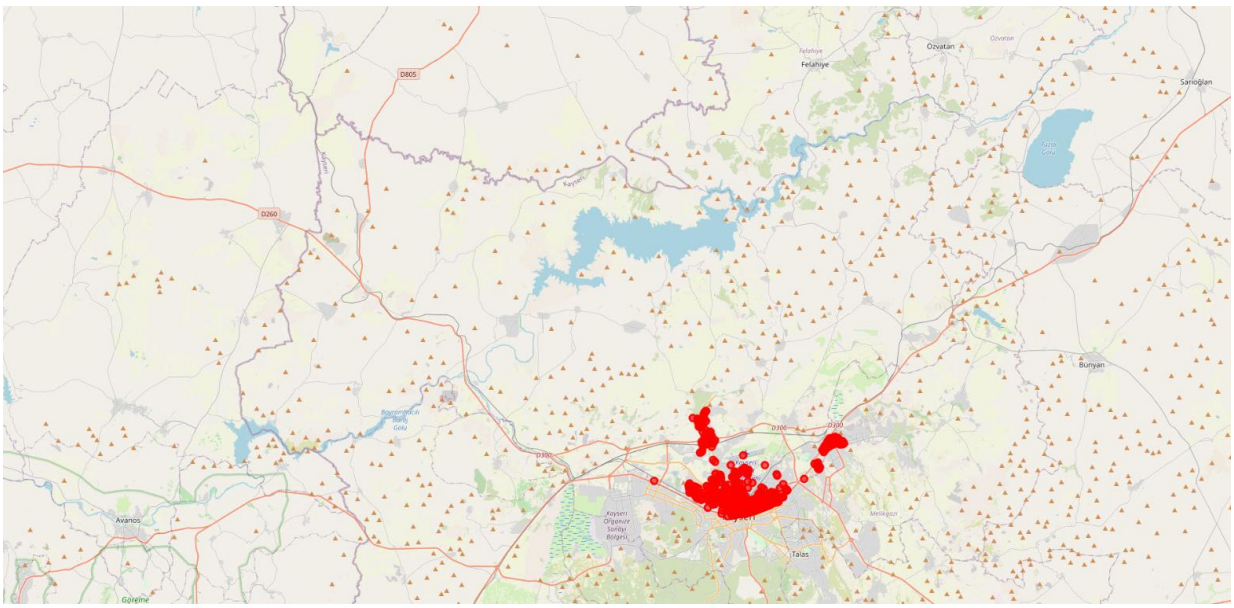
$$\overline{hs} = \frac{\sum_{i=1}^{N} hs_i}{N} \tag{11}$$

Deneyler için kullanılan binaların enlem, boylam ve hane sayısı bilgileri Mekânsal Adres Kayıt Sistemi sisteminden elde edilmiştir. Binaların konumlarının harita üzerindeki gösterimi Şekil 4'te gösterilmektedir.



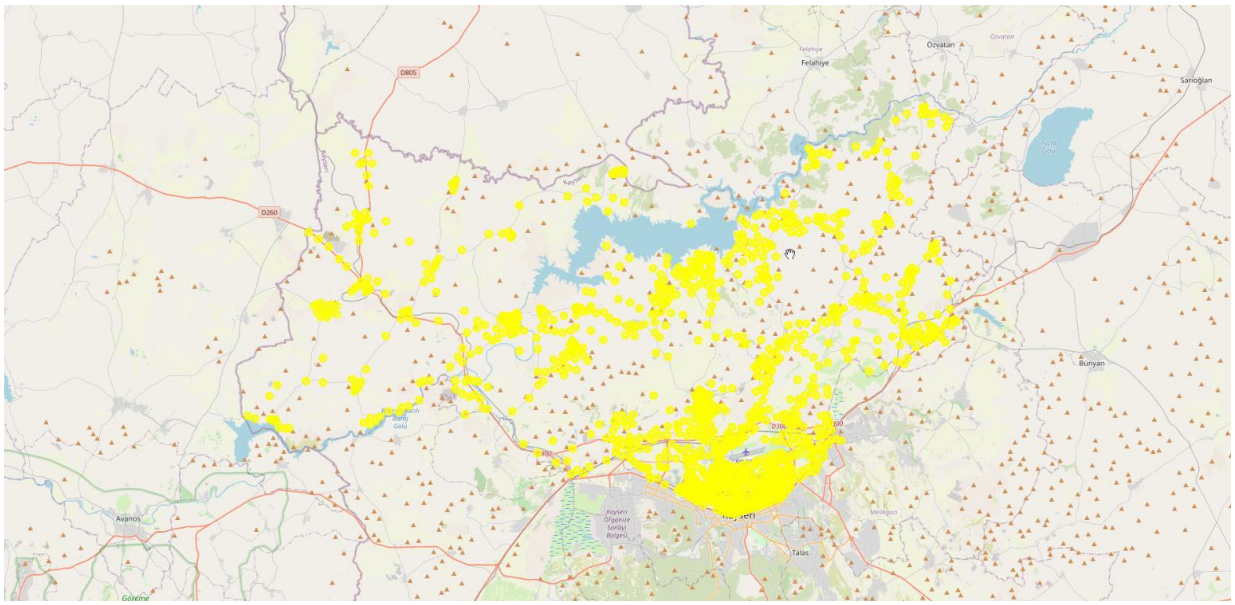
Şekil 4. Bina Konumları

Geri dönüşüm noktalarının sayısı, enlem ve boylam verileri ise Kocasinan Belediyesi tarafından belirlenen geri dönüşüm noktalarının konum bilgilerini içeren ve Ulusal Akıllı Şehir Açık Veri Platformu üzerinden paylaşılan birinci veri setinden temin edilmiştir. Belediye tarafından belirlenen geri dönüşüm noktalarının harita üzerindeki gösterimini Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 4 ve 5'ten görüldüğü üzere bina konumları ilçe üzerinde farklı konumlara dağılmış iken belediyenin belirlemiş olduğu konumlar yalnızca belirli bir bölgeye hizmet edecek şekilde yerleştirilmiştir.



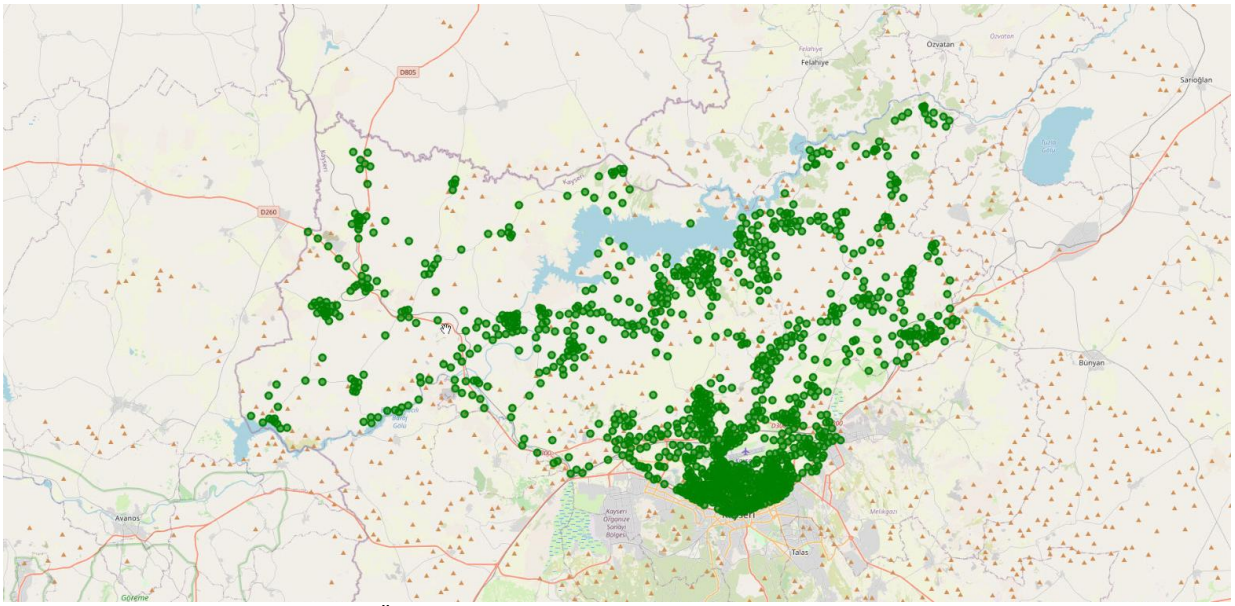
Şekil 5. Belediye Tarafından Belirlenen Geri Dönüşüm Noktaları

Geri dönüşüm noktalarının belirlenmesi için önerilen Çok boyutlu K-ortalamalar algoritması ve standart K-ortalamalar algoritması için kullanılan *k* değeri belediye tarafından belirlenen geri dönüşüm noktası sayısı olan "1249" olarak belirlenerek deney gerçekleştirilmiştir. Standart K-ortalamalar algoritması ile belirlenen geri dönüşüm noktalarının harita üzerindeki dağılımı Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu algoritmada binaların sadece konum bilgileri kullanılarak kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 6'dan görüleceği üzere K-ortalamalar algoritması bina konum yerleşimlerini dikkate alarak geri dönüşüm noktalarının konumlarını belirlemiştir.



Şekil 6. K-ortalamalar Algoritması ile Belirlenen Geri Dönüşüm Noktaları

Bina konum verilerinin yanı sıra binalardaki hane sayısını da dikkate alarak kümeleme işlemini gerçekleştirerek geri dönüşüm noktalarının konumlarını belirleyen Çok boyutlu K-ortalamalar algoritmasının sonuçlarının harita üzerindeki gösterimi Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'den görüleceği üzere belirlenen geri dönüşüm noktalarının dağılımı Şekil 4'te bulunan bina konumlarının dağılımına yakındır. Ancak belediyenin belirlediği geri dönüşüm konumları belirli bir bölge içinde kaldığı için birçok bölgeye hizmet etmekte güçlük çekecektir.



Şekil 7. Önerilen Yöntem ile Belirlenen Geri Dönüşüm Noktaları

Önerilen yöntem, hane sayısını dikkate almayan K-ortalamalar ve belediye tarafından belirlenen geri dönüşüm toplama noktaların hane sayısının dikkate alınmayarak hesaplandığı Öklid mesafesine göre hesaplanan başarım sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere hane sayısını dikkate almayan K-ortalamalar algoritması yalnızca bina konum verilerinin dikkate alındığı mesafe metrikleri kullanılarak hesaplanan mesafe sonuçlarında önerilen yöntem ve manuel olarak hesaplanan yaklaşımdan daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Klasik K-ortalamalar algoritması ile belirlenen geri dönüşüm noktaları metriklerde kullanılan aynı Öklid mesafesini kullandığı için daha başarılı olmuştur.

Tablo 1. Geri Dönüşüm Noktalarının Belirlenmesinde Yöntemlerin Bina Bazlı Başarı Sonuçları

	Önerilen	K-ortalamalar	Manuel
Toplam Mesafe	7078,5713	**6686,0658**	347078,1684
En Uzak Mesafe	1,3145	**1,2524**	39,0477
En Yakın Mesafe	**0**	**0**	0,0001
Ortalama Mesafe	0,1302	**0,1230**	6,3888
Mesafelerin Standart Sapması	**0,0823**	**0,0823**	9,4802

Tablo 2' de hane sayılarının kümelere dağılımı ile ilgili olan bir kümeye düşen maksimum hane sayısı, bir kümeye düşen minimum hane sayısı ve kümelerdeki hane sayısı metriklerinin sonuçları gösterilmektedir. Tablodan görüleceği üzere bir kümeye düşen maksimum hane sayısı 1804 olarak önerilen yöntemden elde dilmiştir. Bu sonuç, önerilen yöntem ile kümelerdeki hane sayısı dağılımının daha başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Ayrıca bu çıkarım kümelerdeki hane sayılarının standart sapması metriği ile desteklenmektedir. Elde edilen sonuçlarda, 253,1623 değeri ile en düşük standart sapma değeri önerilen yöntemle elde edilmiştir. Bir kümeye düşen minimum hane sayısı ise üç yöntemde de 1 elde edilmiştir ve bu durum yöntemlerin başarımlarının bazı kümeler için tatmin edici olmadığını göstermektedir.

Tablo 2. Hane Sayıların Kümelere Dağılımı

	Önerilen	K-ortalamalar	Manuel
Maksimum Hane Sayısı	**1804**	1831	7165
Minimum Hane Sayısı	**1**	**1**	**1**
Kümelerin Hane Sayılarının Standart Sapması	**253,1623**	267,0280	393,1014

Tablo 3'te geri dönüşüm noktalarının belirlenmesinde hane bazlı başarı sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlar Tablo 1'de hesaplanan mesafelerin aksine hane bilgisini dikkate alan Öklid mesafesi sonuçlarını göstermektedir. Tablodan görüldüğü üzere önerilen yöntemle belirlenen en uzak mesafe yaklaşık 43,4813 iken K-ortalamalar ile ve manuel olarak belirlenen en uzak mesafe sırasıyla 188,3775 ve 856,0938 değerlerindedir. Ortalama mesafe metriği sonuçlarına bakıldığında ise önerilen yöntem 0,4021 uzaklık değeri ile daha başarılı bir sonuç elde edilmiştir. Öte yandan en yakın geri dönüşüm merkezine olan toplam mesafe önerilen yöntemle 21848,2780 değeri ile K-ortalamalar algoritması ile belirlenmesinden 2863,3175 daha azdır. Sonuçlar, önerilen yöntemle her bir haneye sunulan hizmetin büyük oranda artırıldığını göstermektedir.

Tablo 3. Geri Dönüşüm Noktalarının Belirlenmesinde Yöntemlerin Hane Bazlı Başarı Sonuçları

	Önerilen	K-ortalamalar	Manuel
Toplam Mesafe	**21848,2780**	24711,5955	399823,6484
En Uzak Mesafe	**43,4813**	188,3775	856,0938
En Yakın Mesafe	**0**	**0**	0,0023
Ortalama Mesafe	**0,4021**	0,4548	7,3597
Mesafelerin Standart Sapması	**0,9960**	1,5366	12,2378

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, geri dönüşüm noktalarının kullanıcılara daha iyi hizmet edebilecek yakınlıkta belirlenerek geri dönüşüme katkı sağlanılması amaçlanmıştır. Geri dönüşüm noktaları, yalnızca binaların konum bilgileriyle değil, ayrıca binalarda bulunan hane sayıları da dikkate alınarak belirlenmiştir. Hane sayılarının da dikkate alınarak geri dönüşüm noktaların belirlenmesinde çok boyutlu K-ortalamalar algoritması kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar çok boyutlu K-ortalamalar algoritması ile belirlenen geri dönüşüm noktalarının hanelere olan uzaklıklarının manuel olarak belirlenen noktalardan daha az olduğunu göstermektedir. Önerilen yöntem ile en uzak mesafe 43,4813 ve ortalama mesafe ise 0,4021 olarak belirlenmiştir. Manuel olarak belirlenen geri dönüşüm noktalarından bu değerler sırasıyla 812,6125 ve 6,9576 daha az iken K-ortalamalar algoritmasından sırasıyla 144,8962 ve 0,0527 daha azdır. Bu sonuçlar önerilen yöntemin daha başarı olduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda dönüşüm noktaların yürüyüş mesafeleri göz önüne alınarak belirlenmesinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Dahası bu noktaların yalnızca yol kenarlarına gelebilecek şartı eklenmesi ile daha uygun bir çözüm üretebileceği ön görülmektedir. Ayrıca, geri dönüşüm noktası sayılarının belirli olmadığı problemlere yönelik çözümler üretilmesi de planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan geri dönüşüm noktası verisi, Kocasinan Belediyesi tarafından kamuya açık veri olarak sağlanan Geri Dönüşüm Toplama Noktaları verisinden (https://ulasav.csb.gov.tr/dataset/geri-donusum-toplama-noktalari) alınmıştır. Ayrıca bağımsız bölüm verisi, Kayseri Büyükşehir Belediyesi tarafından anonim olarak sağlanan ve herkese açık olan Bağımsız Bölüm Verileri (https://cbsapx.kayseri.bel.tr/apex/f?p=230:3::::::) kaynağından alınmıştır. Çalışmamızda sağladıkları açık veri katkılarından dolayı Kocasinan Belediyesi ve Kayseri Büyükşehir Belediyesi'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] Shukla, S., Pei, Y., Li, W. G., Pei, D. S. 2024. Toxicological Research on Nano and Microplastics in Environmental Pollution: Current Advances and Future Directions. Aquatic Toxicology, 106894.

[2] Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., ..., Yan, C. 2022. Pollution and health: a progress update. The Lancet Planetary Health, 6(6), e535-e547.

[3] Hu, H., Liu, J., Zhang, X., Fang, M. 2023. An effective and adaptable K-means algorithm for big data cluster analysis. Pattern Recognition, 139, 109404.

[4] Ay, M., Özbakır, L., Kulluk, S., Gülmez, B., Öztürk, G., & Özer, S. 2023. FC-Kmeans: Fixed-centered K-means algorithm. Expert Systems with Applications, 211, 118656.

[5] Jeong, J., So, M., Hwang, H. Y. 2021. Selection of vertiports using K-means algorithm and noise analyses for urban air mobility (UAM) in the Seoul metropolitan area. Applied Sciences, 11(12), 5729.

[6] Zhang, Y., Sun, X., Chen, J., Cheng, C. 2021. Spatial patterns and characteristics of global maritime accidents. Reliability Engineering & System Safety, 206, 107310.

[7] Niemsakul, J., Ransikarbum, K., Singkarin, D. 2022. Hospital-Location Classification and Analysis in the Healthcare Cold Chain using K-means Algorithm. In 2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), 27-28 October, Kuala Lumpur, Malaysia, 1-6, IEEE.

[8] Karo, I. M. K., Dewi, S., Mardiana, M., Ramadhani, F., Harliana, P. 2023. K-Means and K-Medoids Algorithm Comparison for Clustering Forest Fire Location in Indonesia. Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering), 10(1), 86-94.

[9] Rini, D. S., Sriliana, I., Novianti, P., Nugroho, S., Jana, P. 2021. Spherical K-Means method to determine earthquake clusters. In Journal of Physics: Conference Series, 1823(1), 012043.

[10] Puthige, I., Bansal, K., Bindra, C., Kapur, M., Singh, D., Mishra, V. K., ..., Mostafa, R. R. 2021. Safest route detection via danger index calculation and k-means clustering. Computers, Materials and Continua, 69(2), 2761-2777.

[11] Shao, K., Mei, G., Wu, Y. 2022. Investigating changes in global distribution of Ozone in 2018 using k-means clustering algorithm. Journal of Computational Mathematics and Data Science, 3, 100028.

[12] ULASAV, Ulusal Akıllı Şehir Açık Veri Platformu. https://ulasav.csb.gov.tr/dataset/geri-donusum-toplama-noktalari (Erişim Tarihi: 14.10.2024).

[13] Mekansal Adres Kayıt Sistemi. https://cbsapx.kayseri.bel.tr/apex/f?p=230:3:::::: (Erişim Tarihi: 14.10.2024).

[14] MacQueen, J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 21 June-18 July 1965 and 27 December-7 January 1966, California, USA, 1, 281‑297.

[15] Hartigan, J. A., Wong, M. A. 1979. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. Journal of the royal statistical society. series c (applied statistics), 28(1), 100-108.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Oil Spill Detection Using Sentinel-1 SAR Data

Abdurahman Yasin Yiğit[1] Halil İbrahim Şenol[*2]

[1] Mersin Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin
[*2] Harran Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

(Alınış / Received: 07.11.2024, Kabul / Accepted: 21.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Oil Spill Detection,
Sentinel-1,
Environmental Protection,
Disaster Management,
Synthetic Aperture Radar

Abstract: Oil spills present a substantial threat to marine ecosystems and coastal economies, necessitating efficient and accurate detection methods. Driven by the necessity for dependable monitoring in a variety of environmental conditions, this study utilizes Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) data and the Mask R-CNN deep learning model to detect and delineate oil spills. Sentinel-1 was selected for its capacity to acquire data irrespective of weather conditions or time of day, thereby ensuring consistent monitoring. The Mask R-CNN model was selected for its ability to perform precise, pixel-level segmentation, enabling accurate spill boundary detection. The model's performance was evaluated using a dataset comprising 381 Sentinel-1 images from diverse geographic and environmental contexts. The model demonstrated an overall accuracy of 80% for MV Wakashio and 81% for MK Princess Empress, with an Intersection over Union (IoU) of 76% and 74.8%, respectively. These results underscore the model's efficacy in discerning oil spills from false positives, such as algal blooms and sediment patterns. The proposed methodology demonstrates a clear advantage over traditional techniques and exhibits scalability for real-time applications.

Sentinel-1 SAR Verileri Kullanılarak Petrol Sızıntısı Tespiti

Keywords
Petrol Sızıntısı Tespiti,
Sentinel-1,
Çevresel Koruma,
Afet Yönetimi,
Sentetik Açıklıklı Radar

Öz: Petrol sızıntıları, deniz ekosistemleri ve kıyı ekonomileri için önemli bir tehdit oluşturmakta ve etkili ve doğru tespit yöntemleri gerektirmektedir. Çeşitli çevresel koşullarda güvenilir izleme gerekliliğinden hareketle, bu çalışmada petrol sızıntılarını tespit etmek ve tanımlamak için Sentinel-1 Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verileri ve Mask R-CNN derin öğrenme modeli kullanılmıştır. Sentinel-1, hava koşullarından veya günün saatinden bağımsız olarak veri elde etme kapasitesi nedeniyle seçilmiştir, böylece tutarlı bir izleme sağlanmıştır. Mask R-CNN modeli, hassas, piksel düzeyinde segmentasyon yapabilmesi ve doğru sızıntı alanı tespitine olanak sağlaması nedeniyle seçilmiştir. Modelin performansı, farklı coğrafi ve çevresel bağlamlardan alınan 381 Sentinel-1 görüntüsünden oluşan bir veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Model, MV Wakashio için %80 ve MK Princess Empress için %81 genel doğruluk gösterirken, IoU sırasıyla %76 ve %74,8 olmuştur. Bu sonuçlar, modelin petrol sızıntılarını alg patlamaları ve tortu örüntüleri gibi yanlış pozitiflerden ayırt etmedeki etkinliğinin altını çizmektedir. Önerilen metodoloji, geleneksel tekniklere göre açık bir avantaj sağlamakta ve gerçek zamanlı uygulamalar için ölçeklenebilirlik sergilemektedir.

*İlgili Yazar, email: hsenol@harran.edu.tr

1. Introduction

The management and logistics of oil, a critical natural energy resource, represents a significant global concern [1,2]. The intricate nature of guaranteeing the secure and effective conveyance of oil, particularly via maritime routes, highlights the necessity for comprehensive tracking and monitoring systems [3]. The global transportation and logistics of oil, a vital natural resource, present significant challenges, particularly in mitigating the environmental risks associated with oil spills [4,5]. Oil spills, whether the result of tanker accidents or natural disasters, present a significant threat to marine ecosystems and coastal communities. Therefore, it is imperative that they are rapidly detected and responded to effectively [6,7]. It can be argued that the effective management of oil spills, from the initial detection stage through to the subsequent clean-up operation, is of paramount importance for the dual purposes of environmental protection and the continued efficiency of oil logistics [3]. This necessitates not only the identification of potential problem areas but also the deployment of advanced ground and Earth observation techniques for the real-time monitoring of events [7].

The current methods for monitoring and managing oil spills rely significantly on satellite-based remote sensing technologies, including radar and optical imagery [5]. Recent studies have highlighted the effectiveness of Sentinel-1 SAR data in detecting marine oil spills. For instance, Caporusso et al. [4] employed Sentinel-1 and Google Earth Engine to monitor oil spills in Venezuelan waters, showcasing its ability to analyze spill extents rapidly in diverse conditions. Similarly, Ahmed et al. [5] utilized deep neural networks with Sentinel-1 imagery to successfully identify spills along the Egyptian coastline, emphasizing the model's robustness in varying environmental scenarios. Cheng et al. [3] proposed a framework incorporating Sentinel-1 data to address special disturbances in oil spill detection along the Suez Canal, achieving high accuracy in complex maritime settings. Houali et al. [7] implemented a semi-automated approach for oil slick extraction in the Moroccan exclusive economic zone, demonstrating the potential of radar imagery in diverse environmental conditions. These studies demonstrate the growing reliance on radar-based technologies for environmental monitoring.

Earth observation, primarily through satellite technology, has been an indispensable tool for monitoring global environmental phenomena, offering a comprehensive overview of terrestrial and maritime activities [8,9]. Although satellite capabilities have undergone considerable advancement, particularly in terms of resolution and functionality, the fundamental premise of utilising satellite imagery for the observation and monitoring of processes on Earth [10] remains unchanged. One of the most crucial applications of this technology is in the monitoring of oil spills, which may be the result of natural disasters such as storms or incidents involving oil tankers [4]. Oil spills present a significant threat to marine ecosystems and coastal environments, necessitating prompt detection and intervention to mitigate their detrimental impacts [11,12]. Given the potential for oil spills to cause significant harm to natural habitats, particularly those of marine and coastal species, the ability to rapidly detect such incidents is of paramount importance [13]. This enables the prompt initiation of cleanup operations, which is essential for limiting the environmental damage caused by these events [9]. Remote sensing has emerged as one of the most effective technologies for tracking oil spills, providing essential data for understanding the spill's spatial extent and rate of spread.

However, the limitations of temporal and spatial resolution of these satellite systems, when considered alongside the complexities of accurately detecting oil on water surfaces, serve to hinder the effectiveness of existing monitoring solutions [14]. The proposed method addresses several key limitations of existing oil spill detection techniques. By utilizing radar-based Sentinel-1 data, it overcomes challenges associated with cloud cover and weather conditions that frequently hinder optical imagery. The application of the Mask R-CNN model significantly improves object segmentation accuracy, enabling the detection of smaller spills that are often missed by traditional methods. Furthermore, the high temporal resolution of Sentinel-1 ensures timely data availability, allowing for rapid response in disaster scenarios. These features collectively enhance the efficiency and reliability of oil spill monitoring.

Furthermore, while deep learning and AI-driven object detection techniques have enhanced spill detection capabilities, they remain constrained by the quality and diversity of training data, which may result in potential inaccuracies in real-world spill scenarios [4]. To ensure effective oil spill monitoring, it is essential to have high temporal and spatial resolutions. Temporal resolution refers to the frequency of data collection, while spatial resolution pertains to the detail and accuracy of the spatial data [5]. This dual focus enables the expeditious identification of the spill's propagation and the estimation of the area necessitating remediation [15]. Optical satellites, which are widely used for object detection, play a pivotal role in remote sensing. However, their performance on water surfaces, where subsurface elements may interfere with detection, can be constrained [16]. In contrast, radar technology has demonstrated greater efficacy in maritime settings, particularly for the detection of oil spills, as it can penetrate cloud cover and distinguish between oil slicks and water surfaces. Nevertheless, the

utility of radar data remains contingent upon its temporal and spatial resolution, which can vary considerably between different satellite systems [17-19].

In recent years, the European Space Agency's Sentinel-1 satellite has emerged as a leading resource for oil spill monitoring due to its open-access data policy and its ability to provide high temporal and spatial resolution radar imagery [3]. Sentinel-1 offers unique advantages over other satellite systems [20-22]. These advantages include high temporal and spatial resolution, C-band radar technology, and dual polarization capabilities [21]. Notably, the C-band radar technology ensures reliable data collection, even in adverse weather conditions such as cloud cover and nocturnal periods [22-24]. The satellite's open access policy ensures affordability and ease of access, making it a valuable resource for developing countries and research institutions with limited financial resources [23]. Additionally, its dual polarization capacity facilitates the distinction between oil spills and other sea surface features, enhancing the precision of analysis [22-26]. An increasing number of studies have focused on the Sentinel-1 platform for environmental monitoring, as it offers consistent and reliable data at no cost to users. This makes it particularly well-suited for developing nations and research institutions with limited resources. Furthermore, advancements in technology, particularly in artificial intelligence (AI) and deep learning, have significantly enhanced the accuracy and efficiency of object detection [27].

Deep learning techniques have seen significant advancements in their application to environmental monitoring and object detection. For instance, Temitope Yekeen and Balogun [13] reviewed machine learning and deep learning advancements in marine oil spill detection, highlighting their role in improving prediction accuracy and vulnerability assessments. Zhou et al. [28] proposed enhancements to Faster R-CNN for better recognition of occlusions and small objects, demonstrating its potential applicability to complex scenarios such as oil spill detection. Pirinen and Sminchisescu [29] explored deep reinforcement learning for region proposal networks, offering insights into improving object detection in dynamic environments. Similarly, Guo et al. [30] showcased the adaptability of Mask R-CNN for specific tasks like citrus picking, underlining its versatility across different domains.

Several studies have demonstrated the significant potential of deep learning models in oil spill detection. For instance, Ghorbani and Behzadan [31] employed deep neural networks to achieve instance segmentation of oil spills, highlighting the adaptability of these models to diverse marine conditions. Salau and Krieter [32] applied Mask R-CNN for segmentation tasks, demonstrating its effectiveness in handling high-resolution datasets for environmental monitoring. Furthermore, Dehghani-Dehcheshmeh et al. [6] utilized hybrid CNN-transformer networks integrated with Sentinel-1 SAR data, achieving notable accuracy in oil spill detection under complex scenarios. Such advancements underscore the transformative role of deep learning and AI-driven techniques in enhancing the precision and reliability of oil spill monitoring. The development of powerful object detection algorithms has revolutionized how environmental data is processed and interpreted, enabling the rapid identification of spills and other anomalies [3, 18, 33].

This study contributes to the literature by introducing a novel approach that integrates Sentinel-1 SAR data with the Mask R-CNN deep learning model. Unlike traditional methods that rely heavily on optical imagery or lower-resolution radar data, this approach provides a robust framework for detecting and monitoring oil spills with high accuracy. By addressing limitations such as low-resolution datasets and environmental constraints, the proposed method significantly enhances the precision and reliability of oil spill detection. Furthermore, this research provides a transferable methodology that can be applied to other environmental monitoring challenges, thereby broadening its scientific impact.

This research also highlights the significance of employing high-resolution temporal and spatial data, such as that provided by Sentinel-1, in conjunction with sophisticated AI tools to guarantee prompt detection and response to oil spills. The integration of these technologies not only exemplifies the advancements in environmental monitoring but also provides a framework for addressing future challenges in oil spill management through more accurate, real-time tracking and decision-making processes. Such advancements offer the potential to significantly mitigate the environmental and economic impacts of oil spills, ensuring more sustainable and responsible management of this vital energy resource. Moreover, this study seeks to address these challenges by employing Sentinel-1 SAR satellite data and sophisticated deep learning algorithms for more efficient and precise oil spill detection, thereby contributing to enhanced environmental protection and resource management strategies.

In the context of this study, deep learning algorithms integrated with ArcGIS software are employed for the purpose of oil spill detection. This approach leverages Sentinel-1 radar data in order to ensure the highest possible degree of accuracy in both spill detection and area estimation [3]. The deployment of pre-trained deep learning models within ArcGIS reduces the workload for researchers by streamlining the detection process, which is particularly advantageous when working with large datasets [34]. The application of deep learning methods not

only accelerates the speed of detection but also enhances the precision of spill tracking, thereby facilitating more effective response strategies in the event of an environmental disaster [35]. The use of ArcGIS, which is widely recognized for its robust geospatial analysis capabilities, further supports this by allowing for seamless integration of data, efficient workflow management, and enhanced visualization of oil spill extents.

2. Material and Method

2.1. Study area

The study focuses on the MV Wakashio and MT Princess Empress oil spills aresignificant environmental disasters in recent history. The MV Wakashio incident occurred off the southeastern coast of Mauritius in the Indian Ocean when the Japanese-owned bulk carrier MV Wakashio ran aground on a coral reef near Pointe d'Esny on July 25, 2020 (Figure 1a). Pointe d'Esny is a crucial sanctuary for rare wildlife and a UNESCO-recognized area of ecological significance. The accident resulted in the release of over 1,000 tonnes of fuel oil into the pristine waters, severely affecting the marine ecosystem, coastal habitats, and local communities dependent on these resources for their livelihoods. The affected area encompasses the Mahebourg lagoon, extending from the lagoon of Pointe d'Esny to the surrounding mangroves, seagrass beds, and coral reefs. This region is renowned for its rich biodiversity, which includes numerous endemic species and serves as a breeding ground for a variety of marine life. Additionally, the area is a significant contributor to the local economy, primarily through eco-tourism, which attracts visitors to its pristine marine habitats and protected environments. The impact of the oil spill posed a direct threat not only to the ecological balance of the region but also to the economic well-being of the local communities. Hence, the severity of the spill's effects on both environmental and socio-economic aspects underscores the importance of efficient oil spill monitoring and cleanup.

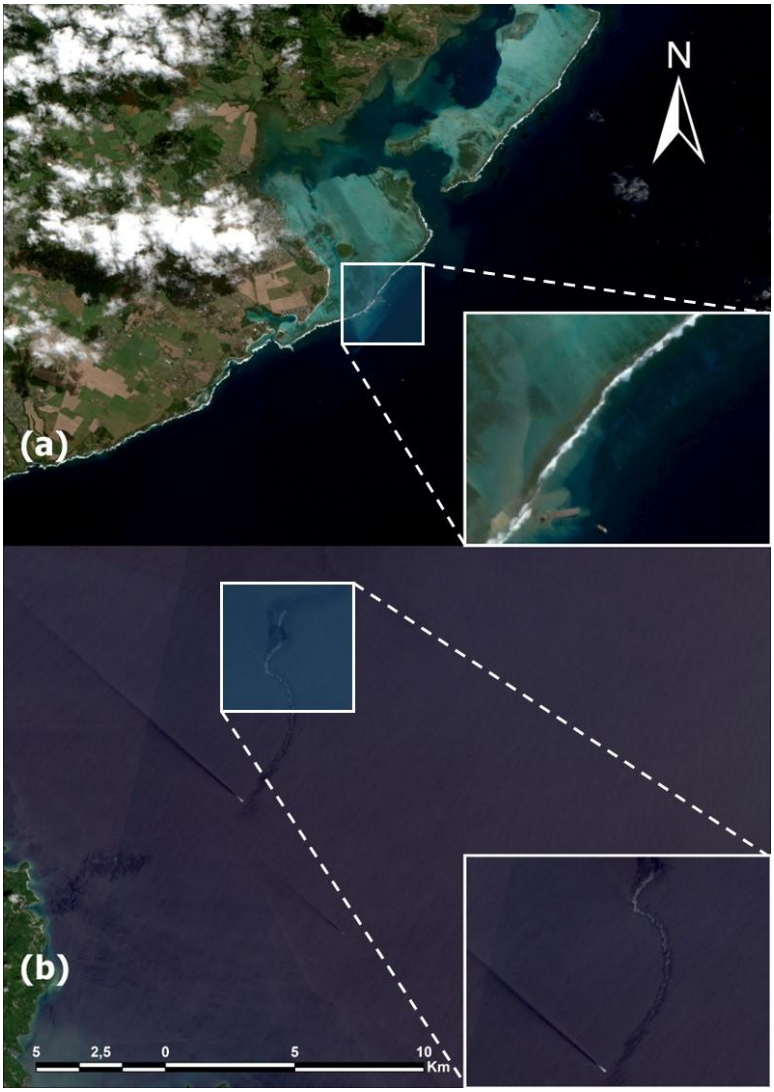


Figure 1. (a) MV Wakashio and (b) MT Princess Empress Oil Spill Zones

The MT Princess Empress incident occurred on February 28, 2023, when the tanker, carrying 800,000 liters of industrial oil, sank off the coast of Naujan, Oriental Mindoro, Philippines (Figure 1b). The spill caused extensive environmental damage, affecting marine ecosystems, local fisheries, and coastal communities, and required a large-scale cleanup effort. The area affected by the MT Princess Empress oil spill, particularly the waters off Oriental Mindoro in the Philippines, holds significant environmental importance due to its rich marine biodiversity and ecological value. These waters are part of the Verde Island Passage, which is often referred to as the "center of the center of marine biodiversity" in the world. The region is home to a vast array of coral reefs, seagrass beds, and mangrove forests that provide critical habitats for countless marine species, including those that are vital to local fisheries. The region's economic activities, including fishing and eco-tourism, play a crucial role in sustaining livelihoods. Additionally, it serves as a vital component in preserving ecological balance and safeguarding coastal regions from erosion. The repercussions of the spill on a highly sensitive and globally significant ecosystem underscore the imperative for prompt and effective environmental protection and restoration initiatives.

Given the ecological richness of these areas, this research emphasizes the need for rapid and accurate detection of oil spills to minimize the environmental and economic damage. The unique characteristics of these regions, particularly its vulnerable coastal habitats, provide a critical context for testing the effectiveness of advanced remote sensing technologies, such as the Sentinel-1 SAR satellite, and deep learning techniques in detecting and tracking oil spills. These areas serves as an ideal location for demonstrating the application of innovative solutions to mitigate environmental disasters and enhance response strategies.

2.1. Data

In this study, satellite data from the Sentinel-1 mission is utilized for the detection of oil spills. The Sentinel-1 satellite, operated by the European Space Agency (ESA), provides high-resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) data. The satellite operates in multiple modes, including the Interferometric Wide Swath (IW) mode, which was used in this study. The IW mode offers a ground resolution of 5 m × 20 m, with a coverage width of 250 km. This mode is particularly suitable for monitoring large-scale environmental phenomena, such as oil spills, due to its ability to balance high resolution with extensive spatial coverage. Sentinel-1 also offers dual polarization (VV and VH), which enhances its capacity to distinguish between oil spills and other surface features. The satellite's temporal resolution of six days ensures consistent monitoring, enabling rapid detection and timely responses to environmental disasters. Additionally, the Ground Range Detected (GRD) products used in this study are preprocessed to reduce speckle and improve feature interpretability, further increasing the utility of Sentinel-1 data for oil spill detection.

While optical satellite systems such as Landsat and MODIS have been widely used for environmental monitoring, their dependency on clear weather conditions and daylight limits their applicability in dynamic and cloudy environments. In contrast, Sentinel-1's radar-based technology enables consistent data acquisition regardless of weather or lighting conditions. Additionally, compared to other SAR systems like Radarsat-2, Sentinel-1's open-access policy and high temporal resolution (six days) provide significant advantages for large-scale and rapid monitoring efforts.

S-1 represents the inaugural space mission of the European Space Agency (ESA), comprising two satellite constellations, S-1(A) and S-1(B). S-1(A) was launched on April 3, 2014, while S-1(B) was launched on April 25, 2016. The central frequency of S-1 is 5.40 GHz, which corresponds to a wavelength of 5.55 cm. It is equipped with C-band technology. The C-band frequency range extends from 4 to 8 GHz. The temporal resolution of S-1 is six days, and it offers both single (HH or VV) and dual polarizations (HH + HV or VH + VV). S-1 is capable of functioning in four distinct acquisition modes. The Stripmap (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra-Wide Swath (EW), and Wave (WV) modes are available. The IW mode is conducive to the monitoring of terrestrial and coastal regions with a ground resolution of 5 m × 20 m. The ground range coverage of IW is 251.8 km, with resolution ranges of 20 × 22 for high resolution and 88 × 89 for medium resolution. Each mode is capable of generating Single Look Complex (SLC) and Ground Range Detected (GRD) products at Level-1 (L1), as well as Ocean (OCN) products at Level-2 (L2). The standard GRD products are multi-looked, which serves to diminish speckle in the image and enhance the interpretability of features. Multi-looking is implemented on all bursts of the IW and EW modes of S-1, with the GRD products produced independently. Subsequently, all bursts within sub-swaths are amalgamated to provide a continuous GRD image in each polarization channel. The detection of oil spills is facilitated by the utilisation of SAR sensors operating in the C-band (Sentinel 1). The S-1 IW and EW modes remain the preferred and dependable methods for marine oil spill detection due to their rapid and near real-time data delivery within 24 hours and their conflict-free operations.

For the training of the deep learning model was facilitated by the utilization of 381 Sentinel-1 scenes, which encompassed a diverse array of oil spill stages under varying environmental conditions (e.g., calm seas, rough

weather, cloud cover). The data included images from both VV and VH polarizations to ensure comprehensive feature representation. This diversity in temporal and spatial conditions enhances the model's ability to generalize across real-world scenarios. Additionally, the dataset was augmented using rotation and flipping techniques to increase variability and robustness. The data utilized for the detection of oil spills is presented in Table 1.

Tablo 1. Specifications of satellite data used for the study.

Sensing Date	Platform	Processing Level	Polarization
29-07-2020	Sentinel 1B	Level-1C	VV
06-03-2023	Sentinel 1A	Level-1C	VV

These characteristics of Sentinel-1 directly contributed to the effectiveness of oil spill detection in this study. The fine resolution enabled precise segmentation of oil spill boundaries, while the polarization data improved the discrimination between oil slicks and natural water patterns. In addition, the six-day temporal resolution enabled timely data collection, critical for tracking the dynamic progression of the oil spill incidents.

2.1. Method

Subsequent to the collection of data, a series of image preprocessing techniques were employed, including picture subsetting, calibration, speckle filtering, multi-looking, ellipsoid correction, and land/sea masking. At the outset, the images were subsetted with the objective of reducing their overall size while focusing exclusively on the region of interest. The SAR images are calibrated to ensure that the pixel values accurately represent the radar backscatter of the reflecting area. Calibration enables the comparison of SAR images obtained at different times and from different modes. Speckle noise is an inherent property of SAR imaging that impairs image quality and complicates the differentiation of image features. Consequently, speckle filtering is a crucial step in the process of precise oil spill detection and image categorization. The Lee Sigma filter is employed with a 7 x 7 kernel size for the purpose of eliminating speckle. The Lee sigma filter is capable of preserving cellular resolution while simultaneously retaining edge sharpness, thereby making it an effective tool for identifying oil spill features. The Lee sigma filter is based on two sigma Gaussian distribution probabilities and incorporates the speckle multiplicative noise model, as outlined in Eq. (1).

$$z(k,l) = x(k,l) * v(k,l) \tag{1}$$

Where z(k,l) is the (k,l)th pixel in intensity or amplitude of a SAR imagery, x(k,l) is the reflectance, v(k,l) represents speckle noise and characterized by a distribution with E[v(k,l)] = 1.

Multi-looking is a processing technique that is employed to address the challenges posed by intricate image geometry, inherent speckle, and the need to enhance image interpretability. The range look was set to 1, the azimuth looks to 2, and the mean ground range square pixel was established at 5.39. Ellipsoid correction serves to mitigate distance distortions, thereby rendering the image's geometric representation to be closely aligned with the real world. This work employs the Geolocation Grid (GG) to perform the ellipsoid correction. To prevent the processing of terrestrial regions, the "mask out land" operation is implemented. This operation converts all land pixels into null values and diminishes the image size.

This research focuses on the impacted zone within a marine and coastal ecosystem, aiming to evaluate the extent of the oil spill and its effects using Sentinel-1 SAR imagery and Mask R-CNN for detailed analysis and segmentation. The chosen areas, due to its ecological significance and the magnitude of the environmental threat posed by the oil spill, provides a critical context for applying innovative technology solutions to address and mitigate such maritime disasters.

To analyze and segment the Sentinel-1 data, Mask R-CNN was selected due to its superior performance in pixel-level segmentation tasks. Unlike traditional object detection models, such as Faster R-CNN or U-Net, Mask R-CNN generates precise segmentation masks, which are critical for delineating oil spill boundaries accurately. This capability is particularly advantageous in complex marine environments, where small spills or occluded features pose significant challenges. Additionally, its modular architecture, which integrates Region Proposal Networks (RPN) and segmentation mask generation, enables efficient processing and detection, reducing manual intervention compared to traditional machine learning approaches.

The innovative aspects of this study lie in its seamless integration of advanced preprocessing techniques, such as speckle filtering and multi-looking, with the Mask R-CNN model. Additionally, the use of transfer learning to fine-tune the model with Sentinel-1 data ensures its adaptability to real-world conditions. By leveraging ArcGIS for

data processing and visualization, this approach also streamlines workflow management and enhances the practical applicability of the method. These advancements collectively demonstrate the potential of combining satellite imagery with deep learning to address complex environmental challenges.

Mask R-CNN extends Faster R-CNN by adding a branch for predicting segmentation masks on each Region of Interest (RoI), in parallel with the existing branch for classification and bounding box regression [25]. This model is particularly suited for tasks requiring precise localization of objects within an image, making it ideal for our application. For the task of object instance segmentation, our study employed the widely recognized Mask R-CNN model due to its straightforward design and prevalent use in scholarly research [26]. This method effectively identifies objects of distinct shapes within high-resolution images and generates precise segmentation masks for each instance.

The architecture of Mask R-CNN incorporates multiple convolutional and pooling layers, culminating in several fully connected layers [27]. Each convolutional layer undergoes a three-step process: convolution, application of a nonlinear activation function, and pooling. Subsequent to each convolutional operation, a feature map is generated, which is then relayed to the subsequent layer for further processing. Mask R-CNN builds upon the architecture of Faster R-CNN by introducing an additional branch that operates concurrently with the existing bounding box recognition branch to predict segmentation masks for objects [24]. Following this, Fast R-CNN takes over, utilizing RoIPool to extract features from each proposed box, subsequently classifying the objects and refining their bounding boxes.

Mask R-CNN enhances this structure by adding a third pathway specifically designed for generating precise object masks, distinguishing it from its predecessors [28]. Not only is Mask R-CNN straightforward to train, but it also boasts versatility, adapting effortlessly to various applications, ranging from human pose estimation to the identification of distinct entities like vehicles or buildings [29]. Mask R-CNN operates through a two-stage process. Initially, the model employs a Region Proposal Network (RPN) to scrutinize the feature maps, creating regions of interest (RoIs) [36]. It leverages the ResNet architecture as its foundational backbone, integrating both high-level and low-level features from various layers through a residual convolution network combined with a feature pyramid network.

This integration effectively captures both the precise location details and deep semantic information from images. Subsequently, for each RoI, a process known as RoI pooling is utilized to scale down the feature map using a nearest neighbor technique, selectively extracting pivotal features [31]. However, this pooling method can lead to a misalignment of the extracted features with the RoIs. To rectify this and achieve finer RoI accuracy, RoI Align employs bilinear interpolation for each region. Finally, Mask R-CNN concludes by generating masks for each RoI, alongside classifying and bounding each detected object, enhancing the precision of object detection and segmentation tasks [29,37]. The mask R-CNN model was pre-trained using a predefined set of Sentinel-1 images labelled with the presence of oil spills. The data training process was performed by the Oil Spill Detection Deep Learning package available in ArcGIS Deep Learning Pre-Trained Packages [38]. The training process involved tuning the hyperparameters of the model such as learning rate, chunk size and number of epochs to optimise the detection accuracy. Transfer learning techniques were applied using a pre-trained model on the COCO dataset and further fine-tuned with our custom dataset of satellite imagery to improve the model's ability to recognise oil spills.

The performance of the trained Mask R-CNN model was assessed using standard metrics for object detection and segmentation, including precision, recall, and the Intersection over Union (IoU) for both bounding boxes and segmentation masks. The validation dataset was used to test the model's effectiveness in accurately detecting and segmenting oil spills. Additionally, qualitative assessments were performed by visually inspecting the model's predictions against ground truth annotations to ensure the accuracy of the segmentation results.

The parameter choices for the Mask R-CNN model were guided by prior studies and iterative testing during model training. For instance, the learning rate was set to 0.001, following the recommendations of Ghorbani and Behzadan [31], who demonstrated its suitability for segmentation tasks involving Sentinel-1 data. Similarly, the number of epochs (50) and chunk size (16) were optimized through cross-validation to balance model accuracy and training efficiency. These parameter settings were selected to achieve the highest IoU and recall values on the validation dataset.

The model was implemented using the PyTorch framework, due to its flexibility and extensive support for deep learning models. All computations were performed on a high-performance computing cluster equipped with NVIDIA GPUs to expedite the training and inference processes.

3. Results

The integration of Sentinel-1 SAR satellite data with the Mask R-CNN deep learning model yielded effective and precise detection of oil spills. The findings of the study are centered on the detection and delineation of the MV Wakashio and MT Princess Empress oil spill, exemplifying the capacity of Sentinel-1 SAR for monitoring maritime disasters. The radar imagery processed from Sentinel-1 was instrumental in detecting the extent of the oil spill, which was estimated to cover an area of approximately 1.17 km^2 and 1.07 km^2 for MK Wakashio and MT Princess Empress incidents respectively. The spill area was calculated through the processing of high-resolution satellite data by the Mask R-CNN model, which successfully segmented the regions of oil contamination from the surrounding water.

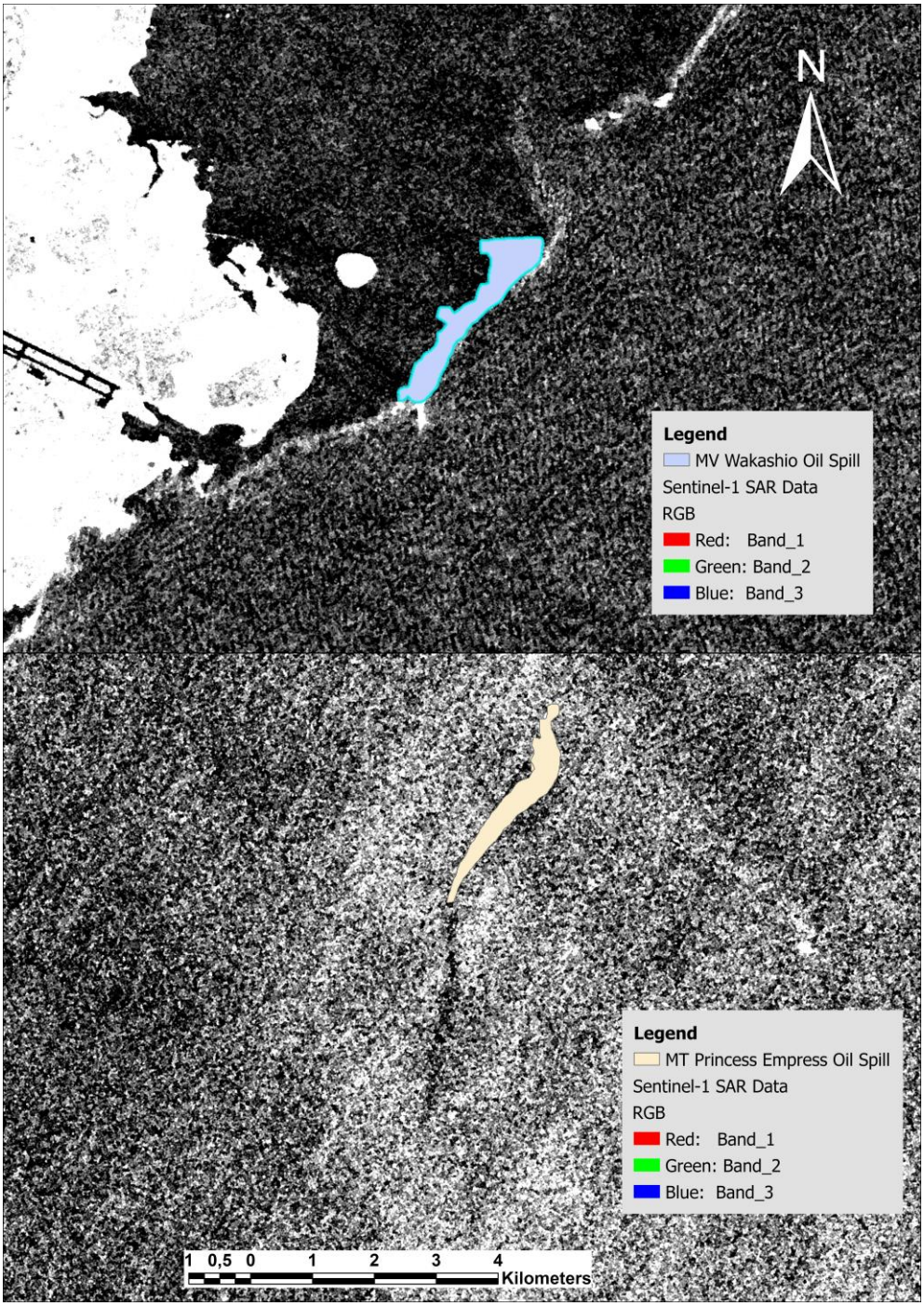


Figure 2. Oil Spill Extraction Results

The overall accuracy of the detection was found to be 80% for MV Wakashio and 81% for MK Princess Empress, demonstrating the reliability of using SAR data combined with deep learning techniques. The model's performance for MV Wakashio incident was evaluated using precision (82%), recall (78%), and IoU (76%) and for MT Princess

Empress incident was evaluated using precision (83.8%), recall (80.2%) and IoU (74.8%). These metrics indicate the model's ability to accurately detect and delineate oil spills while minimizing false positives and negatives. For comparison, similar studies by de Ahmed et al. [5], de Moura et al. [39], Zhang et al. [40] and Yang et al. [41] reported IoU values of 0.96, 0.62, 0.78 and 0.69, respectively, demonstrating the relative effectiveness of our approach. Furthermore, the qualitative assessment showed that the segmentation masks aligned closely with ground truth annotations, confirming the model's reliability in real-world scenarios.

The use of Sentinel-1 SAR images allowed the model to bypass the limitations faced by optical sensors, particularly in distinguishing oil spills from natural water patterns and overcoming challenges posed by weather conditions, such as cloud cover. Figure 2 illustrates the detected oil spill areas, highlighting the effectiveness of this method in visualizing the spread and extent of contamination.

Further analysis of the detection process revealed that the Mask R-CNN model was able to identify the boundaries of the oil spill with a high degree of precision, which is crucial for determining the necessary area for remediation. The segmentation masks generated by the deep learning model facilitated the estimation of the oil-covered surface, which is essential for the optimal allocation of resources during the cleanup operations. Moreover, the model's capacity to process extensive datasets expeditiously rendered it especially advantageous in disaster scenarios, where prompt detection is crucial for minimizing environmental impact. The integration of these technologies offers a notable enhancement in both speed and accuracy compared to traditional methods, rendering them a valuable asset for future applications in oil spill monitoring and management.

Rapid detection of oil spills is paramount in preventing ecological disasters and mitigating their impact on marine ecosystems and coastal communities. The urgency to address oil spills as they occur necessitates innovative approaches that can swiftly and accurately assess the situation, enabling timely response measures. The significance of this research lies in its ability to offer such a solution, harnessing the power of Sentinel-1 satellite data and advanced deep learning techniques. By providing a method for fast and precise identification of oil spills, this study contributes a valuable tool for environmental protection efforts. Moreover, the ability to quickly determine the spread and extent of oil contamination aids in the efficient allocation of cleanup resources, thereby minimizing the ecological damage and facilitating quicker restoration of affected areas. Through enhancing the speed and accuracy of oil spill detection, this research plays a crucial role in the broader endeavor to safeguard marine biodiversity and preserve the health of our oceans.

4. Discussion

The findings of this study emphasize the efficacy of integrating Sentinel-1 SAR data with the Mask R-CNN deep learning model for precise oil spill detection. The model demonstrated an overall accuracy of 80% for MV Wakashio and 81% for MK Princess Empress, with a precision of 82%, recall of 78%, and IoU of 76% for MV Wakashio incident and for MT Princess Empress incident was evaluated with a precision of 83.8%, recall of 80.2% and IoU of 74.8%. These results highlight the capability of the proposed methodology to achieve high segmentation accuracy, even under challenging conditions such as mixed environmental signals or cloud cover. Compared to optical satellite-based methods, which often face limitations in adverse weather conditions, the use of radar-based Sentinel-1 data provides consistent and reliable monitoring capabilities.

The achieved IoU value of 76% is comparable to values reported in similar studies, such as Ahmed et al. [5], Moura et al. [39], Zhang et al. [40], and Yang et al. [41], which reported IoU values of 0.96, 0.62, 0.78, and 0.69, respectively. These comparisons demonstrate that the methodology presented in this study performs competitively with existing approaches while offering advantages in terms of automation and adaptability. The high spatial resolution of 5 m × 20 m and the dual-polarization (VV and VH) capabilities of Sentinel-1 were critical in differentiating oil spills from natural water patterns. These findings align with studies such as Dehghani-Dehcheshmeh et al. [6], where Sentinel-1's radar data significantly enhanced the accuracy of oil spill detection.

The model's capability to distinguish between oil spills and false positives, such as algal blooms, was enhanced by leveraging Sentinel-1's dual-polarization (VV and VH) capabilities. These features allowed for more accurate discrimination of surface features by examining the backscatter properties of different materials. However, occasional false positives were observed in regions with high environmental variability. To address these challenges, future research could explore the integration of auxiliary datasets, such as optical imagery or additional radar parameters, to further reduce false detections.

The integration of the Mask R-CNN model provides an added advantage by enabling precise delineation of oil spill boundaries, which is essential for effective resource allocation during cleanup operations. Compared to traditional segmentation methods discussed in Ghorbani and Behzadan [31], which required extensive preprocessing and

manual input, the automated nature of the Mask R-CNN significantly streamlined the detection process. Additionally, the transfer learning approach, which utilized pre-trained weights fine-tuned with Sentinel-1 data, further enhanced the model's adaptability to real-world scenarios.

Despite these advancements, challenges remain in improving the model's performance in highly dynamic marine environments, where wave patterns or other environmental factors may introduce noise into the detection process. Future research could focus on incorporating additional datasets, such as multi-temporal SAR imagery or optical data, to improve the robustness and generalizability of the model.

The findings of this study contribute not only to academic literature but also to practical applications in environmental protection and disaster management. The integration of Sentinel-1 SAR data with advanced deep learning models presents a scalable solution for real-time monitoring of marine oil spills. This methodology has the potential to inform policy development, guide resource allocation during cleanup operations, and contribute to global efforts in mitigating environmental disasters.

5. Limitations

This study, while demonstrating promising results, is subject to several limitations that warrant consideration. Firstly, the temporal resolution of Sentinel-1 SAR data, while relatively high at six days, may not always align with the immediate timing of oil spill incidents. This can delay the rapid detection required for critical environmental response measures. Additionally, the spatial resolution, although sufficient for large-scale spills, may pose challenges in detecting smaller spills, particularly in complex coastal regions with high environmental variability.

Secondly, the effectiveness of the Mask R-CNN model is influenced by the quality and diversity of the training dataset. In this study, the dataset was limited to pre-labeled Sentinel-1 images, which may not fully capture the variability of real-world oil spill scenarios, such as those occurring under extreme weather conditions or in regions with unique marine characteristics. The model's ability to distinguish oil spills from similar phenomena, such as algal blooms or sediment patterns, could also be improved.

Lastly, the reliance on computational resources, including high-performance GPUs for model training and inference, may limit the accessibility of this approach for organizations with constrained resources. Future work should focus on optimizing computational efficiency to ensure broader applicability.

Addressing these limitations through the incorporation of supplementary datasets, hybrid modeling approaches, and enhanced algorithmic refinement could significantly improve the robustness and applicability of oil spill detection methodologies.

6. Conclusion and Recommendations for Future Studies

The integration of Sentinel-1 SAR satellite data with advanced deep learning techniques for the detection and monitoring of oil spills, as evidenced in the case of the MV Wakashio and MT Princess Empress incidents, represents a significant leap forward in environmental disaster management. This research highlights the importance of timely and accurate detection mechanisms in mitigating ecological catastrophes, safeguarding marine biodiversity, and protecting coastal communities. By enabling rapid identification of spills, the study demonstrates how satellite imagery can be utilized for effective environmental monitoring, leading to efficient response strategies and conservation of resources, including energy savings during clean-up operations. The ecological significance of areas affected by spills like MV Wakashio and MT Princess Empress underscores the urgent need for innovative surveillance technologies.

The findings of this study demonstrate the efficacy of integrating Sentinel-1 SAR data with sophisticated deep learning methodologies, particularly the Mask R-CNN model, for the identification of oil spills. The detection technique benefits considerably from the elevated spatial and temporal resolution of Sentinel-1 SAR, thereby facilitating a comprehensive investigation of the affected regions. The MV Wakashio and MT Princess Empress incidents exemplifies the utility of satellite data in facilitating more effective environmental disaster management through the rapid detection of oil spills, thereby enabling more timely reaction and resource distribution initiatives. The employment of Mask R-CNN enhances the precision of detection, enabling the delineation of oil spills and the estimation of their extent, which is crucial for the effective implementation of remediation strategies. The combination of these technologies represents a significant advancement in the reduction of environmental consequences associated with oil spills.

However, certain limitations were also identified in the investigation. While Sentinel-1 SAR provides substantial data, its temporal resolution may impede the expedient identification of oil spills, particularly in rapidly evolving scenarios. Furthermore, despite the elevated accuracy of the deep learning algorithm, it encounters difficulties in differentiating oil spills from other analogous occurrences, such as algae blooms, which can impact detection precision. Further research may be enhanced by the integration of supplementary datasets and the optimization of deep learning algorithms, with the aim of improving detection reliability across a range of marine settings. Further investigation of these areas may facilitate the development of more effective oil spill detection methodologies, thereby enhancing environmental protection strategies.

Future improvements to this methodology could focus on increasing data diversity by incorporating multi-temporal and multi-sensor datasets. This approach would enhance the model's generalization capabilities and improve performance in diverse marine environments. Additionally, further optimization of the Mask R-CNN architecture, such as the incorporation of lightweight models or hybrid approaches, could reduce computational costs while maintaining high accuracy.

While this study demonstrated the potential of integrating Sentinel-1 SAR data with the Mask R-CNN model for accurate oil spill detection, there remain opportunities for further research and development. Future work could focus on increasing data diversity by incorporating multi-temporal and multi-sensor datasets, enabling the model to generalize across different marine environments and conditions. Additionally, optimizing the Mask R-CNN architecture through lightweight models or hybrid approaches could reduce computational costs, making this methodology more accessible for real-time applications.

To address challenges such as false positives from algal blooms or sediment patterns, integrating auxiliary datasets, such as optical imagery or additional radar parameters, could further enhance detection accuracy. Moreover, the development of real-time monitoring systems, including cloud-based or mobile applications, would allow for faster and more efficient responses to oil spills. Finally, this approach could contribute to global efforts in environmental protection by informing policy development and supporting disaster management initiatives. These advancements would strengthen the applicability of the proposed methodology and extend its impact beyond academic research.

Acknowledgement

The authors thank the ESA for free satellite data. This study was presented as a paper at the 12th Global Conference on Global Warming (GCGW-2024).

References

[1] Raut, R. D., Narkhede, B., Gardas, B. B. 2017. To identify the critical success factors of sustainable supply chain management practices in the context of oil and gas industries: ISM approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 33-47.

[2] Khan, S. A. R., Godil, D. I., Yu, Z., Abbas, F., Shamim, M. A. 2022. Adoption of renewable energy sources, low-carbon initiatives, and advanced logistical infrastructure—an step toward integrated global progress. Sustainable Development, 30(1), 275-288.

[3] Cheng, L., Li, Y., Qin, M., Liu, B. 2024. A marine oil spill detection framework considering special disturbances using Sentinel-1 data in the Suez Canal. Marine Pollution Bulletin, 208, 117012.

[4] Caporusso, G., Gallo, C., Tarantino, E. 2022. Change detection analysis using sentinel-1 satellite data with SNAP and GEE regarding oil spill in Venezuela. In International Conference on Computational Science and Its Applications (pp. 387-404). Cham: Springer International Publishing.

[5] Ahmed, S., ElGharbawi, T., Salah, M., El-Mewafi, M. 2023. Deep neural network for oil spill detection using Sentinel-1 data: application to Egyptian coastal regions. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 14(1), 76-94.

[6] Dehghani-Dehcheshmeh, S., Akhoondzadeh, M., Homayouni, S. 2023. Oil spills detection from SAR Earth observations based on a hybrid CNN transformer networks. Marine Pollution Bulletin, 190, 114834.

[7] Houali, Y., Tounsi, Y., El Ghandour, F. E., Habib, A., Labbassi, Y., Labbassi, K. 2024. Implementation of a semi-automatic approach for detection and extraction of oil slicks using Sentinel-1: case study of the Moroccan exclusive economic zone. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 101375.

[8] Anderson, K., Ryan, B., Sonntag, W., Kavvada, A., Friedl, L. 2017. Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development. Geo-spatial Information Science, 20(2), 77-96.

[9] Das, K., Janardhan, P., Narayana, H. 2024. Mauritius oil spill detection using transfer learning approach for oil spill mapping and wind impact analysis using Sentinel-1 data. International Journal of Hydrology Science and Technology, 18(4), 421-444.

[10] Emery, W., Camps, A. 2017. Introduction to satellite remote sensing: atmosphere, ocean, land and cryosphere applications. Elsevier.
[11] Ahn, Y. J., Yu, Y. U., Kim, J. K. 2021. Accident cause factor of fires and explosions in tankers using fault tree analysis. Journal of Marine Science and Engineering, 9(8), 844.
[12] Bhattacharjee, S., Dutta, T. 2022. An overview of oil pollution and oil-spilling incidents. Advances in Oil-Water Separation, 3-15.
[13] Temitope Yekeen, S., Balogun, A. L. 2020. Advances in remote sensing technology, machine learning and deep learning for marine oil spill detection, prediction and vulnerability assessment. Remote Sensing 12(20), 1-31.
[14] Vekariya, D., Vaghasiya, M., Tomar, Y., Laad, P., Parmar, K. 2024. A Survey on Oil Spill Detection using SAR images in Machine Learning. In 2024 Parul International Conference on Engineering and Technology (PICET) (pp. 1-7). IEEE.
[15] Fu, G., Xie, X., Jia, Q., Tong, W., Ge, Y. 2020. Accidents analysis and prevention of coal and gas outburst: Understanding human errors in accidents. Process Safety and Environmental Protection, 134, 1-23.
[16] Han, W., Chen, J., Wang, L., Feng, R., Li, F., Wu, L., Tian T., Yan, J. 2021. Methods for small, weak object detection in optical high-resolution remote sensing images: A survey of advances and challenges. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 9(4), 8-34.
[17] Beisl, C. H., Mello, M. R., Elias, V., Becker, S., Carmo Jr, G. 2021. The Use of Radarsat-1 and Sentinel-1 Images for Seepage Slick Detection in Support of Deep-Water Petroleum Exploration in the Santos Basin, Brazil.
[18] Orhan, O., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Yalvac, S., Yakar, M. 2021. Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapınar region, Turkey: a multi-sensor InSAR time series study. Sensors, 21(3), 774.
[19] Karabörk, H., Makineci, H. B., Orhan, O., Karakus, P. 2021. Accuracy assessment of DEMs derived from multiple SAR data using the InSAR technique. Arabian Journal for Science and Engineering, 46(6), 5755-5765.
[20] Hoeser, T., Kuenzer, C. 2020. Object detection and image segmentation with deep learning on earth observation data: A review-part i: Evolution and recent trends. Remote Sensing, 12(10), 1667.
[21] Karunathilake, A., Ohashi, M., Kaneta, S. I., Chiba, T. 2022. Monitoring the spatial dispersion of an oil slick by enhancing and noise-filtering SAR images using SENTINEL-1 satellite repeat-pass observations. International Journal of Remote Sensing, 43(11), 4187-4207.
[22] Zhao, Z. Q., Zheng, P., Xu, S. T., Wu, X. 2019. Object detection with deep learning: A review. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 30(11), 3212-3232.
[23] Baghdady, S. M., Abdelsalam, A. A. 2024. Ten years of oil pollution detection in the Eastern Mediterranean shipping lanes opposite the Egyptian coast using remote sensing techniques. Scientific Reports, 14(1), 18057.
[24] Ghorbani, Z., Behzadan, A. H. 2020. Identification and instance segmentation of oil spills using deep neural networks. In 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engine.
[25] Tian, Y., Yang, G., Wang, Z., Li, E., Liang, Z. 2020. Instance segmentation of apple flowers using the improved mask R–CNN model. Biosystems engineering, 193, 264-278.
[26] Salau, J., Krieter, J. 2020. Instance segmentation with Mask R-CNN applied to loose-housed dairy cows in a multi-camera setting. Animals, 10(12), 2402.
[27] Guo, Z., Shi, Y., Ahmad, I. 2024. Design of smart citrus picking model based on Mask RCNN and adaptive threshold segmentation. PeerJ Computer Science, 10, e1865.
[28] Zhou, T., Li, Z., Zhang, C. 2019. Enhance the recognition ability to occlusions and small objects with Robust Faster R-CNN. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 10, 3155-3166.
[29] Pirinen, A., Sminchisescu, C. 2018. Deep reinforcement learning of region proposal networks for object detection. In proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (6945-6954).
[30] Nilsson, D., Pirinen, A., Gärtner, E., Sminchisescu, C. 2021. Embodied visual active learning for semantic segmentation. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (2373-2383).
[31] Mohammadiun, S., Hu, G., Gharahbagh, A. A., Li, J., Hewage, K., Sadiq, R. 2021. Intelligent computational techniques in marine oil spill management: A critical review. Journal of Hazardous Materials, 419, 126425.
[32] de Moura, N. V. A., de Carvalho, O. L. F., Gomes, R. A. T., Guimarães, R. F., de Carvalho Júnior, O. A. 2022. Deep-water oil-spill monitoring and recurrence analysis in the Brazilian territory using Sentinel-1 time series and deep learning. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 107, 102695.
[33] Zhang, J., Feng, H., Luo, Q., Li, Y., Zhang, Y., Li, J., Zeng, Z. 2022. Oil spill detection with dual-polarimetric Sentinel-1 SAR using superpixel-level image stretching and deep convolutional neural network. Remote Sensing, 14(16), 3900.
[34] Yang, Y. J., Singha, S., Mayerle, R. 2022. A deep learning based oil spill detector using Sentinel-1 SAR imagery. International Journal of Remote Sensing, 43(11), 4287-4314.
[35] Arslan, N. 2018. Assessment of oil spills using Sentinel 1 C-band SAR and Landsat 8 multispectral sensors. Environmental monitoring and assessment, 190(11), 637.

[36] Aksoy, İ., Erenoğlu, R. C. 2020. Sentinel-1 Uydu Verileriyle Petrol Sızıntısı Tespiti Üzerine Bir İnceleme: İzmir Aliağa Örneği. Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, 1(1), 80-87.
[37] Makineci, H. B. 2023. Spatio-temporal change detection of built-up areas with Sentinel-1 SAR data using random forest classification for Arnavutköy Istanbul. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 626-636.
[38] Öçer, N. E., Avdan, U. 2024. Mask R-CNN İle Uydu Görüntülerinde Gemi Tespiti. GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies, 7(1), 40-50.
[39] Şenol, H. İ. 2023. Gelişmiş Deniz Gözlemi: SAR Tabanlı Gemi Tespiti için CNN Algoritmalarının Kullanımı. Türkiye Lidar Dergisi, 5(1), 1-7.
[40] Doğanalp, S., Coşkuner, B., Makineci, H. B. 2024. Analysis of short-term Sentinel-1 data using the DInSAR method for monitoring displacement following the earthquakes of 6 and 20 February in Hatay city. Bulletin of Geophysics and Oceanography Vol, 65(4), 491-512.
[41] Arslan, N., Majidi Nezhad, M., Heydari, A., Astiaso Garcia, D., Sylaios, G. 2023. A principal component analysis methodology of oil spill detection and monitoring using satellite remote sensing sensors. Remote Sensing, 15(5), 1460.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

İnşaat Anlaşmazlıklarının Önlenmesi ve Çözümünde Etkili Faktörler: Erken Aşamalarda ve Resmi Yargı Sürecindeki Rolü

Mahmut Sarı[1], Savaş Bayram*[2]

[1] Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Kırşehir
*[2] Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri

(Alınış / Received: 17.12.2024, Kabul / Accepted: 19.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Construction Disputes,
Early Stage,
Litigation,
Attribute

Öz: İnşaat sektöründe yaşanan anlaşmazlıkların çözümü için başvurulan resmi yargı süreci, uzun sürebilmekte ve hem maddi hem de manevi kayıplara yol açmaktadır. Bu nedenle, anlaşmazlıkların erken aşamalarda çözülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, inşaat sektöründe sıkça karşılaşılan ve literatürde görece az çalışılan ayıplı ve kusurlu işlerden kaynaklanan anlaşmazlıklar ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, Yerel Mahkeme ve Yargıtay kararlarını etkileyen öznitelikleri belirleyerek, bu anlaşmazlıkların önlenmesine yönelik öneriler sunmaktır. Bu kapsamda, 2016-2021 yılları arasında Yargıtay'a intikal eden 104 adet gerekçeli karar incelenmiş ve 10 girdi öznitelik ile 2 hedef öznitelik olmak üzere toplam 12 öznitelik tespit edilmiştir. Öznitelikler arasındaki ilişki, ki-kare testi ve Cramer's V katsayıları kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, 'proje tipi', 'proje türü', 'davacı türü' ve 'anlaşmazlığın meydana gelme aşaması' özniteliklerinin hem Yerel Mahkeme hem de Yargıtay kararlarıyla anlamlı bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu özniteliklerin, planlama ve yönetim sürecinde daha dikkatli bir şekilde takip edilmesi, anlaşmazlıkların erken aşamalarda önlenmesine katkı sağlayabilir. Çalışmanın, inşaat sektöründe yaşanan anlaşmazlıkların çözüm sürecinin daha az kayıpla sonuçlanmasına ve sektördeki hukuki sorunların azaltılmasına olumlu katkılar sunacağı düşünülmektedir.

The Factors Influencing the Avoidance and Resolution of Construction Disputes: Role in the Early Stages and Litigation Process

Keywords
Construction Disputes,
Early Stage,
Litigation,
Attribute

Abstract: The litigation process applied for the resolution of disputes in the construction sector can take a long time and cause both material and moral losses. Therefore, it is of great importance to resolve disputes at early stages. In this study, disputes arising from defective and faulty works, which are frequently encountered in the construction sector and relatively little studied in the literature, are discussed. The aim of the study is to determine the attributes affecting the decisions of the Civil Court and the Court of Cassation and to provide suggestions for the prevention of these disputes. In this context, 104 reasoned decisions transferred to the Court of Cassation between the years 2016-2021 were analysed and a total of 12 attributes, 10 input attributes and 2 target attributes, were identified. The relationship between the attributes was analysed using chi-square test and Cramer's V coefficients. As a result of the analysis, it was found that the attributes of 'project type', 'project type', 'plaintiff type' and 'stage of dispute' have a significant relationship with both Local Court and Court of Cassation decisions. More careful monitoring of these attributes in the planning and management process may contribute to the prevention of disputes at early

stages. It is thought that the study will contribute positively to the resolution of disputes in the construction sector with less loss and to reduce the legal problems in the sector.

*İlgili Yazar, email: sbayram@erciyes.edu.tr

1. Giriş

İnşaat sektörü, gelişmekte olan ülkeler için ekonomik büyümenin temel itici güçlerinden biridir. Türkiye de bu bağlamda, Cumhuriyetin kuruluşundan bu yana artan nüfus, kentsel dönüşüm ihtiyaçları ve altyapı yatırımlarıyla birlikte inşaat sektörünü ekonomisinin önemli bir dinamiği haline getirmiştir. Özellikle konut, köprü, yol ve diğer altyapı projelerindeki artış, sektörün hem istihdam hem de gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) üzerinde önemli bir etki yaratmasını sağlamıştır. İnşaat sektörü, 200'den fazla alt sektörle doğrudan veya dolaylı olarak bağlantılı olması nedeniyle, ekonomik büyüme ve istihdam üzerinde çarpan etkisi yaratmaktadır [1]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2023 yılında Türkiye'nin GSYH'si bir önceki yıla göre %4.5 oranında artmış olup, inşaat sektörü bu büyümeye %7.8 oranında katkı sağlamıştır [2]. Bu veriler, inşaat sektöründeki büyümenin diğer sektörlerdeki genişlemeyi tetikleyerek genel ekonomik büyümeye önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir [3]. Ancak, sektörün bu dinamik yapısı, beraberinde bazı zorlukları da getirmektedir. Özellikle projelerin zamanında, bütçe dahilinde ve belirlenen kalite standartlarında tamamlanması, inşaat yönetiminin en kritik hedeflerinden biridir. Bu hedefe ulaşmak, taraflar arasındaki görev, sorumluluk ve hakların net bir şekilde tanımlanmasını gerektirir.

İnşaat projelerinde yaşanan anlaşmazlıklar, sektörün en önemli sorunlarından biridir. Son yıllarda, inşaat sektöründe ortaya çıkan anlaşmazlıklar ve bu anlaşmazlıklara bağlı olarak açılan davaların sayısı, hukuki mercilerde önemli bir artış göstermiştir [4,5]. Bu anlaşmazlıklar, doğaları, boyutları ve karmaşıklıkları açısından farklılık gösterse de, hepsinin ortak noktası zaman ve maliyet açısından yüksek bir yük oluşturmalarıdır [6]. Özellikle anlaşmazlıkların zamanında çözümlenmemesi durumunda, finansal kayıpların yanı sıra personel, zaman ve fırsat maliyetleri de artmaktadır. Bu nedenle, anlaşmazlıkları tetikleyen temel nedenlerin tanımlanması ve sınıflandırılması büyük önem taşımaktadır [7]. Bu nedenle, inşaat sektöründe anlaşmazlıkların temel nedenlerini ortaya koyan çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Yildizel, Dogan [8], Türk inşaat sektöründe yüklenici firmalarla yapılan anket çalışması sonucunda, anlaşmazlıklara neden olan başlıca faktörleri belirlemiştir. Bu faktörler arasında düşük kaliteli iş, geciken ödemeler, profesyonel olmayan şantiye yönetimi, kötü hazırlanmış sözleşmeler ve tasarım hataları öne çıkmaktadır. Benzer şekilde, Sarı [9], kamu tarafından yürütülen inşaat projelerinde yaşanan anlaşmazlıkları sınıflandırmıştır. İnşaat yapım sözleşmesinin uygulanması aşamasında yaşanan ihtilaflar Yargıtay ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına bağlı Yüksek Fen Kurulu (YFK) kararları açısından incelenmiştir ve bu anlaşmazlıkların beş ana başlık altında toplandığını tespit etmiştir: (i) ayıplı, eksik veya kusurlu işler, (ii) iş artışı veya eksilişi, (iii) proje süresi ve süre uzatımı, (iv) ödenmeyen iş bedeli, (v) sözleşmenin iptali ve idari uygulamalar.

Kamu projelerinde yaşanan anlaşmazlıkların sınıflandırılması, sektördeki yapısal sorunları anlamak açısından önemli bir adım olmuştur. Bu çalışmalar, anlaşmazlıkların çeşitli boyutlarını ortaya koyarken, Temiz [10] ise bu anlaşmazlıkların temel faktörlerini analiz ederek, sözleşme kaynaklı belirsizliklerin önemini vurgulamıştır. Temiz [10], Türkiye'deki inşaat projelerinde anlaşmazlıkları tetikleyen faktörleri belirlemek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması ve uzman görüşmeleri gerçekleştirmiş, ardından Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle bu faktörleri analiz etmiştir. Analiz sonuçları, anlaşmazlıkların en önemli temel faktörünün sözleşme kaynaklı belirsizlikler olduğunu ve bu kategorideki en kritik alt faktörün ise "sözleşme belgelerindeki eksiklikler ve belirsizlikler" olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, sözleşmelerin titizlikle hazırlanması gerekliliğini bir kez daha kanıtlamaktadır.

Sözleşme kaynaklı belirsizliklerin anlaşmazlıklara yol açtığı bu bulgular, inşaat projelerinde erken aşamalarda risk yönetiminin ne kadar kritik olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Ayhan ve Dikmen [11], anlaşmazlıkların önceden tahmin edilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım geliştirerek, makine öğrenimi tekniklerini kullanmışlardır. Ayhan, Dikmen [11], yaptıkları çalışmada inşaat projelerinde yaşanan anlaşmazlıkların erken aşamalarda tespiti için makine öğrenimi teknikleri kullanarak uyuşmazlığı tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Veriler için 75 inşaat firmasından 78 kişi ile görüşmeler yapılmıştır. Anlaşmazlık oluşumunu etkileyen proje bedeli, proje süresi, proje türü, sözleşme tipi alt faktörler olduğunu tespit etmişlerdir. Toplanan veriler üzerinde Ki-kare ve Cramer's V istatistikler analizler yapılmış. Analiz sonuçlarında 'proje bedeli', 'proje süresi' ve 'proje bölgesi' faktörleri ile anlaşmazlık gerçekleşme durumu arasında anlamlı bir ilişki olduğu bulunmuştur. Ün, Alboğa [12], inşaat sektöründe yaşanan uyuşmazlıkların resmi yargı yoluna gidilmeden çözüme kavuşması için uyuşmazlık hakkında paydaşlara öngörü kazandırılması amacıyla yaptıkları çalışmada, inşaat anlaşmazlıklarını konu alan 30 Yargıtay Kararı incelemişlerdir. Davaların %60'ının ayıplı/kalitesiz iş, %20'sinin

proje süresi, %10'unun ödemelerin geç yapılması, %7'sinin saha koşullarının farklı olması, %3'ünün değişiklik talimatlarından kaynaklandığı görülmüştür.

Türkiye'de inşaat sektörü, ekonomik büyüme ve kentsel dönüşüm projeleriyle birlikte hızla gelişen bir sektör olmasına rağmen, bu alanda yaşanan anlaşmazlıklar da artış göstermektedir. Özellikle ayıplı ve kusurlu iş anlaşmazlıkları, hem iş sahipleri hem de yükleniciler açısından ciddi mali ve hukuki sonuçlar doğurabilmektedir. Türk Borçlar Kanunu (TBK), eser sözleşmesine ilişkin düzenlemeleriyle ayıplı iş ve kusurlu iş kavramlarına önemli bir çerçeve sunmaktadır. TBK m. 470 ve devamı hükümlerine göre, eser sözleşmesi kapsamında yüklenici, işi taahhüt edilen nitelikte ve sözleşme şartlarına uygun olarak tamamlamakla yükümlüdür. Ayıplı iş, yüklenicinin işi eksik, kusurlu veya sözleşmede belirtilen standartlara uygun olmayacak şekilde ifa etmesi durumunu ifade eder. TBK m. 475 uyarınca, işin ayıplı olduğunun ortaya çıkması halinde, iş sahibi (müteahhit), ayıbın giderilmesini talep edebilir, iş bedelinde indirim isteyebilir veya sözleşmeyi feshedebilir. Ayrıca, TBK m. 476'da düzenlenen kusurlu iş hükümleri, yüklenicinin işin ifasında kusurlu davranması halinde ortaya çıkan sorumlulukları kapsar. İnşaat sektöründe özellikle haksız rekabetten kaynaklanan kalitesiz beton, malzeme üretimi, uygulama, işçilik hataları yapım kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [13]. İnşaat anlaşmazlıklarının nedenleri arasında önemli bir yere sahip olan ayıplı, kusurlu, eksik veya tamamlanamayan işlerin erken aşamalarda tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması, projenin belirlenen süre ve maliyette tamamlanmasını kolaylaştırır [14]. Literatürde bu konu ile ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Aljassmi and Han [15] tarafından, inşaat kusurları ile bu kusurların ana sebepleri arasındaki nedensellik ilişkisini daha iyi açıklamak için Dubai belediyesinin veri tabanından elde edilen veriler ile Dubai'deki konut inşaat endüstrisinde meydana gelen 81 anlaşmazlıktan kaynaklanan 272 kusur incelenmiştir. İnceleme sonucu bu kusurlu eylemler; %20 kötü işçilik, %20 zarar görmüş malzeme kullanımı, % 15 görev sırasının ihmali,%13 uygulama esnasında projede belirtilen boyutlardan sapma, %10 talimatların ihlali, %9 profesyonellerin kuralları ihlal etmesi, %7 resmi kurul uyum ihlali, %4 öğeler arasındaki koordinasyonun ihlali, %2 yanlış yönlendirici talimatın benimsenmesi olarak dokuz ana sınıfa kategorize edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından yola çıkılarak, genellikle beceri temelli hatalar ve ihlallerin söz konusu olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. İnşaat endüstrisinde faaliyet gösteren uygulayıcıların, saha üzerinde inşaat işlerini gerçekleştiren işçiler arasında beceri ve profesyonellik geliştirmeye odaklanmalarının faydalı olabileceği önerilmiştir. Ayrıca bu çalışma, inşaat paydaşlarına görünüşte önemsiz gelen ancak kötü işçilik vb. kusurların bir kısmının ortadan kaldırılmasıyla anlaşmazlık vb. problemlerin büyük bir bölümünü önleyebilecek kusurların, genelde göz ardı edildiğini ortaya koymaktadır. Kadam and Patil [16] tarafından, kötü işçilik üzerinde etkili olan nedenleri temellendirmek ve kötü işçilikten kaynaklanan kusurları analiz etmek amacıyla inşaat sektöründeki 10 profesyonel ile anket çalışması yapılmıştır. Anket verilerinin analizi sonucu, yapıda çeşitli kusurlara neden olan üç ana faktör; işçilerin yetersiz eğitimi, iş sahasında deneyim eksikliği, nitelikli ve eğitimli işçi eksikliği olarak tespit edilmiştir.

Türkiye'de inşaat sektörünün istihdam ve GSYH'deki payına bakıldığında, sektörün sürükleyici bir sektör olduğu görülmektedir [17]. Bu potansiyele sahip olan inşaat sektöründe yaşanan anlaşmazlıklar, maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır. Bu durum, çalışmanın problemini oluşturmaktadır. Ortaya çıkan kayıplar, inşaat sektörünün paydaşlarına zaman, maliyet ve kalite temel etmenleri bağlamında ciddi zararlar vermektedir. Literatüre bakıldığında, inşaat anlaşmazlıklarında ayıplı ve kusurlu işlerin öne çıktığı görülmektedir. Her ne kadar önemli bir konu olsa da ayıplı/kusurlu işlerden doğan anlaşmazlıklara yönelik çalışmanın yokluğu da literatürdeki boşluk olarak görülmüştür. Bu çalışma, resmi yargıya gidilmeden önce yerel mahkeme mahkeme ve Yargıtay kararlarındaki sonuçları etkileyen faktörleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Böylece tarafların, tespit edilen ve sonuçla anlamlı bir ilişkiye sahip olan öznitelikleri proje yönetim süreçlerinde uygulamaları ve takip ederken daha hassas ve dikkatli olmaları sağlanacaktır. Bu uygulama ile anlaşmazlıkların yaşanmamasına katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

İnşaat projelerinde taraflar arasında yaşanan anlaşmazlıkların çözülmesi için çeşitli sulh yolları mevcuttur. Türkiye'de yaşanan inşaat anlaşmazlıklarının çözümünde, resmi yargı ve tahkim sıklıkla kullanılmaktadır [18]. Tahkim çözüm yolu, alternatif bir anlaşmazlık çözüm yolu olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda alternatif çözüm yollarına rağbet olsa da resmi yargı çözüm yolu tercih edilmektedir [19]. Adalet sisteminde, adli ve idari hukuk olmak üzere iki farklı yargı kolu bulunmaktadır. Adli yargı; ilk derece mahkemeleri (ceza mahkemeleri ve hukuk mahkemeleri), ikinci derece mahkemeleri (bölge adliye mahkemeleri), ve Yargıtay kollarına ayrılır. Taraflar ilk derece veya ikinci derece mahkemesinin verdiği karara itiraz (temyiz) ettiği takdirde, dava Yargıtay merciine gider. Yargıtay temyiz sürecini inceler, denetler ve uyuşmazlığı nihai çözüme kavuşturur [20]. İnşaat sektöründe sözleşmenin uygulanması aşamasında yaşanan anlaşmazlıkların çözümünde adli yargı ve nihai olarak Yargıtay görevlidir. Bu çalışma kapsamında, inşaat sözleşmelerinin uygulanması aşamasında yaşanan Yargıtay'a intikal etmiş anlaşmazlıklar merkeze alınmıştır. Yargıtay 15. Hukuk Dairesi, özellikle eser sözleşmesi, inşaat, imar ve taşınmaz mallara ilişkin davalara bakmakla görevlidir. Bu daire, inşaat sektöründe yaşanan anlaşmazlıkların

çözümünde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, "Hukuktürk" ve "Legalbank" veri tabanları kullanılarak 2016-2021 yılları arasında inşaat projelerinde yaşanan ayıplı ve kusurlu iş uyuşmazlıklarına ait 104 adet gerekçeli Yargıtay kararı incelenmiştir [21, 22]. Ancak, 1 Temmuz 2021 tarihinde Yargıtay'da yapılan yapısal değişiklikler sonucunda, bu tür davalara bakma yetkisi 6. Hukuk Dairesi'ne devredilmiş ve birçok daire birleştirilmiştir. Bu değişiklik, yargısal süreçte tutarlılığı korumak amacıyla örneklemin 2021 yılında sonlandırılmasını gerektirmiştir. Ayrıca, 2016 yılından başlanmasının nedeni, hem yeterince geniş bir zaman dilimini kapsamak hem de örneklemin tutarlılığını sağlamaktır. Bu dönem, yargısal süreçteki değişikliklerden etkilenmeden, inşaat anlaşmazlıklarına ilişkin kararların tutarlı bir şekilde incelenebilmesine olanak tanımıştır.

İnceleme sonucunda 10 girdi öznitelik ile 2 hedef öznitelik olmak üzere toplam 12 öznitelik tespit edilmiştir. Tespit edilen öznitelikler nominal ve ordinal verilere dönüştürülmüştür. Bazı özniteliklerde tüm Yargıtay kararlarından veriler toplansa da bazı özniteliklerde eksik veriler olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise hâkimlerin aynı yazım kurgusuyla gerekçeli kararları yazmamaları ve tüm öznitelikleri içeren konulara değinmemeleridir. Bunun yanında, verilerin tespitinde eksik veriler olduğu görülmüştür. Yargıtay karar sonuçları ile tespit edilen diğer öznitelikler arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı irdelenmiştir. İstatistiksel verilerde nominal-ordinal veri arasındaki anlamlılık ilişkisinde parametrik olmayan teknikler kullanılmaktadır [23]. Nominal ve bağımsız iki değişken arasında istatistiksel bir anlamlılık olup olmadığını tespit etmek için ki-kare testi analizi kullanılır. Ki-kare anlamlılık düzeyi, $\alpha<0.05$ olarak kabul edilmektedir [24]. İki değişken arasındaki anlamlılığın gücünü ölçmek için ise Cramer's V katsayısı kullanılır. Cramer's V katsayısı 0 ve 1 arasında değer alır. Bu katsayı 0,15'ten büyükse güçlü, 0,25'ten büyükse çok güçlü bir anlam ilişkisi olduğunu gösterir [11]. Bunun için istatistiksel yöntemlerden nominal-nominal ve ordinal-nominal veriler arasındaki anlamlılık ilişkisi için ki-kare testi, anlamlılığın gücünün tespiti için ise Cramer's V katsayısı kullanılmıştır. Nominal verilerin arasındaki ilişki, bilgisayar paket programı olan olan IBM SPSS statistics 27.0.1 (Statistical Package for the Social Sciences) ile analiz edilmiştir.

3. Bulgular

Çalışmada 'Hukuktürk' ve 'Legalbank' gibi web siteleri aracılığı ile Yargıtay kararlarına erişim sağlanmıştır. Yargıtay kararlarına ve Literatür araştırmalarına baktığımızda inşaat anlaşmazlıklarının önemli bir kısmının ayıplı-kusurlu işlerden yaşandığı görülmektedir. Uygun anahtar kelimelerle filtreleme yapılarak 2016-2021 yılları arasında ayıplı-kusurlu iş ihtilaf sınıfına ait 104 adet gerekçeli Yargıtay kararına ulaşılmıştır. Yargıtay karar metinleri incelenerek 10 girdi öznitelik (G1-10) ve 2 hedef öznitelik (H1,H2) tespit edilmiştir (Tablo 1). Yargıtay karar metinlerinin aynı metin kurgusu ile yazılmaması ve bu metinlerde her bilginin verilmemesi sebebi ile bazı veriler tespit edilememiştir. Tespit edilebilen öznitelikler arasındaki ilişkinin anlamlığını ölçmek için ise Ki-kare bağımsızlık testi ve Cramer's V testi kullanılmıştır. Bu özniteliklere ait istatistiksel bulgular sırasıyla aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 1. Öznitelik Tablosu

Sıra No	Öznitelik Adı
G1	Proje İli
G2	Proje Tipi
G3	Sözleşme Tipi
G4	Proje Türü
G5	Proje Bedeli
G6	Proje Süresi
G7	Davacı Türü
G8	Davalı Türü
G9	Anlaşmazlık Bedeli
G10	Anlaşmazlığın Meydana Gelme Aşaması
H1	Yerel Mahkeme Kararı
H2	Yargıtay Kararı

Tablo 2. Proje İli İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G1-Proje İli	1-Marmara Bölgesi	9	%8,65
	2-Karadeniz Bölgesi	3	%2,88
	3-Ege Bölgesi	2	%1,92
	4-İç Anadolu Bölgesi	2	%1,92
	5-Doğu Anadolu Bölgesi	4	%3,84
	6-Akdeniz Bölgesi	3	%2,88
	Tespit Edilemeyen	81	%77,88
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 2'deki proje ili özniteliğine bakıldığında, kararların %8,65'nin Marmara Bölgesinde olduğu görülmüştür. Doğu Anadolu Bölgesi %3,84 ile ikinci sırada yer almaktadır. Akdeniz ve Karadeniz Bölgelerinde %2,88 ile aynı sayıda karar olduğu görülmektedir. Ege ve İç Anadolu Bölgelerinde de %1,92 ile aynı sayıda karar olduğu görülmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesinden veri elde edilememiştir. Tespit edilemeyen veri ise %77,88 olarak görülmektedir.

Tablo 3. Proje Tipi İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G2-Proje Tipi	1-Kamu iş	35	%33,65
	2-Özel sektör	69	%66,34
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 3'teki proje tipi özniteliğine bakıldığında, kararların %66,34'ünün özel sektöre, %33,65'inin ise kamu sektörüne ait olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Sözleşme Tipi İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G3-Sözleşme Tipi	1-Anahtar Teslim Götürü Bedel	93	%89,42
	2-Teklif Birim Fiyat Usulü Sözleşme	4	%3,84
	3- Yap-İşlet-Devret	0	%0
	Tespit edilemeyen	7	%6,73
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 4'te sözleşme tipi özniteliğine bakıldığında, sözleşmelerin ağırlıkla anahtar teslim götürü bedel olduğu, az miktarda da birim fiyat usul sözleşme yapıldığı görülmektedir. Tespit edilemeyen verilerin ise %6,73 oranında olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Proje Türü İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G4-Proje Türü	1-Konut	24	%23,07
	2-Endüstriyel	4	%3,84
	3-Ticari	2	%1,92
	4-Eğitim, Kültür ve Spor	13	%12,50
	5-Sağlık	2	%1,92
	6-Bakım, Onarım ve Restorasyon	13	%12,50
	7-Kamu Binaları	5	%4,80
	8-Kısmi İnşaat İşleri	14	%13,46
	9-Mekanik ve Elektrik İşleri	5	%4,80
	10-Altyapı ve Zemin İşleri	14	%13,46
	Tespit Edilemeyen	8	%7,69
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 5'e bakıldığında, tespit edilen kararların yaklaşık dörtte birinin konut türünde olduğu görülmektedir. Bunu kısmi inşaat işleri ve yine aynı oranda olan altyapı ve zemin işleri takip etmektedir. Devamında eğitim, kültür ve spor ve yine aynı oranda bakım, onarım, restorasyon işleri gelmektedir. Tespit edilemeyen verilerin ise %7,69 oranında olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Proje Bedeli İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G5-Proje Bedeli	1-0-100 000 TL	13	%12,50
	2-100 001 TL-500 000 TL	18	%17,30
	3-500 001 TL-1 000 000 TL	2	%1,92
	4-1 000 001 TL-5 000 000 TL	3	%2,88
	5-5 000 001 TL Üzeri	11	%10,57
	Tespit Edilemeyen	57	%54,80
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 6'daki proje bedeli özniteliğine bakıldığında, 1 milyon TL bedelin altındaki işler %31,72'yi, 1-5 milyon TL arası işler %2,88'i, 5 milyon TL ve üzeri bedelli işler %10,57'yi oluşturmaktadır. Tespit edilemeyen veri ise çoğunlukta olup %54,80 oranındadır.

Tablo 7. Proje Süresi İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
	1-0-365 Gün Arası	7	%6,73

G6-Proje Süresi	2-366-1095 Gün Arası	5	%4,80
	3- 1096-1825 Gün	2	%1,92
	Tespit edilemeyen	90	%86,53
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 7'de verilen proje süresi özniteliğine bakıldığında, üç yıldan az süreli işler %11,53, üzeri işler ise %1,92 şeklinde elde edilmiştir. Tespit edilemeyen veri sayısı ise %86,53 ile ağırlıktadır.

Tablo 8. Davacı Türü İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G7- Davacı Türü	1-Özel Sektör	86	%82,69
	2-Kamu	18	%17,30
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 8'e bakıldığında, davacılarının ezici çoğunluğunun özel sektör olduğu görülmektedir.

Tablo 9. Davalı Türü İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G8- Davalı Türü	1-Özel Sektör	92	%88,46
	2-Kamu	12	%11,53
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 9'daki davalı türü özniteliği verilerine bakıldığında, yine özel sektörün ezici çoğunluğa olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Anlaşmazlık Bedeli İstatistik Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G9-Anlaşmazlık Bedeli	1-0-100 000 TL	50	%48,07
	2-100 001 TL-500 000 TL	16	%15,38
	3-500 001 TL-1 000 000 TL	3	%2,88
	4-1 000 001 TL-5 000 000 TL	4	%3,84
	5-5 000 001 TL Üzeri	1	%0.96
	Tespit Edilemeyen	29	%27.88
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 10'daki ihtilafın bedeli özniteliğine bakıldığında %63,45'inin 500 bin TL'nin altında olduğu, %7,68'inin ise üstünde olduğu görülmektedir. Tespit edilemeyen veri sayısı ise %27,88 olarak elde edilmiştir.

Tablo 11. Anlaşmazlığın Meydana Gelme Aşaması Verileri

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
G10-Anlaşmazlığın Meydana Gelme Aşaması	1-Geçici Kabul Öncesi	72	%69,23
	2-Kesin Kabul Öncesi	12	%11.53
	3-Kesin Kabul Sonrası	20	%19.23
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 11'deki ihtilafın meydana gelme aşaması özniteliğine bakıldığında, ağırlıkla geçici kabul öncesi yaşandığı tespit edilmiştir.

Tablo 12. Yerel Mahkeme Kararı

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
H1-Yerel Mahkeme Kararı	1-Davacı Yararına	51	%49,03
	2-Davalı Yararına	53	%50.96
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 12'deki yerel mahkeme kararı özniteliğine bakıldığında, kararların yarı yarıya davacı ve davalı yararına oldukları görülmektedir. Yargıtay kararlarına bakıldığında Yerel Mahkemece Davacı Yararına verilen 51 kararın tamamı Yargıtay ilgili daire tarafından Bozma kararı ile bozulmuştur. Davalı yararına verilen 53 karardan 51'i Yargıtay tarafından Bozma kararı ile bozulmuş ve 2 karar ise Onama kararı ile onanmıştır.

Tablo 13. Yargıtay Kararı

Öznitelik Adı	Kategori	Sayısı	Yüzdesi
H2-Yargıtay Kararı	1-Davacı Yararına	51	%49,03
	2-Davalı Yararına	53	%50.96
	Toplam	**104**	**%100**

Tablo 13'teki Yargıtay kararı özniteliğine bakıldığında da kararların yarı yarıya davacı ve davalı yararına oldukları görülmektedir. Tablo 12 ve 13'teki taraf dağılım ve sayılarının aynı olduğu dikkat çekicidir. Kararlar incelendiğinde dağılım içerisindeki kararlar her iki mahkemede farklılık göstermektedir. Yerel Mahkeme'deki benzer kararların bir kısmı Yargıtay'da aynı taraf lehine sonuçlanmıştır. Kararların sonuç dağılımı sayısal olarak aynı olsa da her iki mahkemede farklılık göstermektedir. Yukarıda izah edildiği üzere elde edilen nominal veriler, bilgisayar paket programı olan IBM SPSS statistics 27.0.1 (Statistical Package for the Social Sciences) ile istatistik test tekniklerinden biri olan "Ki kare bağımsızlık testi" ve Cramer's V katsayıları ile analiz edilmiş olup sonuçlar Tablo 14'te sunulmuştur.

Tablo 14. Ki-kare ve Cramer' V analiz sonuçları

Öznitelik Adı	H1-Yerel Mahkeme Kararı		H2-Yargıtay Kararı	
	Pearson Chi-Square	Cramer's V	Pearson Chi-Square	Cramer's V
G1- Proje İli	0,447	0,455	0,291	0,517
G2- Proje Tipi	**0,000**	0,373	**0,001**	0,319
G3- Sözleşme Tipi	0,278	0,110	0,317	0,102
G4- Proje Türü	**0,001**	0,552	**0,001**	0,542
G5- Proje bedeli	0,260	0,335	0,260	0,335
G6- Proje süresi	0,647	0,249	0,647	0,249
G7- Davacı Türü	**0,000**	0,347	**0,007**	0,263
G8- Davalı Türü	0,587	0,053	0,493	0,067
G9- Anlaşmazlık Bedeli	0,053	0,353	0,136	0,305
G10- Anlaşmazlığın Meydana Gelme Aşaması	**0,038**	0,250	0,190	0,179

Tablo 14'te verildiği üzere, Yerel Mahkeme ve Yargıtay kararları tahmin özniteliği olarak değerlendirilmiştir. Proje ili ve Yerel Mahkeme kararı arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı Pearson ki-kare ile analiz edilmiştir. Proje Tipi ile Yerel Mahkeme kararı ($p=0.00<0.05$) ve Proje Tipi ile Yargıtay kararı ($p=0.001<0.05$) arasında anlamlı ilişki tespit edilmiştir. Anlamlılık güçlerine bakıldığı zaman ise proje tipi ile Yerel Mahkeme kararı (Cramer's $V=0.373>0.25$) ve proje tipi ile Yargıtay kararı (Cramer's $V=0.319>0.25$) arasında çok güçlü bir anlam ilişkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde; proje türü ile Yerel Mahkeme kararı ($p=0.001<0.05$) ve proje türü ve Yargıtay kararı arasında ($p=0.001<0.05$) anlamlı bir ilişki bulunduğu sonucuna varılmıştır. Proje türü ile Yerel Mahkeme kararı (Cramer's $V=0.552>0.25$) ve proje türü ile Yargıtay kararı (Cramer's $V=0.542>0.25$) arasında çok güçlü bir anlam ilişkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında; davacı türü ve Yerel Mahkeme kararı ($p=0.00<0.05$) arasında anlamlı bir ilişki bulunduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, davacı türü ve Yargıtay kararı (($p=0.007<0.05$) arasında da anlamlı bir ilişki bulunduğu sonucuna varılmıştır. Davacı türü ile Yerel Mahkeme kararı (Cramer's $V=0.347>0.25$) ve davacı türü ile Yargıtay kararı (Cramer's $V=0.263>0.25$) arasında çok güçlü bir anlam ilişkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak, ihtilafın meydana gelme aşaması ve Yerel Mahkeme kararı ($p=0.038<0.05$) arasında anlamlı bir ilişki bulunduğu sonucuna varılmıştır. İhtilafın meydana gelme aşaması ile Yerel Mahkeme kararı (Cramer's $V=0.25>0.15$) arasında güçlü bir anlam ilişkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak ile İhtilafın meydana gelme aşaması ile Yargıtay kararı (Cramer's $V=0.179<0.25$) arasında bir anlam ilişkisi tespit edilememiştir. Bunlar dışındaki öznitelikler için de anlamlı ilişki bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

İnşaat sözleşmelerinin uygulanması aşamasında yaşanan ayıplı ve kusurlu işlerden dolayı ortaya çıkan anlaşmazlıkları etkileyen özniteliklerin tespitine yönelik bir çalışma ortaya konulmuştur. Literatürdeki bu anlaşmazlık türüne yönelik çalışmaların azlığı, literatürdeki boşluk olarak nitelendirilmiş ve bu konu araştırma konusu olarak belirlenmiştir. Ayıplı ve kusurlu işlerde anlaşmazlığa neden olan özniteliklerin belirlenmesi, tarafların resmi yargılamadan doğacak olası sonuçları erkenden algılamalarına imkân sağlayacaktır. Bu imkân, tarafların olası sonuçlara yönelik daha yapıcı adımlar atmalarına vesile olabilir. Bu açıdan, çalışma özgünlüğü ile ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, Türkiye'de inşaat sektöründe yaşanan ayıplı ve kusurlu iş anlaşmazlıklarının karar sonuçları üzerinde proje tipi, proje türü, davacı türü ve anlaşmazlığın meydana gelme aşaması gibi özniteliklerin anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Proje tipi açısından incelendiğinde, incelenen 104 dosyanın %66,34'ü (69 dosya) özel sektör projeleri iken, %33,65'i (35 dosya) kamu işleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dağılım, örneklemimizde özel sektör projelerine ilişkin anlaşmazlıkların daha fazla olduğunu göstermektedir. Proje türüne göre ise, en fazla anlaşmazlık konut projelerinde (%23,07) görülmekte, bunu kısmi inşaat işleri (%13,46) ve altyapı ile zemin işleri (%13,46) takip etmektedir. Bu durum, konut projelerinde yaşanan ayıplı iş anlaşmazlıklarının genellikle işçilik kalitesi veya malzeme standartlarıyla ilgili sorunlarla ilişkili olduğunu ortaya koyarken, altyapı projelerinde ise teknik hatalar veya mühendislik

eksikliklerinin daha sık görüldüğünü göstermektedir. Türk Borçlar Kanunu (TBK) m. 470 ve devamı hükümleri, eser sözleşmesi kapsamında yüklenicinin taahhüt ettiği işi eksiksiz ve kusursuz bir şekilde tamamlama yükümlülüğünü düzenlemekte olup, bu yükümlülüğün proje tipine ve türüne göre farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, davacı türü de karar sonuçlarını etkileyen önemli bir faktördür. İncelenen 104 dosyanın 86'sında davacı özel sektör temsilcileri iken, yalnızca 18 dosyada kamu kurumları tarafından dava açıldığı görülmektedir. Bu dağılım, örneklemimizde özel sektör temsilcilerinin dava açma oranının kamu kurumlarına kıyasla daha yüksek olduğunu yansıtmaktadır. Anlaşmazlığın meydana gelme aşaması ise, karar sonuçları üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. İncelenen davaların %69,23'ü (72 dosya) geçici kabul öncesi, %11,53'ü (12 dosya) kesin kabul öncesi ve %19,23'ü (20 dosya) kesin kabul sonrası aşamalarda ortaya çıkmıştır. Bu veriler, örneklemimizde anlaşmazlıkların büyük ölçüde projenin erken aşamalarında (geçici kabul öncesi) yoğunlaştığını göstermektedir. TBK m. 475 ve 476 hükümleri, bu aşamalara bağlı olarak iş sahibine tanınan hakların (ayıbın giderilmesi, iş bedelinde indirim veya sözleşmenin feshi) nasıl uygulanacağına dair önemli bir çerçeve sunmaktadır. Dolayısıyla, bu özniteliklerin karar sonuçları üzerindeki etkisi, TBK'nın eser sözleşmesine ilişkin hükümlerinin pratikte nasıl işlediğini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Ün, Alboğa [12], çalışmalarında yaşanan 30 inşaat anlaşmazlığı için ayıplı ve kalitesiz işlerin ana anlaşmazlık nedeni olduğunu tespit etmişlerdir. Ayıplı ve kalitesiz işlerin altında yatan nedenlerin çoğunluğunun sözleşmedeki belirsizlikler olduğu görülmüştür. Bir diğer çalışmada ise Aljassmi and Han [15], 81 inşaat anlaşmazlığını inceleyerek anlaşmazlıkların %20'sinin kalitesiz işçilikten kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Yildizel, Dogan [8], "tamamlanan işlerdeki düşük iş kalitesi" adlı faktörü anlaşmazlıkların nedenleri arasında ilk sırada tespit etmişlerdir. Bu yönler dikkate alındığında, mevcut çalışmanın ayıplı ve kusurlu işlerden kaynaklı anlaşmazlıklara odaklanması literatürdeki çalışmalarla örtüşmektedir. Çalışma kapsamında tespit edilen 10 öznitelik Sarı, Sayın [25] tarafından yapılan çalışma ile "Sözleşme tipi" ve "Kazanan taraf bilgisi" öznitelikleri açısından örtüşmektedir. "Kazanan taraf bilgisi", mevcut çalışma çıktı özniteliği olarak değerlendirilmiştir. Diğer örtüşen öznitelik olan "Sözleşme tipi" özniteliği ise yapılan istatistiksel analizler neticesinde hedef öznitelikleri ile anlamlı ilişki göstermediğinden dolayı Sarı, Sayın [25]'nın çalışması ile farklılık göstermektedir. Bu farklılık, mevcut çalışmada tespit edilen özniteliklere yönelik anlamlılık testlerinin uygulanmamasından kaynaklanabilir.

Diğer yandan Temiz [10], Türkiye'deki yapım projelerinde anlaşmazlıklara neden olan faktörleri belirleme ve bu faktörleri ana ve alt kategorilere ayırmayı amaçlamıştır. Bunun için kapsamlı bir literatür araştırması ve 10 uzman ile görüşmeler gerçekleştirmiştir. Görüşmeler sonucu bulgular analiz edilerek önem dereceleri tespit edilmiştir. Uzman görüşmelerinin analizi sonucunda, anlaşmazlıklara neden olan sözleşme kaynaklı faktörün en önemli alt faktörü sözleşme belgelerindeki eksiklik ve belirsizlik olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada belirlenen 'sözleşme' faktörü, çalışmamızdaki 'sözleşme tipi' özniteliği ile örtüşmektedir. Sözleşme tipi özniteliği ile yapılan istatistiksel işlemler neticesinde hedef öznitelik ile anlamlı bir ilişki görülmediğinden dolayı, mevcut çalışma Temiz [9]'in çalışması ile farklılık göstermektedir. Ün, Alboğa [12], anlaşmazlığın ana nedeninin %60 oranında ayıplı/kusurlu iş olduğunu tespit etmişlerdir. Alt faktörler incelendiğinde, mahkeme kararları ile davanın tarafları arasında anlamlı bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, davacı türü özniteliği yapılan istatistiksel işlemler neticesinde hedef öznitelik ile anlamlı bir ilişki gösterdiğinden dolayı Ün, Alboğa [12]'nin yaptığı çalışma ile örtüşmektedir.

Ayhan, Dikmen [11], veri analiz sonuçlarında mevcut çalışmaya benzer şekilde 'proje bedeli', 'proje süresi' ve 'proje bölgesi' faktörleri ile anlaşmazlık gerçekleşme durumu arasında anlamlı bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada tespit edilen 'proje bedeli', 'proje süresi' ve 'proje bölgesi' öznitelikleri ile mevcut çalışmada tespit edilen 'proje bedeli', 'proje süresi' ve 'proje bölgesi' öznitelikleri örtüşmektedir. 'Proje bedeli', 'proje süresi' ve 'proje bölgesi' öznitelikleri, yapılan istatistiksel işlemler neticesinde hedef öznitelik ile anlamlı bir ilişki göstermediğinden dolayı mevcut çalışma, Ayhan, Dikmen [11] ile farklılık göstermektedir. Bu çalışma, belirli bir inşaat anlaşmazlığına odaklanan Türkiye ile sınırlı bir çalışmadır. Bu farklılığın nedenleri arasında ilgili çalışmanın farklı ülkelerin farklı hukuk sistemlerini içermesi, inşaat anlaşmazlıklarının tamamına yönelik olması ve çalışmada anket verilerinin kullanılması sayılabilir. Bunun yanında, Ayhan, Dikmen [11]; 'proje türü' ve 'proje tipi' faktörleri ile anlaşmazlık arasında, mevcut çalışmanın aksine anlamlı bir ilişki bulamamışlardır. Bu farklılığın nedeni, sözleşme tipleri anlamında ciddi farklılıkların olması ve proje tiplerinin coğrafi olarak farklılık göstermesi olarak değerlendirilebilir. Her iki çalışmada da istatistiksel sonuçlara bakıldığında, "sözleşme tipi" özniteliği ile hedef öznitelik arasında anlamlı bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu açıdan ilgili çalışma ile mevcut sonuçlar örtüşmektedir.

Bu çalışma, inşaat sektöründe yaşanan ayıplı ve kusurlu işlerden kaynaklanan anlaşmazlıkların erken aşamalarda önlenmesine yönelik kritik bir ihtiyacı karşılamayı hedeflemektedir. İnşaat projelerinde yaşanan anlaşmazlıklar, yalnızca maliyet ve zaman kaybına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda projelerin kalitesini ve taraflar arasındaki güveni de olumsuz etkiler. Resmi yargı sürecine başvurmak, hem uzun süren hukuki süreçler hem de yüksek maliyetler nedeniyle taraflar için ciddi bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle, anlaşmazlıkları etkileyen faktörlerin

tespit edilmesi ve bu faktörlere yönelik erken aşamalarda önlemler alınması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada belirlenen "proje tipi", "proje türü", "davacı türü" ve "anlaşmazlığın meydana gelme aşaması" gibi öznitelikler, inşaat projelerinin planlama ve yönetim süreçlerinde daha proaktif bir yaklaşım benimsenmesine olanak tanıyabilir. Örneğin, proje başlangıcında bu öznitelikler dikkate alınarak riskler öngörülebilir ve gerekli tedbirler alınabilir. Bu sayede, anlaşmazlıklar resmi yargı sürecine taşınmadan çözülebilir, hem taraflar arasındaki ilişkiler korunabilir hem de projelerin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanması sağlanabilir.

Ayrıca, bu çalışmada tespit edilen öznitelikler, gelecekte karar destek modellerinin geliştirilmesine önemli bir zemin hazırlamaktadır. Bu modeller, özellikle inşaat projelerinin erken aşamalarında anlaşmazlık risklerini öngörmek ve bu risklere yönelik önleyici tedbirler önermek amacıyla kullanılabilir. Örneğin, yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleriyle geliştirilecek karar destek sistemleri, proje yöneticilerine anlaşmazlık risklerini minimize edecek stratejiler sunabilir. Bu tür modeller, inşaat sektöründe daha verimli, şeffaf ve adil bir süreç yönetimine katkı sağlayabilir. Bu çalışma, literatürdeki eksikliği gidermenin yanı sıra, inşaat sektöründe anlaşmazlıkların önlenmesine yönelik yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine de önemli bir katkı sunmaktadır. Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalara kıyasla anlaşmazlıkların erken dönemine yönelik olması ve belirli bir anlaşmazlık türüne odaklanması, özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra her ne kadar en üst karar merci olan Yargıtay kararları kullanılsa da ele alınan kararların Türkiye ile sınırlı olması ve belirli bir anlaşmazlığa odaklanması, çalışmanın sınırlılıklarıdır. Veri sayısı arttırılarak belirli bir anlaşmazlık türüne ait daha güçlü sonuçlar ortaya konulabilir. Ayrıca Yargıtay kararlarının anlaşmazlık yaşanan inşaat projelerine ait detaylı bilgiler veren ve anlaşmazlık sürecine ait daha fazla bilgi içeren bir yazma stiline sahip olması durumunda bu konudaki çalışmaların önü açılabilir. Böylece daha çok öznitelik tespit edilmesinin yolu açılmış olacaktır. Farklı konularda meydana gelen inşaat anlaşmazlıklarında da çalışmada kullanılan yöntem uygulanarak benzer sonuçlar alınabilir. Her anlaşmazlığı etkileyen özniteliklerin farklı olacağı düşünüldüğünde, farklı sonuçlar elde edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122G126 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

[1] Bilgin, M.S., Türkiye'deki inşaat sektörü ve ekonomik büyüme ilişkisi (2000-2020)= The relationship between the construction industry and economic growth in Turkey (2000-2020). 2023, Sakarya Üniversitesi.

[2] TUIK, T.S.I., Dönemsel Gayrisafi Yurt İçi Hasıla, IV. Çeyrek: Ekim-Aralık ve Yıllık, 2023. 2023.

[3] Tormuş, N.B., İslam ülkelerinde inşaat sektörü ve ekonomik büyüme ilişkisi: Panel veri analizi. 2020: Necmettin Erbakan University (Turkey).

[4] Daşdelen, A., Yapım yönetimi eğitiminde inşaat hukuku. 2006, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[5] Sarı, M., Savaş Bayram, and E. Aydemir, Construction-Related Disputes: A Comprehensive Bibliometric Investigation in The 8th International Project and Construction Management Conference (IPCMC 2024), S.U. Kerim Koç, Serkan Kıvrak, Editor. 2024: İstanbul. p. 507-518.

[6] Farooqui, R.U., S. Azhar, and M. Umer. Key causes of disputes in the Pakistani construction industry-assessment of trends from the viewpoint of contractors. in 50th ASC Annual International Conference. 2014.

[7] Jelodar, M.B., T.W. Yiu, and S. Wilkinson. Sources of conflict and dispute as impediments to sustainability of construction relationships. in 38th Annual Conference of the Australasian Universities Building Educators Association (AUBEA), Auckland, New Zealand. 2013.

[8] Yildizel, S., et al., Major constructional dispute causes in Turkey. Archives of Civil Engineering, 2016(4).

[9] Sarı, M., Investigation in the framework of jurisdictions of conflicts in public construction, in Institute of science and technology. 2019, Istanbul University.

[10] Temiz, E., Türkiye'deki Yapım Projelerinde Anlaşmazlıklara neden olan Faktörlerin Analizi. 2020.

[11] Ayhan, M., I. Dikmen, and M.T. Birgönül, Predicting the Occurrence of Construction Disputes Using Machine Learning Techniques. Journal of Construction Engineering and Management, 2021. 147(4).

[12] Ün, B., Ö. Alboğa, and E. Erdiş, İnşaat Sözleşmeleri Kaynaklı Uyuşmazlıkların Yargıtay Kararları Özelinde İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2023. 6(Ek Sayı): p. 168-183.

[13] Koçu, N. and M. Dereli, Betonarme karkas yapılarda malzeme, tasarım, uygulama hataları ve deprem etkilerinin araştırılması. Deprem Sempozyumu, 2005.

[14] Bagdiya, N. and S. Wadalkar, Review paper on construction defects. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2015. 12(2): p. 88-91.

[15] Aljassmi, H.A. and S. Han, Classification and occurrence of defective acts in residential construction projects. Journal of Civil Engineering and Management, 2014. 20(2): p. 175-185.

[16] Kadam, S. and S. Patil, Defects and Reasons of Poor Workmanship in Construction Industry. 2020.

[17] KPMG, KPMG Perspektifinden İnşaat Sektörüne Bakış. 2021.

[18] Bozkurt, M., İnşaat uyuşmazlıklarının tahkim yolu ile çözümü. 2002, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[19] Justice, T.M.o., General Directorate of Judicial Records and Statistics. 2023.

[20] Justice, T.M.o., Turkish Justice System. 2024.

[21] Legalbank. Decisions of Court of Cassation. 2024 [cited 2024; Available from: https://legalbank.net/arama.

[22] Hukukturk, Database. 2024, Hukukturk.

[23] Kubat, A. and T. Ayaşlıgil, Doğa bilimlerinde ki-kare bağımsızlık testi ve tek yönlü varyans analiz testi uygulamasında SPSS programı kullanımı. Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 2002. 52(1): p. 155-167.

[24] Güngör, M., Ki-kare testi üzerine. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 2008. 7(1): p. 84-89.

[25] Sarı, M., B. Sayın, and C. Akçay, Classification and resolution procedure for disputes in public construction projects. Revista de la Construcción. Journal of Construction, 2021. 20(2): p. 259-276.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Tam Graflardan Türetilen Bazı Özel Grafların Wiener Tipinde Topolojik İndeksleri

Hatice Topcu[*1], **Eda Güner**[2]

[*1] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü, NEVŞEHİR
[2] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, NEVŞEHİR

(Alınış / Received: 14.01.2025, Kabul / Accepted: 10.02.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Ananas graf,
Deniz kestanesi graf,
Kırık deniz kestanesi graf,
Tam tırtıl,
Uçurtma graf,
Çift uçurtma graf,
Wiener tipinde topolojik indeksler

Öz: Topolojik indeksler başta kimyasal graflar olmak üzere birçok uygulamaya sahip olan sabit sayılardır. Uygulaması yalnızca kimya alanında değil, bilgisayar bilimi, ağ oluşturma vb. alanlarda da yapılabilir. Dolayısıyla, graf teoride birçok topolojik indeks mevcuttur. Bu çalışmada özel olarak seçilen Wiener tipinde mesafe bazlı topolojik indeksler olan Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary, Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener ve Terminal Wiener indeksleri ele alınmıştır. İyi bilinen n noktalı yol graf P_n ve tam graf K_n için burada belirtilen Wiener tipindeki topolojik indeks değerleri literatürde yer almakta olup bu çalışmada kullanılmak üzere mertebelerine bağlı olacak biçimde tekrar hesaplanmıştır. Daha sonra bu hesaplamadan yararlanarak tam graf bazlı özel graf türleri olan ananas graf, deniz kestanesi graf, kırık deniz kestanesi graf, uçurtma graf ve çift uçurtma grafların burada belirtilen Wiener tipinde topolojik indeksleri graf parametrelerine dayalı biçimde hesaplanarak sunulmuştur. Ayrıca ananas, deniz kestanesi ve kırık deniz kestanesi grafların tam tırtıl grafların özel durumları olduğu belirtilerek, tam tırtıl graflar için de Wiener tipinde topolojik indeksler graf parametrelerine dayalı biçimde elde edilmiştir.

Wiener Type Topological Indices of Some Graphs Derived From Complete Graphs

Keywords
Pineapple graph,
Urchin graph,
Broken urchin graph,
Complete caterpillar,
Kite graph,
Double kite graph,
Wiener type topological indices

Abstract: Topological indices are constant numbers that have many application, especially in chemical graphs. Its applications are not only in the field of chemistry, but also in computer science, networking, etc. Therefore, there are many topological indices in graph theory. In this work, specially selected Wiener type distance-based topological indices, Wiener, Wiener polarity, Hyper Wiener, Harary, reciprocal complementary Wiener and terminal Wiener indices, are discussed. The Wiener type topological indices mentioned here for the well-known n vertices path graph P_n and the complete graph K_n are available in the literature and have been recalculated depending on their orders to be used in this work. Then, by using this calculation, the wiener type topological indices of the complete graph based special graph types, namely, pineapple graph, urchin graph, broken urchin graph, kite graph and double kite graphs, are calculated and presented based on graph parameters. In addition, it was stated that pineapple, urchin and broken urchin graphs are special cases of complete caterpillar graph, and Wiener type topological indices were obtained for complete caterpillar graph based on graph parameters.

*İlgili Yazar, email: haticekamittopcu@gmail.com

1. Giriş

Boştan farklı noktalar kümesi $V(G)$ ve $V(G)$ nin iki elemanlı alt kümelerinden oluşan $E(G)$ kenarlar kümesinin birlikte oluşturduğu $G = \big(V(G), E(G)\big)$ yapısına bir graf (graph) denir. Katlı kenar (bir nokta çifti arasında birden fazla kenar bulunması, multiple edge) ve ilmek (bir noktayı kendisine bağlayan kenar, loop) içermeyen bir grafa ise basit graf (simple graph) denir. Bütün kenarlarına yön tayin edilmiş bir grafa yönlü graf (directed graph), hiçbir kenarına yön tayin edilmemiş bir grafa ise yönsüz graf (undirected graph) denir. Bu çalışmada yer alan tüm graflar basit ve yönsüzdür. $V' \subseteq V(G)$ ve $E' \subseteq E(G)$ olmak üzere $G' = (V', E')$ grafına, G nin bir alt grafı

(subgraph) denir. G de bazı noktaların seçilip, bu noktalara değen tüm kenarların silinmesiyle oluşan alt grafa ise G nin bir indirgenmiş alt grafı (induced subgraph) denir. G de keyfi bir u noktasının derecesi, o noktaya değen tüm kenarların sayısıdır ve $\deg_G(u)$ ya da kısaca $\deg(u)$ biçiminde gösterilir. Derecesi sıfır olan bir noktaya izole nokta (isolated vertex) denir. Derecesi 1 olan bir noktaya ise sarkıt nokta (pendant vertex) ve bu noktaya değen kenara sarkıt kenar (pendant edge) denir. G de keyfi iki u, v noktaları arasında nokta tekrar etmeyen bir yürüyüşe bir $u-v$ yolu ($u-v$ path) denir. Bir $u-v$ yolunda kullanılan kenar sayısına ise bu yolun uzunluğu (length) denir. u dan v ye en kısa yollardan her birine bir $u-v$ jeodeziği ($u-v$ geodesic) denir ve bu jeodeziğin uzunluğuna u ile v arasındaki mesafe (distance) denir, $d_G(u,v)$ ile gösterilir. Bir G grafında noktalar arası uzaklıkların en büyüğüne ise G nin çapı (diameter) denir ve $diam(G)$ ile gösterilir. Yani $diam(G) = max_{u,v\in V(G)}\{d_G(u,v)\}$ biçimindedir. n adet nokta içeren bir G çizgesinde bütün nokta çiftleri arasında bir kenar bulunuyorsa bu grafa özel olarak tam graf (complete graph) denir ve K_n ile gösterilir. n noktalı, $n-1$ kenarlı ve sarkıt iki noktası arasında bir yol oluşturan grafa ise yol graf (path graph) denir ve P_n ile gösterilir. Bu çalışmada yer alan kavramları da içeren daha genel temel graf teori bilgisi için [1] nolu kaynak önerilmektedir.

Topolojik indeksler, graf teorisinde bir grafın yapısal özelliklerini ve karakteristiklerini belirlemek için kullanılan nümerik değerlerdir. Kimya, biyoloji, bilgisayar bilimi gibi çeşitli alanlarda yaygın ve etkin kullanım alanına sahiptirler. Derece ve mesafe gibi graf parametrelerine dayalı olarak hesaplanırlar. Literatürde en iyi bilinen mesafe bazlı topolojik indeks, 1947de Harold Wiener tarafından tanıtılan Wiener indeksidir[2]. Bir G moleküler grafının Wiener indeksi, G deki sıralı olmayan nokta çiftleri arasındaki uzaklıkların toplamıdır ve $W(G)$ ile gösterilir. Literatürde iyi bilinen Wiener tipinde diğer topolojik indeksler; Wiener polarite indeksi $W_P(G)$, Hiper Wiener indeksi $WW(G)$, Harary indeksi $H(G)$, Karşılıklı tamamlayıcı Wiener indeksi $RCW(G)$ ve Terminal Wiener indeksi $TW(G)$ dir[3-4].

Bu çalışmada literatürde iyi bilinen [5-8] ve çeşitli spektral özelliklerinden dolayı üzerinde yaygın biçimde çalışılan tam graf bazlı özel graf türleri olan ananas graf (pineapple graph), deniz kestanesi graf (urchin graph), kırık deniz kestanesi graf (broken urchin graph), uçurtma graf (kite graph) ve çift uçurtma grafların (double kite graph) Wiener tipinde topolojik indeksleri graf parametrelerine dayalı biçimde hesaplanarak sunulmuştur. Ananas, deniz kestanesi ve kırık deniz kestanesi graflar ayrıca tam tırtıl (complete caterpillar) grafların özel durumları olduğundan, tam tırtıl graflar için de Wiener tipinde topolojik indeksler graf parametrelerine dayalı biçimde elde edilmiştir.

2. Önbilgiler

Bu çalışmada özel olarak seçilen iyi bilinen Wiener tipinde topolojik indekslere ait tanımlar sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

Tanım 2.1: (Wiener İndeks)
$G = (V(G), E(G))$ moleküler grafı verilsin. G de keyfi u, v noktaları arasındaki mesafe $d_G(u,v)$ olmak üzere,

$$W(G) = \sum_{\{u,v\}\subseteq V(G)} d_G(u,v) = \frac{1}{2}\sum_{u,v\in V(G)} d_G(u,v)$$

biçiminde tanımlıdır[2].

Tanım 2.2: (Wiener Polarite İndeks)
$G = (V(G), E(G))$ moleküler grafı verilsin. G de aralarındaki mesafe 3'e eşit olan nokta çiftlerinin sayısıdır. Yani,

$$W_P(G) = |\{\{u,v\} \subseteq V(G): d_G(u,v) = 3\}|$$

biçiminde olur[3].

Tanım 2.3: (Hiper Wiener İndeks)
1993 te Milan Randić tarafından tanıtılmıştır[9]. 1995 te Klein, Lukovits ve diğerleri tarafından revize edilerek aşağıdaki gibi formülize edilmiştir[10]. $G = (V(G), E(G))$ moleküler grafı verilsin.

$$WW(G) = \frac{1}{2}\sum_{\{u,v\}\in V(G)} [d_G(u,v) + d_G(u,v)^2]$$

biçiminde tanımlıdır.

Tanım 2.4: (Harary İndeks)
1993 te Plavšić[11] ve Ivanciuc[12] de birbirinden bağımsız olarak tanıtılmıştır. $G = (V(G), E(G))$ moleküler grafı verilsin.

$$H(G) = \sum_{\{u,v\}\in V(G)} \frac{1}{d_G(u,v)}$$

biçiminde tanımlıdır.

Tanım 2.5: (Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener İndeks)
2000 de Ivanciuc tarafından tanıtılmıştır[13-14]. $G = (V(G), E(G))$ moleküler grafı verilsin. G nin çapı $diam(G) = d$ olmak üzere,

$$RCW(G) = \sum_{\{u,v\}\in V(G)} \frac{1}{d + 1 - d_G(u,v)}$$

biçiminde tanımlıdır.

Tanım 2.6: (Terminal Wiener İndeks)
Petrović ve diğerleri tarafından 2009 da tanıtılmıştır[15]. $G = (V(G), E(G))$ moleküler grafı verilsin. G deki sarkıt noktaların kümesi $V_1(G)$ olmak üzere,

$$TW(G) = \sum_{\{u,v\}\subseteq V_1(G)} d_G(u,v)$$

biçiminde tanımlıdır.

Bu çalışmada özel olarak seçilip incelenen tam graf bazlı yapıya sahip graflara dair tanımlar aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

Tanım 2.7: (Ananas Graf)
$p \geq 3$ ve $q \geq 1$ olmak üzere, p noktalı K_p tam grafının belirli bir noktasına q adet sarkıt kenar eklenmesiyle oluşan grafa ananas (pineapple) graf denir[5-6].

Tanım 2.8: (Deniz Kestanesi Graf)
$p \geq 3$ olmak üzere, p noktalı K_p tam grafının her bir noktasına bir adet sarkıt kenar eklenmesiyle oluşan grafa deniz kestanesi (urchin) graf denir[7].

Tanım 2.9: (Kırık Deniz Kestanesi Graf)
$p \geq 3$, $q \geq 1$ ve $q < p$ olmak üzere, p noktalı K_p tam grafının q adet noktasına birer adet sarkıt kenar eklenmesiyle oluşan grafa kırık deniz kestanesi (broken urchin) graf denir[7].

Tanım 2.10: (Tam Tırtıl Graf)
$p \geq 3$ ve $q \geq 1$ olmak üzere, q adet sarkıt nokta içeren ve içerdiği bütün sarkıt noktalar silindiğinde oluşan indirgenmiş alt grafın K_p tam grafına izomorf olduğu grafa tam tırtıl (complete caterpillar) graf denir. Tanım 2.7, Tanım 2.8. ve Tanım 2.9 da verilen ananas, deniz kestanesi ve kırık deniz kestanesi graflar tam tırtıl grafların özel halleridir.

Tanım 2.11: (Uçurtma Graf)
$p \geq 3$ ve $q \geq 1$ olmak üzere, p noktalı K_p tam grafının belirli bir noktasına q adet nokta içeren P_q yol grafın eklenmesiyle oluşan grafa uçurtma (kite) graf denir[8].

Tanım 2.12: (Çift Uçurtma Graf)
$p, q \geq 3$ ve r ≥ 1 olmak üzere, r adet nokta içeren P_r yol grafının sarkıt noktalarına sırasıyla p noktalı K_p tam grafının ve q noktalı K_q tam grafının eklenmesiyle oluşan grafa çift uçurtma (double kite) graf denir[8].

3. Bulgular

n noktalı yol graf P_n ve tam graf K_n iyi bilinen graflardır ve Wiener tipindeki topolojik indeksleri literatürde yer almakta ve kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu çalışmada yine de Önerme 3.1 ve Önerme 3.2 de bu grafların Wiener tipindeki topolojik indeksleri mertebelerine bağlı olacak biçimde hesaplanmıştır.

Önerme 3.1: n noktalı yol graf P_n için Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary, Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener ve Terminal Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir. n. harmonik sayı $H_n = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k}$ olmak üzere,

(**i**) $W(P_n) = \dfrac{n\,(n^2-1)}{6}$ (1)

(**ii**) $n \geq 4$ için $W_p(P_n) = n - 3$ (2)

(**iii**) $W_H(P_n) = \dfrac{n(n+2)(n^2-1)}{24}$ (3)

(**iv**) $H(P_n) = n(H_n - 1)$ (4)

(**v**) $RCW(P_n) = n - 1$ (5)

(**vi**) $TW(P_n) = n - 1$ (6)

İspat:

(**i**) $n \geq 2$ olmak üzere P_n grafı için,

$W(P_n) = [1 + 2 + 3 + \cdots + (n-1)] + [1 + 2 + \cdots + (n-2)] + \cdots + (1+2) + 1$ yazılır. Buradan

$$W(P_n) = \frac{(n-1)n}{2} + \frac{(n-2)(n-1)}{2} + \cdots + \frac{2.3}{2} + \frac{1.2}{2}$$
$$= \frac{1}{2}[1.2 + 2.3 + \cdots + (n-2).(n-1) + (n-1).n] = \frac{1}{2}\left[\frac{(n-1)n(n+1)}{3}\right] = \frac{n\,(n^2-1)}{6}$$

olarak bulunur.

(ii) $n \geq 4$ için P_n yol grafının noktaları $\{v_1, v_2, .., v_n\}$ olmak üzere;

$n = 4$ *için* mesafesi 3 birim olan nokta çiftleri (v_1, v_4) olup $W_p(P_4) = 1$ olur.
$n = 5$ *için* mesafesi 3 birim olan nokta çiftleri $\{(v_1, v_4), (v_2, v_5)\}$ olup $W_p(P_5) = 2$ olur.
$n = 6$ *için* mesafesi 3 birim olan nokta çiftleri $\{(v_1, v_4), (v_2, v_5), (v_3, v_6)\}$ olup $W_p(P_5) = 3$ olur.
Bu şekilde devam edildiğinde,
n için mesafesi 3 birim olan nokta çiftleri $\{(v_1, v_4), (v_2, v_5), (v_3, v_6), \ldots, (v_{n-3}, v_n)\}$ olup, $W_p(P_n) = n - 3$ olduğu görülür.

(iii) $n \geq 2$ olmak üzere, $W(P_n) = \frac{n\,(n^2-1)}{6}$ olduğunu biliyoruz. Aynı zamanda,

$$\sum_{u,v \in V(P_n)} d^2(u,v) = [1^2 + 2^2 + \cdots + (n-1)^2] + [1^2 + 2^2 + \cdots + (n-2)^2] + \cdots + (1^2 + 2^2) + 1^2$$
$$= 1^2(n-1) + 2^2(n-2) + \cdots + (n-2)^2[n-(n-2)] + (n-1)^2[n-(n-1)]$$
$$= n[1^2 + 2^2 + \cdots + (n-1)^2] - [1^3 + 2^3 + \cdots + (n-1)^3]$$
$$= n\frac{(n-1)n(2n-1)}{6} - \left[\frac{n(n-1)}{2}\right]^2$$
$$= \frac{n^2(n-1)}{2}\left(\frac{2n-1}{3} - \frac{n-1}{2}\right) = \frac{n^2(n^2-1)}{12}$$

olup bu eşitliklerden

$$W_H(P_n) = \frac{1}{2}\left[\frac{n\,(n^2-1)}{6} + \frac{n^2(n^2-1)}{12}\right] = \frac{n(n+2)(n^2-1)}{24}$$

elde edilir.

(iv) $n \geq 2$ olmak üzere,
$n = 2\ için\ H(P_2) = 1$
$n = 3\ için\ H(P_3) = \left(1 + \frac{1}{2}\right) + (1)$
$n = 4\ için\ H(P_4) = \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) + \left(1 + \frac{1}{2}\right) + (1)$
Bu şekilde devam edildiğinde n için
$H(P_n) = \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n-1}\right) + \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n-2}\right) + \cdots + \left(1 + \frac{1}{2}\right) + (1)$
$= 1.(n-1) + \frac{1}{2}(n-2) + \frac{1}{3}(n-3) + \cdots + \frac{1}{n-1}[n-(n-1)]$
$= \frac{n}{1} - 1 + \frac{n}{2} - 1 + \cdots + \frac{n}{n-1} - 1$
$= n\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{n-1}\right) - 1.(n-1)$
$\left(H_n = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k}\ eşitliğinden\right)$
$= n.H_n - n\frac{1}{n} - (n-1)$
$Yani\ H(P_n) = n(H_n - 1)\ elde\ edilir.$

(v) $n \geq 2$ için $diam(P_n) = n-1$ olduğundan $RCW(P_n) = \sum_{u,v \in V(P_n)} \frac{1}{n - d_{P_n}(u,v)}$ olacaktır.
P_n grafının $\{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ nokta çiftleri arası uzaklıkları sırasıyla,
$v_1\ için \left(\frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \cdots + \frac{1}{n-(n-2)} + \frac{1}{n-(n-1)}\right)$
$v_2\ için \left(\frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \cdots + \frac{1}{n-(n-2)}\right)$
$\vdots$
$v_{n-1}\ için\ \left(\frac{1}{n-1}\right)$
olup
$RCW(P_n) = (n-1)\frac{1}{n-1} + (n-2)\frac{1}{n-2} + \cdots + 2\frac{1}{n-(n-2)} + 1\frac{1}{n-(n-1)} = 1 + 1 + \cdots + 1 = n-1$
bulunur.

(vi) $n \geq 2$ olmak üzere, P_n'de $\{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ noktalarından v_1 ve v_n noktaları uç noktalar olup P_n graf tanımından yararlanarak bu iki nokta arası uzaklık "n-1" dir. O zaman terminal Wiener indeksinin tanımından $TW(P_n) = n-1$ elde edilir.

Önerme 3.2: n noktalı tam graf K_n için Wiener, Hiper Wiener, Harary ve Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener indeksleri aşağıdaki gibidir.

$$W(K_n) = W_H(K_n) = H(K_n) = RCW(K_n) = \frac{n\,(n-1)}{2} \tag{7}$$

İspat:
(i) K_n'de tüm noktalar arası 1 birim olduğundan, $W(K_n) = 1.(n-1) + 1.(n-2) + \cdots + 1.1 = \frac{n\,(n-1)}{2}$ olur.

(ii) $W(K_n) = \binom{n}{2} = \frac{n\,(n-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. Aynı zamanda K_n'de tüm noktalar arası 1 birim olduğundan
$$\sum_{u,v \in V(K_n)} d^2(u,v) = \binom{n}{2} 1^2 = \frac{n(n-1)}{2}$$
olup bu eşitliklerden
$W_H(K_n) = \frac{1}{2}\left[\frac{n\,(n-1)}{2} + \frac{n\,(n-1)}{2}\right] = \frac{n(n-1)}{2}$
elde edilir.

(iii) K_n'de tüm nokta çiftleri arası 1 birim olduğundan, $H(K_n) = \binom{n}{2}.1 = \frac{n(n-1)}{2}$ eşitliği kolayca görülür.

(iv) K_n tam graf için $diam(K_n) = 1$ olup $RCW(K_n) = \sum_{u,v \in V(K_n)} \frac{1}{2-d_{K_n}(u,v)}$ biçimindedir. K_n grafında tüm nokta çiftleri arası uzaklık 1 birim olduğundan,

$$RCW(K_n) = \binom{n}{2}\frac{1}{2-1} = \frac{n(n-1)}{2}$$

olarak bulunur.

Teorem 3.1: $p \geq 3$ ve $q \geq 1$ olmak üzere, ananas graf K_p^q için Wiener, Hiper Wiener, Harary, Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener ve Terminal Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir. n. harmonik sayı $H_n = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k}$ olmak üzere,

$$(\boldsymbol{i})\ W\left(K_p^q\right) = \frac{(p-1)(p+4q)}{2} + q^2$$

$$(\boldsymbol{ii})\ W_H\left(K_p^q\right) = \frac{1}{2}[(p-1)(p+6q) + q(3q-1)]$$

$$(\boldsymbol{iii})H\left(K_p^q\right) = \frac{1}{4}[2p(p-1) + 2q(p+1) + q(q-1)]$$

$$(\boldsymbol{iv})RCW\left(K_p^q\right) = \frac{(p-1)(p+4q) + 2q^2}{4}$$

$$(\boldsymbol{v})TW\left(K_p^q\right) = q(q-1)$$

İspat:

(i) K_p deki p tane nokta için Wiener indeks değeri (7)'den; $W\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olur. q tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$q.[1 + (p-1).2] = q(2p-1) \tag{8}$$

eşitliği elde edilir.
q tane sarkıt noktanın birbirine uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$2.\binom{q}{2} = q(q-1) \tag{9}$$

eşitliği elde edilir. Böylece (7), (8) ve (9) dan

$$W\left(K_p^q\right) = \frac{(p-1)(p+4q)}{2} + q^2$$

olarak bulunur.

(ii) K_p'deki p tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (7)'den; $W_H\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olur. q tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan,

$$q\frac{1}{2}[1 + 1^2 + (p-1)(2 + 2^2)] = q(3p-2) \tag{10}$$

eşitliği elde edilir. q tane sarkıt noktanın birbirine uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\binom{q}{2}\frac{1}{2}[2 + 2^2] = \frac{3q(q-1)}{2} \tag{11}$$

eşitliği elde edilir. Böylece (7), (10) ve (11)'den

$$W_H\left(K_p^q\right) = \frac{1}{2}[(p-1)(p+6q) + q(3q-1)]$$

olarak bulunur.

(iii) K_p deki p tane nokta için Harary indeks değeri (7)'den, $H\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olur. q tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$q.\left[1 + (p-1).\frac{1}{2}\right] = \frac{q(p+1)}{2} \tag{12}$$

eşitliği elde edilir. q tane sarkıt noktanın birbirine uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\binom{q}{2}\frac{1}{2} = \frac{q(q-1)}{4} \tag{13}$$

eşitliği elde edilir. Böylece (7), (12) ve (13) eşitliklerinden

$$H\left(K_p^q\right) = \frac{1}{4}[2p(p-1) + 2q(p+1) + q(q-1)]$$

olarak bulunur.

(iv) K_p^q ananas graf için $diam\left(K_p^q\right) = 2$ olup $RCW\left(K_p^q\right) = \sum_{u,v \in V(K_p^q)} \frac{1}{3 - d_{K_p^q}(u,v)}$ biçimindedir. K_p'de tüm nokta çiftleri arası uzaklık 1 birim olduğundan

$$\binom{p}{2}\frac{1}{3-1} = \frac{p(p-1)}{4} \tag{14}$$

elde edilir. q tane sarkıt noktanın K_p deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$q\left[\left(\frac{1}{3-1}\right) + \left((p-1)\frac{1}{3-2}\right)\right] = \frac{q(2p-1)}{2} \tag{15}$$

bulunur. q tane sarkıt noktanın birbirine uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\binom{q}{2}\frac{1}{3-2} = \frac{q(q-1)}{2} \tag{16}$$

olup (14), (15) ve (16)'dan

$$RCW\left(K_p^q\right) = \frac{(p-1)(p+4q) + 2q^2}{4}$$

olarak bulunur.

(v) K_p^q ananas grafının, $K_p$tam grafı ve $\{v_1, v_2, \ldots, v_q\}$ uç noktalarından oluştuğunu biliyoruz. Uç noktalar arası uzaklık 2 birim olduğundan ve terminal Wiener indeksinin tanımından yararlanarak $TW\left(K_p^q\right) = q(q-1)$ eşitliği kolayca görülür.

Teorem 3.2 $p \geq 3$ olmak üzere deniz kestanesi graf $Urchin_p^p$ için Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary, Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener ve Terminal Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir.

(i) $W\left(Urchin_p^p\right) = p(4p-3)$

(ii) $W_p\left(Urchin_p^p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$

(**iii**) $W_H\left(Urchin_p^p\right) = \frac{p(13p-11)}{2}$

(**iv**) $H\left(Urchin_p^p\right) = \frac{p(7p-1)}{6}$

(**v**) $RCW\left(Urchin_p^p\right) = \frac{p(7p-5)}{6}$

(**vi**) $TW\left(Urchin_p^p\right) = \frac{3p(p-1)}{2}$

İspat:

(i) K_p deki p tane nokta için Wiener indeks değeri (7)'den $W\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olur. p tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan,

$$3\binom{p}{2} = \frac{3}{2}p(p-1) \tag{17}$$

olur. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,...,2" olup p tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları

$$p[1+(p-1)2] = p(2p-1) \tag{18}$$

bulunur. Böylece (7), (17) ve (18)'den

$$W\left(Urchin_p^p\right) = p(4p-3)$$

elde edilir.

(ii) p tane sarkıt noktanın birbirine uzaklığı 3 birim olduğundan

$$W_p\left(Urchin_p^p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$$

olur.

(iii) K_p'deki p tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (7)'den $W_H\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. p tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan

$$\frac{1}{2}\binom{p}{2}(3+3^2) = 3p(p-1) \tag{19}$$

olur. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,...,2" olup, p tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları

$$\frac{1}{2}p[1+1^2+(p-1)(2+2^2)] = p[1+3(p-1)] \tag{20}$$

bulunur. Böylece (7), (19) ve (20)'den

$$W_H\left(Urchin_p^p\right) = \frac{p(13p-11)}{2}$$

elde edilir.

(iv) K_p deki p tane nokta için Harary indeks değeri (7)'den $H\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. p tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan

$$\binom{p}{2}\frac{1}{3}=\frac{p(p-1)}{6} \tag{21}$$

elde edilir. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,…,2" olup, p tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları

$$p.\left[1+(p-1)\frac{1}{2}\right]=p+\frac{p(p-1)}{2} \tag{22}$$

bulunur. Böylece (7), (21) ve (22)'den

$$H\left(Urchin_p^p\right)=\frac{p(7p-1)}{6}$$

olur.

(v) $Urchin_p^p$ deniz kestanesi graf için $diam\left(Urchin_p^p\right)=3$ olup

$$RCW\left(Urchin_p^p\right)=\sum_{u,v\in V\left(Urchin_p^p\right)}\frac{1}{4-d_{Urchin_p^p}(u,v)}$$

biçimindedir.
K_p'de tüm nokta çiftleri arası 1 birim olduğundan,

$$\binom{p}{2}\frac{1}{4-1}=\frac{p(p-1)}{6} \tag{23}$$

elde edilir. p tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan

$$\binom{p}{2}\frac{1}{4-3}=\frac{p(p-1)}{2} \tag{24}$$

olur. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,…,2" olup, p tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları,

$$p\left(\frac{1}{4-1}+\frac{p-1}{4-2}\right)=\frac{p}{3}+\frac{p(p-1)}{2} \tag{25}$$

olur. (23), (24) ve (25)'den

$$RCW\left(Urchin_p^p\right)=\frac{p(7p-5)}{6}$$

olarak bulunur.

(vi) $Urchin_p^p$ deniz kestanesi graf; K_p grafının her bir noktasına birer adet sarkıt nokta eklenmesiyle elde edilen graf olduğundan p tane uç noktası vardır ve uç noktalar arası uzaklık 3 birimdir. Böylece terminal Wiener indeksinin tanımından yararlanarak

$$TW\left(Urchin_p^p\right)=\frac{3p(p-1)}{2}$$

eşitliği kolayca bulunur.

Teorem 3.3 : $p\geq 3$, $q\geq 1$ ve $q<p$ olmak üzere, kırık deniz kestanesi graf $Urchin_p^q$ için Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary, Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener ve Terminal Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir.

(**i**) $W\left(Urchin_p^q\right)=\frac{1}{2}[(p-1)(p+4q)+q(3q-1)]$

(**ii**) $W_p\left(Urchin_p^q\right)=\frac{q(q-1)}{2}$

(**iii**) $W_H\left(Urchin_p^q\right) = \frac{p(p-1)}{2} + q(3p+3q-5)$

(**iv**) $H\left(Urchin_p^q\right) = \frac{p(p-1)}{2} + \frac{q(3p+q+2)}{6}$

(**v**) $RCW\left(Urchin_p^q\right) = \frac{p(p-1)}{6} + \frac{(p+q-2)q}{2} + \frac{q}{3}$

(**vi**) $TW\left(Urchin_p^q\right) = \frac{3q(q-1)}{2}$

İspat:

(i) K_p deki p tane nokta için Wiener indeks değeri (7)'den; $W\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. q tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan,

$$3\binom{q}{2} = \frac{3}{2}q(q-1) \tag{26}$$

eşitliği bulunur. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,...,2" olup, q tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları

$$q[1+(p-1)2] = q(2p-1) \tag{27}$$

bulunur. Böylece (7), (26) ve (27)'den

$$W\left(Urchin_p^q\right) = \frac{1}{2}[(p-1)(p+4q) + q(3q-1)]$$

eşitliği bulunur.

(ii) q tane sarkıt noktaların birbirine uzaklığı 3 birim olduğundan

$$W_p\left(Urchin_p^q\right) = \frac{q(q-1)}{2}$$

olduğu kolayca görülür.

(iii) K_p'deki p tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (7)'den; $W_H(K_n) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. q tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan

$$\frac{1}{2}\binom{q}{2}(3+3^2) = 3q(q-1) \tag{28}$$

olur. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,...,2" olup, q tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları

$$\frac{1}{2}.q[1+1^2+(p-1)(2+2^2)] = q(3p-2) \tag{29}$$

bulunur. Böylece (7), (28) ve (29) eşitliklerinden

$$W_H\left(Urchin_p^q\right) = \frac{p(p-1)}{2} + q(3p+3q-5)$$

olarak bulunur.

(iv) K_p deki p tane nokta için Harary indeks değeri (7)'den $H\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. q tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan

$$\binom{q}{2}\frac{1}{3}=\frac{q(q-1)}{6} \tag{30}$$

eşitliği elde edilir. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,...,2" olup, q tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları

$$q.\left[1+(p-1)\frac{1}{2}\right]=\frac{q(p+1)}{2} \tag{31}$$

bulunur. Böylece (7), (30) ve (31)'den

$$H\left(Urchin_p^q\right)=\frac{p(p-1)}{2}+\frac{q(3p+q+2)}{6}$$

olarak bulunur.

(v) $Urchin_p^q$ kırık deniz kestanesi graf için $diam\left(Urchin_p^q\right)=3$ olduğundan,

$$RCW\left(Urchin_p^q\right)=\sum_{u,v\in V\left(Urchin_p^q\right)}\frac{1}{4-d_{Urchin_p^q}(u,v)}$$

biçiminde olur. K_p'de tüm nokta çiftleri arası 1 birim olduğundan

$$\binom{p}{2}\frac{1}{4-1}=\frac{p(p-1)}{6} \tag{32}$$

elde edilir. q tane sarkıt nokta çiftleri arası 3'er birim olduğundan

$$\binom{q}{2}\frac{1}{4-3}=\frac{q(q-1)}{2} \tag{33}$$

olur. 1 tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklığı "1,2,2,...,2" olup, q tane sarkıt noktanın K_p'deki p tane noktaya uzaklıkları,

$$q\left(\frac{1}{4-1}+\frac{p-1}{4-2}\right)=\frac{q}{3}+\frac{q(p-1)}{2} \tag{34}$$

olur. (32), (33) ve (34)'den

$$RCW\left(Urchin_p^q\right)=\frac{p(p-1)}{6}+\frac{(p+q-2)q}{2}+\frac{q}{3}$$

olarak bulunur.

(vi) $Urchin_p^q$ kırık deniz kestanesi grafının q tane uç noktası vardır ve uç noktalar arası uzaklık 3 birimdir. Böylece terminal Wiener indeksinin tanımından yararlanarak

$$TW\left(Urchin_p^q\right)=\frac{3q(q-1)}{2}$$

eşitliği bulunur.

Teorem 3.4: $p\geq 3, q\geq 1,\ q\leq p\ ve\ n=k_1+k_2+\cdots+k_q$ tane sarkıt nokta olmak üzere, tam tırtıl graf $K_p^{k_1,\cdots,k_q}$ için Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary, Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener ve Terminal Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir.

(**i**) $W\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{p(p-1)}{2}+n(2p-1)+k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)+$
$\frac{3}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$

(ii) $W_p\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$

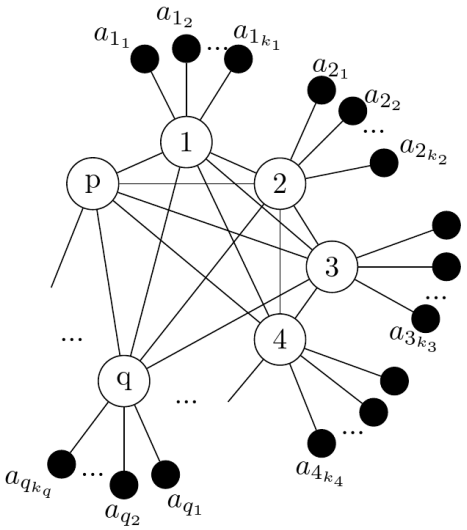
(iii) $W_H\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{p(p-1)}{2}+n(3p-2)+\frac{3}{2}\left[k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)\right]+$
$3\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$

(iv) $H\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{p(p-1)}{2}+\frac{n(p+1)}{2}+\frac{k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)}{4}+$
$\frac{\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]}{6}$

(v) $RCW\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{p(p-1)}{6}+\frac{n(3p-1)}{6}+\frac{\left[k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)\right]}{4}$
$+\frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$

(vi) $TW\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\left[k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)\right]+\frac{3}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$

İspat:



Şekil 1. Tam Tırtıl Graf

(i) K_p deki p tane nokta için wiener indeks değeri (7)'den; $W\left(K_p\right)=\frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. n tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\left(k_1+k_2+\cdots+k_q\right)[1+(p-1).2]=\left(k_1+k_2+\cdots+k_q\right)(2p-1)=n(2p-1) \tag{35}$$

eşitliği elde edilir.
$\left\{a_{1_1},a_{1_2},\ldots,a_{1_{k_1}}\right\},\left\{a_{2_1},a_{2_2},\ldots,a_{2_{k_2}}\right\},\ldots,\left\{a_{q_1},a_{q_2},\ldots,a_{q_{k_q}}\right\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan nokta çiftleri kendi grubu içinde birbirine uzaklığı 2'şer birim olduğundan

$$\left[\binom{k_1}{2}+\binom{k_2}{2}+\cdots+\binom{k_q}{2}\right].2=k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right) \tag{36}$$

eşitliği elde edilir.
$\left\{a_{1_1},a_{1_2},\ldots,a_{1_{k_1}}\right\},\left\{a_{2_1},a_{2_2},\ldots,a_{2_{k_2}}\right\},\ldots,\left\{a_{q_1},a_{q_2},\ldots,a_{q_{k_q}}\right\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan noktaların diğer gruplardaki noktalara uzaklığı 3'er birim olduğundan

$$\frac{3}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right] \tag{37}$$

eşitliği elde edilir.
O halde (7), (35), (36) ve (37) eşitliklerinden

$$W\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{p(p-1)}{2}+n(2p-1)+k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)+\frac{3}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$$

olur.

(ii) $\left\{a_{1_1},a_{1_2},\ldots,a_{1_{k_1}}\right\},\left\{a_{2_1},a_{2_2},\ldots,a_{2_{k_2}}\right\},\ldots,\left\{a_{q_1},a_{q_2},\ldots,a_{q_{k_q}}\right\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan noktaların diğer gruplardaki noktalara uzaklığı 3'er birim olduğundan

$$W_p\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$$

bulunur.

(iii) K_p'deki p tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (7)'den; $W_H\left(K_p\right)=\frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. n tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\left(k_1+k_2+\cdots+k_q\right)\left[\frac{1}{2}[1+1^2+(p-1)(2+2^2)]\right]=n(3p-2) \tag{38}$$

eşitliği elde edilir.
$\left\{a_{1_1},a_{1_2},\ldots,a_{1_{k_1}}\right\},\left\{a_{2_1},a_{2_2},\ldots,a_{2_{k_2}}\right\},\ldots,\left\{a_{q_1},a_{q_2},\ldots,a_{q_{k_q}}\right\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan nokta çiftleri kendi grubu içinde birbirine uzaklığı 2'şer birim olduğundan

$$\left[\binom{k_1}{2}+\binom{k_2}{2}+\cdots+\binom{k_q}{2}\right]\left[\frac{1}{2}(2+2^2)\right]=\frac{3}{2}\left[k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)\right] \tag{39}$$

eşitliği elde edilir.
$\left\{a_{1_1},a_{1_2},\ldots,a_{1_{k_1}}\right\},\left\{a_{2_1},a_{2_2},\ldots,a_{2_{k_2}}\right\},\ldots,\left\{a_{q_1},a_{q_2},\ldots,a_{q_{k_q}}\right\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan noktaların, diğer gruplardaki noktalara uzaklığı 3'er birim olduğundan

$$\frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right].\left[\frac{1}{2}(3+3^2)\right]=3\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right] \tag{40}$$

eşitliği elde edilir.
O halde (7), (38), (39) ve (40) eşitliklerinden

$$W_H\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right)=\frac{p(p-1)}{2}+n(3p-2)+\frac{3}{2}\left[k_1(k_1-1)+k_2(k_2-1)+\cdots+k_q\left(k_q-1\right)\right]+3\left[k_1(n-k_1)+k_2(n-k_2)+\cdots+k_q\left(n-k_q\right)\right]$$

bulunur.

(iv) K_p deki p tane nokta için Harary indeks değeri (7)'den $H\left(K_p\right)=\frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. n tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\left(k_1+k_2+\cdots+k_q\right)\left[1+(p-1)\frac{1}{2}\right]=\left(k_1+k_2+\cdots+k_q\right)\frac{p+1}{2}=\frac{n(p+1)}{2} \tag{41}$$

eşitliği elde edilir.
$\{a_{1_1}, a_{1_2}, \dots, a_{1_{k_1}}\}, \{a_{2_1}, a_{2_2}, \dots, a_{2_{k_2}}\}, \dots, \{a_{q_1}, a_{q_2}, \dots, a_{q_{k_q}}\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan nokta çiftleri kendi grubu içinde birbirine uzaklığı 2'şer birim olduğundan

$$\left[\binom{k_1}{2} + \binom{k_2}{2} + \cdots + \binom{k_q}{2}\right]\frac{1}{2} = \frac{k_1(k_1-1) + k_2(k_2-1) + \cdots + k_q(k_q-1)}{4} \tag{42}$$

eşitliği elde edilir.
$\{a_{1_1}, a_{1_2}, \dots, a_{1_{k_1}}\}, \{a_{2_1}, a_{2_2}, \dots, a_{2_{k_2}}\}, \dots, \{a_{q_1}, a_{q_2}, \dots, a_{q_{k_q}}\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan noktaların, diğer gruplardaki noktalara uzaklığı 3'er birim olduğundan

$$\frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)\right]\frac{1}{3} = \frac{\left[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)\right]}{6} \tag{43}$$

eşitliği elde edilir.
O halde (7), (41), (42) ve (43) eşitliklerinden

$$H\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right) = \frac{p(p-1)}{2} + \frac{n(p+1)}{2} + \frac{k_1(k_1-1) + k_2(k_2-1) + \cdots + k_q(k_q-1)}{4} + \frac{\left[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)\right]}{6}$$

bulunur.

(v) $K_p^{k_1,\cdots,k_q}$ graf için $diam\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right) = 3$ olur. Böylece $RCW\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right) = \sum_{u,v\in V(K_p^{k_1,\cdots,k_q})} \frac{1}{4-d_{K_p^{k_1,\cdots,k_q}}(u,v)}$ olacaktır.

K_p grafında tüm nokta çiftleri arası 1 birim olduğundan

$$RCW(K_p) = \binom{p}{2}\frac{1}{4-1} = \frac{p(p-1)}{6} \tag{44}$$

eşitliği elde edilir. n tane sarkıt noktanın K_p'deki noktalara uzaklığı; birleşim noktasına uzaklıkları 1 birim, diğer (p-1) tane noktaya uzaklıkları 2 birim olduğundan

$$\left(k_1 + k_2 + \cdots + k_q\right)\left[\frac{1}{4-1} + (p-1)\frac{1}{4-2}\right] = \frac{n(3p-1)}{6} \tag{45}$$

eşitliği elde edilir.
$\{a_{1_1}, a_{1_2}, \dots, a_{1_{k_1}}\}, \{a_{2_1}, a_{2_2}, \dots, a_{2_{k_2}}\}, \dots, \{a_{q_1}, a_{q_2}, \dots, a_{q_{k_q}}\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan nokta çiftleri kendi grubu içinde birbirine uzaklığı 2'şer birim olduğundan

$$\left[\binom{k_1}{2} + \binom{k_2}{2} + \cdots + \binom{k_q}{2}\right]\frac{1}{4-2} = \frac{\left[k_1(k_1-1) + k_2(k_2-1) + \cdots + k_q(k_q-1)\right]}{4} \tag{46}$$

eşitliği elde edilir.
$\{a_{1_1}, a_{1_2}, \dots, a_{1_{k_1}}\}, \{a_{2_1}, a_{2_2}, \dots, a_{2_{k_2}}\}, \dots, \{a_{q_1}, a_{q_2}, \dots, a_{q_{k_q}}\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan noktaların diğer gruplardaki noktalara uzaklığı 3'er birim olduğundan

$$\frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)\right]\frac{1}{4-3} = \frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)\right] \tag{47}$$

eşitliği elde edilir. O halde (44), (45), (46) ve (47) eşitliklerinden

$$RCW\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right) = \frac{p(p-1)}{6} + \frac{n(3p-1)}{6} + \frac{\left[k_1(k_1-1) + k_2(k_2-1) + \cdots + k_q(k_q-1)\right]}{4} + \frac{1}{2}\left[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)\right]$$

bulunur.

(vi) $\{a_{1_1}, a_{1_2}, \dots, a_{1_{k_1}}\}, \{a_{2_1}, a_{2_2}, \dots, a_{2_{k_2}}\}, \dots, \{a_{q_1}, a_{q_2}, \dots, a_{q_{k_q}}\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan nokta çiftleri kendi grubu içinde birbirine uzaklığı 2'şer birim olduğundan

$$\left[\binom{k_1}{2} + \binom{k_2}{2} + \cdots + \binom{k_q}{2}\right].2 = k_1(k_1-1) + k_2(k_2-1) + \cdots + k_q(k_q-1) \tag{48}$$

eşitliği elde edilir.
$\{a_{1_1}, a_{1_2}, \dots, a_{1_{k_1}}\}, \{a_{2_1}, a_{2_2}, \dots, a_{2_{k_2}}\}, \dots, \{a_{q_1}, a_{q_2}, \dots, a_{q_{k_q}}\}$ sarkıt nokta gruplarında bulunan noktaların diğer gruplardaki noktalara uzaklığı 3'er birim olduğundan

$$\frac{3}{2}[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)] \tag{49}$$

eşitliği elde edilir.
O halde (48) ve (49) eşitliklerinden

$$TW\left(K_p^{k_1,\cdots,k_q}\right) = [k_1(k_1-1) + k_2(k_2-1) + \cdots + k_q(k_q-1)] + \frac{3}{2}[k_1(n-k_1) + k_2(n-k_2) + \cdots + k_q(n-k_q)]$$

olur.

Teorem 3.5: $p \geq 3$ ve $q \geq 1$ olmak üzere, uçurtma graf $Kite_p^q$ için Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary ve Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir. n. Harmonik sayı $H_n = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k}$ olmak üzere,

$$\textbf{(i)} W\left(Kite_p^q\right) = \frac{(p-1)[p+q(q+3)]}{2} + \frac{q(q+1)(q+2)}{6}$$

$$\textbf{(ii)} W_p\left(Kite_p^q\right) = p+q-3$$

$$\textbf{(iii)} W_H\left(Kite_p^q\right) = \frac{(p-1)(p-2)}{2} + \frac{(4p+q-4)(q+1)(q+2)(q+3)}{24}$$

$$\textbf{(iv)} H\left(Kite_p^q\right) = (p+q)\left(H_q - 1\right) + (p-1)\left(\frac{p}{2} + \frac{1}{q+1}\right) + 1$$

$$\textbf{(v)} RCW\left(Kite_p^q\right) = (p-2)H_q + \frac{p(p-1)-2}{2(q+1)} + q + 1$$

İspat:
(i) K_p deki p tane nokta için Wiener indeks değeri (7)'den; $W\left(K_p\right) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. P_q'daki q tane nokta için Wiener indeks değeri (1)'den $W\left(P_q\right) = \frac{q\,(q^2-1)}{6}$ biçimindedir. P_q'daki q tane noktanın K_p' deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazıldığında

$$[1 + (p-1).2] + [2 + (p-1).3] + \cdots + [q + (p-1).(q+1)]$$

$$= (1 + 2 + 3 + \cdots + q) + (p-1)[2 + 3 + \cdots + (q+1)]$$

$$= \frac{q(q+1)}{2} + (p-1)\left[\frac{(q+1)(q+2)}{2} - 1\right] = \frac{q(q+1)}{2} + \frac{q(p-1)(q+3)}{2} \tag{50}$$

bulunur. Böylece (1), (7) ve (50)'den

$$W\left(Kite_p^q\right) = \frac{(p-1)[p+q(q+3)]}{2} + \frac{q(q+1)(q+2)}{6}$$

elde edilir.

(ii) $p \geq 3$ ve $q \geq 2$ olmak üzere $Kite_p^q$ uçurtma graf ve wiener polarite indeksinin tanımından yararlanarak P_q'nun noktaları $\{V_{q_1}, V_{q_2}, .., V_{q_q}\}$, K_p'nin noktaları $\{V_{p_1}, V_{p_2}, .., V_{p_p}\}$ ve birleşim noktası V_{p_1} olmak üzere, K_p'nin birleşim noktası hariç $\{V_{p_2}, V_{p_3} .., V_{p_p}\}$ noktaları ile P_q'nun V_{q_2} noktası arasındaki mesafe 3 birim olduğundan $\{(V_{q_2}, V_{p_2}), (V_{q_2}, V_{p_3}), \dots, (V_{q_2}, V_{p_p})\}$ nokta çiftleri arası mesafe 3'er birim olup $p-1$ tane nokta çifti vardır. Birleşim noktası V_{p_1} dahil olacak şekilde P_{q+1} için $W_p(P_{q+1}) = q+1-3 = q-2$ olduğundan

$$W_p(Kite_p^q) = p+q-3$$

elde edilir.

(iii) K_p'deki p tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (7)'den; $W_H(K_p) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. P_q'daki q tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (3)'den $W_H(P_q) = \frac{q(q+2)(q^2-1)}{24}$ biçimindedir.
P_q'daki q tane noktanın K_p' deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazıldığında

$$\frac{1}{2}[1+1^2+(p-1)2+(p-1)2^2]$$
$$+\frac{1}{2}[2+2^2+(p-1)3+(p-1)3^2]$$
$$+\cdots$$
$$+\frac{1}{2}[q+q^2+(p-1)(q+1)+(p-1)(q+1)^2]$$

olup tüm bu değerler toplanıp düzenlendiğinde

$$= \frac{1}{2}[1+(q+1)(p-1)+p(2+3+\cdots+q)] + \frac{1}{2}[1^2+(q+1)^2(p-1)+p(2^2+3^2+\cdots+q^2]$$
$$= 1+\frac{(q+1)(p-1)}{2}(q+2)+\frac{p}{2}\left[\left(\frac{q(q+1)}{2}-1\right)+\left(\frac{q(q+1)(2q+1)}{6}-1\right)\right]$$
$$= 1-p+\frac{(q+1)}{12}[6(p-1)(q+2)+3pq+pq(2q+1)]$$
$$= 1-p+\frac{(q+1)}{12}[6(p-1)(q+2)+2pq(q+2)]$$

$$= \frac{(q+1)(q+2)(3p+pq-3)}{6} - (p-1) \qquad (51)$$

eşitliği bulunur. Böylece (3), (7) ve (51)'den

$$W_H(Kite_p^q) = \frac{(p-1)(p-2)}{2} + \frac{(4p+q-4)(q+1)(q+2)(q+3)}{24}$$

olarak bulunur.

(iv) K_p deki p tane nokta için Harary indeks değeri (7)'den $H(K_p) = \frac{p(p-1)}{2}$ olduğunu biliyoruz. P_q'daki q tane nokta için Harary indeks değeri (4)'den $H(P_q) = q(H_q - 1)$ biçimindedir. P_q'daki q tane noktanın K_p' deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazıldığında

$$\left[\frac{1}{1}+(p-1)\frac{1}{2}\right]+\left[\frac{1}{2}+(p-1)\frac{1}{3}\right]+\left[\frac{1}{3}+(p-1)\frac{1}{4}\right]+\cdots+\left[\frac{1}{q}+(p-1)\frac{1}{q+1}\right]$$
$$= \left(\frac{1}{1}+\frac{1}{2}+\cdots+\frac{1}{q}\right)+(p-1)\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\cdots+\frac{1}{q+1}\right)$$
$$= H_q+(p-1)\left(H_q-1+\frac{1}{q+1}\right)$$

$$= p.H_q-(p-1)+\frac{p-1}{q+1} \qquad (52)$$

bulunur. Böylece (4), (7) ve (52) eşitliklerinden

$$H\left(Kite_p^q\right) = (p+q)\left(H_q - 1\right) + (p-1)\left(\frac{p}{2} + \frac{1}{q+1}\right) + 1$$

elde edilir.

(v) $Kite_p^q$ uçurtma grafı için $diam\left(Kite_p^q\right) = (q+1)$ olduğundan $RCW\left(Kite_p^q\right) = \sum_{u,v \in V\left(Kite_p^q\right)} \frac{1}{q+2-d_{Kite_p^q}(u,v)}$ olur.

K_p'de tüm nokta çiftleri arası 1 birim olduğundan

$$\binom{p}{2}\frac{1}{q+2-1} = \frac{p(p-1)}{2(q+1)} \tag{53}$$

elde edilir. P_q'da $\{V_1, V_2, \dots, V_q\}$ nokta çiftleri arası uzaklıklar sırasıyla yazıldığında

V_1 için $\left(\frac{1}{q+2-1} + \frac{1}{q+2-2} + \cdots + \frac{1}{q+2-(q-2)} + \frac{1}{q+2-(q-1)}\right)$

V_2 için $\left(\frac{1}{q+2-1} + \frac{1}{q+2-2} + \cdots + \frac{1}{q+2-(q-2)}\right)$

$\vdots$

V_{q-1} için $\left(\frac{1}{q+2-1}\right)$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$\frac{q-1}{q+1} + \frac{q-2}{q} + \frac{q-3}{q-1} + \cdots + \frac{2}{4} + \frac{1}{3}$$
$$= \left(1 - \frac{2}{q+1}\right) + \left(1 - \frac{2}{q}\right) + \left(1 - \frac{2}{q-1}\right) + \cdots + \left(1 - \frac{2}{4}\right) + \left(1 - \frac{2}{3}\right)$$
$$= 1.(q-1) - 2\left(\frac{1}{q+1} + \frac{1}{q} + \frac{1}{q-1} + \cdots + \frac{1}{4} + \frac{1}{3}\right)$$
$$= q - 1 - 2\left(H_q + \frac{1}{q+1} - \frac{1}{2} - 1\right)$$

$$= q + 2 - \frac{2}{q+1} - 2H_q \tag{54}$$

olur. P_q'da $\{V_1, V_2, \dots, V_q\}$ noktalarının K_p' deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazıldığında

V_1 için $\left(\frac{1}{q+2-1} + (p-1)\frac{1}{q+2-2}\right) = \frac{1}{q+1} + \frac{p-1}{q}$

V_2 için $\left(\frac{1}{q+2-2} + (p-1)\frac{1}{q+2-3}\right) = \frac{1}{q} + \frac{p-1}{q-1}$

$\vdots$

V_{q-1} için $\left(\frac{1}{q+2-(q-1)} + (p-1)\frac{1}{q+2-q}\right) = \frac{1}{3} + \frac{p-1}{2}$

V_q için $\left(\frac{1}{q+2-q} + (p-1)\frac{1}{q+2-(q+1)}\right) = \frac{1}{2} + \frac{p-1}{1}$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$\left(\frac{1}{q+1} + \frac{p-1}{q}\right) + \left(\frac{1}{q} + \frac{p-1}{q-1}\right) + \cdots \left(\frac{1}{3} + \frac{p-1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{p-1}{1}\right)$$
$$= \frac{1}{q+1} + p\left(\frac{1}{q} + \frac{1}{q-1} + \frac{1}{q-2} + \cdots + \frac{1}{2}\right) + (p-1)$$
$$= \frac{1}{q+1} + p - 1 + p\left(H_q - 1\right)$$

$$= pH_q + \frac{1}{q+1} - 1 \tag{55}$$

olur. (53), (54) ve (55)'den

$$RCW\left(Kite_p^q\right) = (p-2)H_q + \frac{p(p-1)-2}{2(q+1)} + q + 1$$

olarak bulunur.

Teorem 3.6 : $p, q \geq 3$ ve $r \geq 1$ olmak üzere çift uçurtma graf $DK_{p,q,r}$ için Wiener, Wiener Polarite, Hiper Wiener, Harary ve Karşılıklı Tamamlayıcı Wiener indeksleri nokta sayısına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir. n. Harmonik sayı $H_n = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k}$ olmak üzere,

(**i**) $W(DK_{p,q,r}) = \frac{p(p-1)}{2} + \frac{q(q-1)}{2} + \frac{r[3(r+3)(p+q) + r^2 - 13]}{6} + (r+1) + (p+q-2)(r+2) + (p-1)(q-1)(r+3)$

(**ii**) $W_p(DK_{p,q,r}) = p + q + r - 3$

(**iii**) $W_H(DK_{p,q,r}) = \frac{(p-1)(p-2)}{2} + \frac{(q-1)(q-2)}{2} + \frac{(r+3)(r+4)(p-1)(q-1)}{2} + \frac{(r+1)(r+2)}{24}[r(r-1) + 4(p+q)(r+3) - 12] + \frac{(r+2)(r+3)(p+q-2)}{2}$

(**iv**) $H(DK_{p,q,r}) = (p+q+r)H_r + \frac{p(p-1)}{2} + \frac{q(q-1)}{2} - r - \frac{r(p+q-2)-1}{r+1} + \frac{p+q-2}{r+2} + \frac{(p-1)(q-1)}{r+3}$

(**v**) $RCW(DK_{p,q,r}) = (p+q-4)H_{r+2} + \frac{p(p-1) + q(q-1) - 4}{2(r+3)} + (p-1)(q-1) - (p+q) + r + 6$

İspat:

(i) K_p deki p tane nokta için Wiener indeks değeri ve K_q'daki q tane nokta için Wiener indeks değeri (7)'den;

$$W(K_p) + W(K_q) = \frac{p(p-1)}{2} + \frac{q(q-1)}{2} \tag{56}$$

olur. P_r'daki r tane nokta için Wiener indeks değeri (1)'den $W(P_r) = \frac{r(r^2-1)}{6}$ olur. P_r'daki r tane noktanın K_p' deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazıldığında

$[1 + (p-1).2] + [2 + (p-1).3] + \cdots + [r + (p-1).(r+1)]$
$= (1 + 2 + 3 + \cdots + r) + (p-1)[2 + 3 + \cdots + (r+1)]$
$= \frac{r(r+1)}{2} + (p-1)\left[\frac{r(r+1)}{2} + r\right]$
$= \frac{pr(r+1)}{2} + (p-1)r$
$= \frac{r(pr+3p-2)}{2}$ (57)

olur. P_r'deki r tane noktanın K_q'daki noktalara uzaklıkları (57)'den yararlanarak

$$\frac{r(qr+3q-2)}{2} \tag{58}$$

biçimindedir. K_p'deki $\{V_{p_1}, V_{p_2}, \ldots, V_{p_p}\}$ noktalarının K_q'daki q tane noktalara uzaklıkları sırasıyla yazılırsa

V_{p_1} için $[(r+1) + (q-1)(r+2)]$
V_{p_2} için $[(r+2) + (q-1)(r+3)]$
V_{p_3} için $[(r+2) + (q-1)(r+3)]$
$\vdots$
V_{p_p} için $[(r+2) + (q-1)(r+3)]$

olup tüm bu değerler toplandığında

$= (r+1) + (q-1+p-1)(r+2) + (p-1)(q-1)(r+3)$
$= (r+1) + (p+q-2)(r+2) + (p-1)(q-1)(r+3)$ (59)

bulunur. Böylece (1), (56), (57), (58) ve (59)'dan

$$W(DK_{p,q,r}) = \frac{p(p-1)}{2} + \frac{q(q-1)}{2} + \frac{r[3(r+3)(p+q)+r^2-13]}{6} + (r+1) + (p+q-2)(r+2) + (p-1)(q-1)(r+3)$$

bulunur.

(ii) K_p'nin P_r ile birleşim noktası hariç (p-1) tane noktasının ve K_q'nun P_r ile birleşim noktası hariç (q-1) tane noktasının mesafesi 3'er birim olduğundan

$$(p-1) + (q-1) = p + q - 2 \tag{60}$$

tane nokta çifti vardır. Birleşim noktaları dahil olacak şekilde P_{r+1+1} için

$$W_p(P_{r+2}) = r + 2 - 3 = r - 1 \tag{61}$$

olup (60) ve(61)'den

$$W_p(DK_{p,q,r}) = p + q + r - 3$$

elde edilir.

(iii) K_p'deki p tane nokta ve K_q'daki q tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (7)'den

$$W_H(K_p) + W_H(K_q) = \frac{p(p-1)}{2} + \frac{q(q-1)}{2} \tag{62}$$

olur. P_r'daki r tane nokta için Hiper Wiener indeks değeri (3)'den $W_H(P_r) = \frac{r(r+2)(r^2-1)}{24}$ biçimindedir. P_r'daki r tane noktanın K_p'deki noktalara uzaklıkları ve K_q'daki noktalara uzaklıklarının Hiper Wiener indeks değeri (51)'den yararlanarak

$$\frac{(r+1)(r+2)(3p+pr-3)}{6} - (p-1) + \frac{(r+1)(r+2)(3q+qr-3)}{6} - (q-1) \tag{63}$$

olur. K_p'deki $\{V_{p_1}, V_{p_2}, \dots, V_{p_p}\}$ noktalarının K_q'daki q tane noktalara uzaklıkları sırasıyla yazılırsa

V_{p_1} için $\frac{1}{2}[(r+1) + (r+1)^2 + (q-1)[(r+2) + (r+2)^2]]$

V_{p_2} için $\frac{1}{2}[(r+2) + (r+2)^2 + (q-1)[(r+3) + (r+3)^2]]$

V_{p_3} için $\frac{1}{2}[(r+2) + (r+2)^2 + (q-1)[(r+3) + (r+3)^2]]$

⋮

V_{p_p} için $\frac{1}{2}[(r+2) + (r+2)^2 + (q-1)[(r+3) + (r+3)^2]]$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$= \frac{1}{2}[(r+1) + (r+1)^2 + (q-1+p-1)[(r+2) + (r+2)^2] + (p-1)(q-1)[(r+3) + (r+3)^2]]$$

$$= \frac{1}{2}[(r+1)(r+2) + (r+2)(r+3)(p+q-2) + (r+3)(r+4)(p-1)(q-1)] \tag{64}$$

elde edilir.

Böylece (3), (62), (63) ve (64)'den

$$W_H(DK_{p,q,r}) = \frac{(p-1)(p-2)}{2} + \frac{(q-1)(q-2)}{2} + \frac{(r+3)(r+4)(p-1)(q-1)}{2} + \frac{(r+1)(r+2)}{24}[r(r-1) + 4(p+q)(r+3) - 12] + \frac{(r+2)(r+3)(p+q-2)}{2}$$

bulunur.

(iv) K_p'deki p tane nokta ve K_q'daki q tane nokta için Harary indeks değeri (7)'den

$$H(K_p)+H(K_q)=\frac{p(p-1)}{2}+\frac{q(q-1)}{2} \tag{65}$$

olur. P_r'daki r tane nokta için Harary indeks değeri (4)'dan $H(P_r)=r(H_r-1)$ biçimindedir. P_r'daki r tane noktanın K_p' deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazıldığında

$$\left[\frac{1}{1}+(p-1)\frac{1}{2}\right]+\left[\frac{1}{2}+(p-1)\frac{1}{3}\right]+\cdots+\left[\frac{1}{r}+(p-1)\frac{1}{r+1}\right]$$
$$=\left(\frac{1}{1}+\frac{1}{2}+\cdots+\frac{1}{r}\right)+(p-1)\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\cdots+\frac{1}{r+1}\right)$$

$$=pH_r-\frac{r(p-1)}{r+1} \tag{66}$$

olur. P_r'daki r tane noktanın K_q'daki noktalara uzaklıkları (52)'den

$$q.H_r-\frac{r(q-1)}{r+1} \tag{67}$$

biçimindedir. K_p'deki $\{V_{p_1},V_{p_2},\dots,V_{p_p}\}$ noktalarının K_q'daki q tane noktalara uzaklıkları sırasıyla yazılırsa

$V_{p_1}için\ \left[\frac{1}{r+1}+(q-1)\frac{1}{r+2}\right]$
$V_{p_2}için\ \left[\frac{1}{r+2}+(q-1)\frac{1}{r+3}\right]$
$V_{p_3}için\ \left[\frac{1}{r+2}+(q-1)\frac{1}{r+3}\right]$
$\vdots$
$V_{p_p}için\ \left[\frac{1}{r+2}+(q-1)\frac{1}{r+3}\right]$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$=\frac{1}{r+1}+(q-1+p-1)\frac{1}{r+2}+(p-1)(q-1)\frac{1}{r+3}$$

$$=\frac{1}{r+1}+\frac{p+q-2}{r+2}+\frac{(p-1)(q-1)}{r+3} \tag{68}$$

bulunur.

Böylece (7), (4), (65), (66), (67) ve (68)'den

$$H(DK_{p,q,r})=(p+q+r)H_r+\frac{p(p-1)}{2}+\frac{q(q-1)}{2}-r-\frac{r(p+q-2)-1}{r+1}+\frac{p+q-2}{r+2}+\frac{(p-1)(q-1)}{r+3}$$

eşitliği bulunur.

(v) $DK_{p,q,r}$ çift uçurtma grafı için $diam(DK_{p,q,r})=(r-1)+2+2=r+3$ olur. Böylece,

$$RCW(DK_{p,q,r})=\sum_{u,v\in V(DK_{p,q,r})}\frac{1}{r+4-d_{DK_{p,q,r}}(u,v)}$$

biçiminde olur. K_p'de ve K_q'da tüm nokta çiftleri arası 1 birim olduğundan

$$\binom{p}{2}\frac{1}{r+4-1}+\binom{q}{2}\frac{1}{r+4-1}=\frac{p(p-1)+q(q-1)}{2(r+3)} \tag{69}$$

eşitliği elde edilir. K_p'deki $\{V_{p_1},V_{p_2},\dots,V_{p_p}\}$ noktalarının K_q' daki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazılırsa

$V_{p_1}için\left(\frac{1}{r+4-(r+1)}+(q-1)\frac{1}{r+4-(r+2)}\right)=\frac{1}{3}+\frac{q-1}{2}$
$V_{p_2}için\left(\frac{1}{r+4-(r+2)}+(q-1)\frac{1}{r+4-(r+3)}\right)=\frac{1}{2}+(q-1)$
$V_{p_3}için\left(\frac{1}{r+4-(r+2)}+(q-1)\frac{1}{r+4-(r+3)}\right)=\frac{1}{2}+(q-1)$
$\vdots$
$V_{p_p}için\ \left(\frac{1}{r+4-(r+2)}+(q-1)\frac{1}{r+4-(r+3)}\right)=\frac{1}{2}+(q-1)$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$\frac{1}{3}+\frac{(q-1)}{2}+(p-1)\left[\frac{1}{2}+(q-1)\right]$$

$$=(p-1)(q-1)+\frac{p+q}{2}-\frac{2}{3} \tag{70}$$

elde edilir. P_r'deki $\{V_{r_1}, V_{r_2}, \dots, V_{r_r}\}$ noktalarının K_p'deki noktalara uzaklıkları sırasıyla yazılırsa

$$V_{r_1} için \left(\frac{1}{r+4-1}+(p-1)\frac{1}{r+4-2}\right)=\frac{1}{r+3}+\frac{p-1}{r+2}$$
$$V_{r_2} için \left(\frac{1}{r+4-2}+(p-1)\frac{1}{r+4-3}\right)=\frac{1}{r+2}+\frac{p-1}{r+1}$$
$$\vdots$$
$$V_{r_{r-1}} için \left(\frac{1}{r+4-(r-1)}+(p-1)\frac{1}{r+4-r}\right)=\frac{1}{5}+\frac{p-1}{4}$$
$$V_{r_r} için \left(\frac{1}{r+4-r}+(p-1)\frac{1}{r+4-(r+1)}\right)=\frac{1}{4}+\frac{p-1}{3}$$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$\frac{1}{r+3}+\left(\frac{p}{r+2}+\frac{p}{r+1}+\cdots+\frac{p}{4}\right)+\frac{p-1}{3}$$
$$=\frac{1}{r+3}+p\left(H_{r+2}-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}-1\right)+\frac{p-1}{3}$$

$$=\frac{1}{r+3}+pH_{r+2}-\frac{3p}{2}-\frac{1}{3} \tag{71}$$

olur. P_r'deki $\{V_{r_1}, V_{r_2}, \dots, V_{r_r}\}$ noktalarının K_q'daki noktalara uzaklıkları (71)'den

$$\frac{1}{r+3}+qH_{r+2}-\frac{3q}{2}-\frac{1}{3} \tag{72}$$

biçiminde olur. P_r'deki $\{V_{r_1}, V_{r_2}, \dots, V_{r_r}\}$ nokta çiftleri arası uzaklıklar sırasıyla yazılırsa

$$V_{r_1} için \left(\frac{1}{r+4-1}+\frac{1}{r+4-2}+\cdots+\frac{1}{r+4-(r-2)}+\frac{1}{r+4-(r-1)}\right)$$
$$V_{r_2} için \left(\frac{1}{r+4-1}+\frac{1}{r+4-2}+\cdots+\frac{1}{r+4-(r-2)}\right)$$
$$\vdots$$
$$V_{r_{r-1}} için \left(\frac{1}{r+4-1}\right)$$

olup tüm bu değerler toplandığında

$$\frac{r-1}{r+3}+\frac{r-2}{r+2}+\frac{r-3}{r+1}+\cdots+\frac{2}{6}+\frac{1}{5}$$
$$=\left(1-\frac{4}{r+3}\right)+\left(1-\frac{4}{r+2}\right)+\left(1-\frac{4}{r+1}\right)+\cdots+\left(1-\frac{4}{6}\right)+\left(1-\frac{4}{5}\right)$$
$$=(r-1)-4\left(\frac{1}{r+3}+\frac{1}{r+3}+\cdots+\frac{1}{6}+\frac{1}{5}\right)$$
$$=(r-1)-4H_{r+3}+4\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{3}+\frac{1}{2}+1\right)$$
$$=r+\frac{22}{3}-4H_{r+3}$$
$$=\ r+\frac{22}{3}-\frac{4}{r+3}-4H_{r+2} \tag{73}$$

olur. (69), (70), (71),(72) ve (73) den

$$RCW\left(DK_{p,q,r}\right)=(p+q-4)H_{r+2}+\frac{p(p-1)+q(q-1)-4}{2(r+3)}+(p-1)(q-1)-(p+q)+r+6$$

olarak bulunur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada öncelikle graf teori ile ilgili gerekli bazı temel bilgiler verilmiştir. Daha sonra en çok bilinen Wiener tipinde mesafe bazlı topolojik indeksler ve tam graf bazlı yapıya sahip bazı özel graflar tanıtılmıştır. n noktalı yol graf P_n ve tam graf K_n graflarının literatürde kolaylıkla bulabileceğimiz Wiener tipinde topolojik indeksleri mertebelerine bağlı olacak biçimde hesaplanmıştır ve devamında yaygın şekilde üzerinde çalışılan tam graf bazlı özel graf türlerinin 6 tane Wiener tipinde topolojik indeksleri graf parametrelerine dayalı biçimde hesaplanmıştır. Ayrıca ananas, deniz kestanesi ve kırık deniz kestanesi grafların, tam tırtıl grafların özel durumları olduğu belirtilerek, tam tırtıl graflar için de Wiener tipinde topolojik indeksler graf parametrelerine dayalı biçimde elde edilmiştir. Bu çalışma ile literatürde iyi bilinen tam graf bazlı 6 özel graf çeşidi için en çok kullanılan 6 adet Wiener tipinde mesafe bazlı topolojik indeksleri hesaplanmış ve bunlarla ilgili bulunan bazı eşitlikler; bundan sonra yapılacak çalışmalara temel oluşturacak ve ileriki çalışmalara katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

[1] Chartrand G., Zhang P. 2012 A first course in graph theory. Dover publications inc., Mineola, New York, 450s.

[2] Wiener H. 1947. Structural determination of paraffin boiling points. J. Am. Chem. Soc., 69(1947), 17-20.

[3] Xu K., Liu M., Das K.C., Gutman I., Furtula B. 2014. A survey on graphs extremal with respect to distance-based topological indices. MATCH Commun. Math. Comput. Chem., 71(2014), 461-508.

[4] Birgin K. 2024. Grafların topolojik indeksleri ve kimyasal uygulamaları. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 109s, Nevşehir.

[5] Topcu H., Sorgun S., Haemers W.H. 2016. On the spectral characterization of pineapple graphs. Linear Algebra and its Applicaitons, 507(2016), 267-273.

[6] Topcu H., Sorgun S., Haemers W.H. 2019. The graphs cospectral with the pineapple graph. Discrete Applied Math., 269(2019), 52-59.

[7] Aouchiche M., Caporossi G., Hansen P. 2007. Variable neighborhood search for extremal graphs, 27. families of extremal graphs. https://www.gerad.ca/fr/papers/G-2007-87.pdf (Erişim tarihi:14.01.2025)

[8] Topcu H., Sorgun S. 2018. The kite graph is determined by its adjacency spectrum. Applied Math. and Comput.,330(2018), 134-142.

[9] Randić M. 1993. Noval molecular descriptor for structure-property studies. Chem. Phys. Let., 211(1993), 478-483.

[10] Klein D. J., Lukovits I., Gutman I. 1995. On the definition of the hyper-Wiener index for cycle-containing structures. J. Chem. Inf. Comput. Sci., 35(1995), 50-52.

[11] Plavšić D., Nikolić S., Trinajstić N., Mihalić Z. 1993. On the Harary index for the characterization of chemical graphs. J. Math. Chem., 12(1993), 235-250.

[12] Ivanciuc O., Balaban T. S., Balaban A. T. 1993. Reciprocal distance matrix, related local vertex invariants and topological indices. J. Math. Chem., 12(1993), 309-318.

[13] Ivanciuc O. 2000. QSAR comparative study of Wiener descriptors for weighted molecular graphs. J. Chem. Inf. Comput. Sci., 40(2000), 14212-1422.

[14] Ivanciuc O., Ivanciuc T., Balaban A. T. 2000. The complementary distance matrix, a new molecular graph metric. ACH Models chem., 137(2000), 57-82.

[15] Gutman I., Furtula B., Petrović M. 2009. Terminal Wiener index. J. Math. chem. 46(2009), 522-531.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Design, Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulation Studies of Novel Pyridinecarboxamide Derivatives as Potent HDAC6 inhibitors

İsmail Akçok[*1]

[*1]Department of Bioengineering, Faculty of Life and Natural Sciences, Abdullah Gül University, Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 19.01.2025, Kabul / Accepted: 25.02.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Drug design,
Cancer,
HDAC6,
Molecular Docking,
MD Simulations.

Abstract: Histone deacetylases (HDACs) are a family of enzymes which play vital roles in the regulation of gene expression and cellular processes. HDACs are classified into four main classes based on their homology, cellular localization, and structural characteristics. HDAC6 enzyme which is one of the class IIb enzyme has important functions in variety of physiological processes such as cell migration, immune responses, and neuronal function. Dysregulation of HDAC6 activity has been linked to the accumulation of toxic protein aggregates in neurodegenerative diseases, while its overexpression or altered activity in cancer cells can contribute to metastasis and tumorigenesis. In this study, potential HDAC6 inhibitors were designed and their inhibitory activities were investigated using in silico protocols, including molecular docking, molecular dynamics simulations and MM-PBSA calculations. Among the designed molecules, IA64 showed the best binding profile against HDAC6 enzyme, and could be considered as a lead molecule for further studies.

Potansiyel HDAC6 İnhibitörleri Olarak Yeni Piridinkarboksamid Türevlerinin Tasarım, Moleküler Kenetlenme ve Moleküler Dinamik Simülasyon Çalışmaları

Anahtar Kelimeler
İlaç tasarımı
Kanser,
HDAC6,
Moleküler Kenetlenme,
MD simulasyonu

Öz: Histon deasetilazlar (HDACs), gen ifadesinin ve hücresel süreçlerin düzenlenmesinde önemli rol oynayan bir enzim ailesidir. HDAC enzimleri homolojilerine, hücresel lokalizasyonlarına ve yapısal özelliklerine göre dört ana sınıfa ayrılır. Sınıf IIb enzimlerinden biri olan HDAC6 enzimi, hücre göçü, bağışıklık tepkileri ve nöronal işlev gibi çeşitli fizyolojik süreçlerde önemli işlevlere sahiptir. HDAC6 aktivitesinin düzensizliği, nörodejeneratif hastalıklarda toksik protein agregatlarının birikimiyle ilişkilendirilmiştir; kanser hücrelerinde aşırı ifadesi veya değişen aktivitesi ise metastaz ve tümör oluşumuna sebep olabilmektedir. Bu çalışmada, potansiyel HDAC6 inhibitörleri tasarlanmış ve bu moleküllerin inhibisyon potansiyelleri, moleküler kenetlenme, moleküler dinamik simülasyonları ve MM-PBSA hesaplamalarını içeren in silico protokolleri kullanılarak araştırılmıştır. Tasarlanan moleküller arasında IA64, HDAC6 enzimine karşı en iyi bağlanma profilini göstermiştir ve ileri çalışmalar için öncü bir molekül olarak görülebilir.

*İlgili Yazar, email: ismailakcok@gmail.com

1. Introduction

Histone deacetylases (HDACs) are a family of enzymes which play crucial roles in the regulation of gene expression and cellular processes [1]. This process occurs by the removal of acetyl groups from histones and non-histone proteins which is known as deacetylation, typically leads to chromatin condensation and transcriptional repression [2]. Studies had shown that, there are 18 isoforms of HDAC that are classified into four main classes (I, II, III, and IV) based on sequence similarity to yeast HDACs, cellular localization, and structural characteristics. Three of these classes contain zinc-dependent histone deacetylases (class I, II and IV) and one of them (class III) NAD+-dependent histone deacetylases (also known as sirtuins). HDAC6 belongs to class IIb and is mostly localized in the cytoplasm [3,4].

HDAC6 has important functions in variety of physiological processes such as cell migration, immune responses, and neuronal function [5]. Dysregulation of HDAC6 activity has been linked to the accumulation of toxic protein aggregates in neurodegenerative diseases, while its overexpression or altered activity in cancer cells can contribute to metastasis and tumorigenesis [6]. Its involvement in neurodegenerative disorders such as Alzheimer's disease and Parkinson's disease, and cancers has prompted growing interest in HDAC6 as a therapeutic target [7]. Regarding the role of HDACs on cancer, depending on the tissue context, HDACs can either inhibit or promote tumor progression. For example, HDAC1 and HDAC2 was found to be highly expressed and correlated with metastasis, differentiation, proliferation, and poor prognosis in many types of cancer. On the other hand, class IIb HDACs mainly play critical role in angiogenesis and migration [8].

Most of the pharmacophore structure of the HDAC inhibitors, including HDAC6, consist of three parts: Zinc binding group (ZBG), linker, and cap region. Zinc binding groups (such as hydroxamic acid group) makes a chelation with Zn^{2+} at the inner part of the active site, and this could be considered as the major interaction with the catalytic site. Cap group interacts with the amino acids found in the outer domain of the active site. Linker interacts with hydrophobic channels at the active site and combines the ZBG to the cap group. There are five pan-HDAC inhibitors are approved for use in clinics. These are vorinostat (SAHA), belinostat, panobinostat, chidamide (tucidinostat) and romidepsin [9-13]. Among these inhibitors, chidamide is not approved by United State Food and Drug Administration (FDA), however it is approved by China for the treatment of it was approved for the treatment relapsed or refractory adult T-cell leukemia-lymphoma. Up to date, no selective HDAC6 inhibitors were approved in clinics, however three of the candidates (ricolinostat, citarinostat and KA2507) have been in clinical trials for the treatment for different cancer cells, such as breast cancer, non-small cell lung cancer and melanoma [14-16].

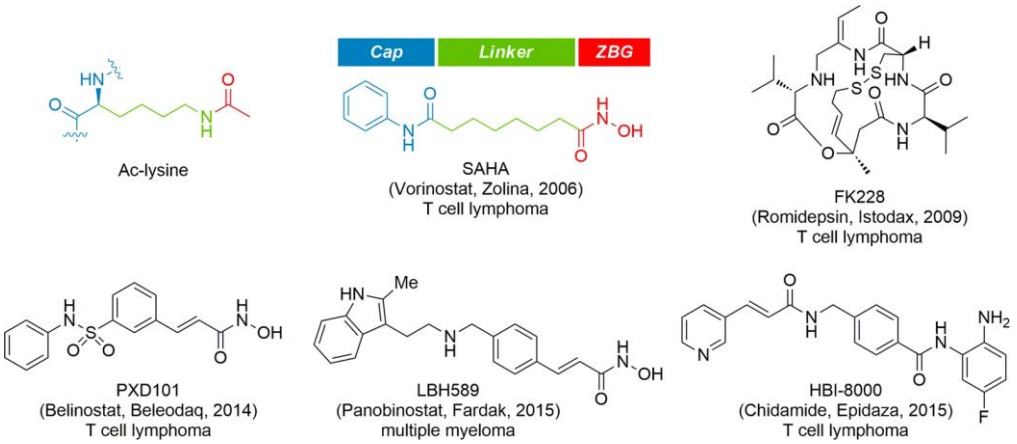


Figure 1. General Pharmacophore Model for HDAC Inhibitors and the Chemical Structures of Approved HDAC inhibitors [17]

Although various numbers of HDAC6 inhibitors and pan-HDAC inhibitors have been developed, it was observed that these candidates had limited success in clinical trials. HDAC6 inhibitors showed anticancer activity at high concentrations. This high concentration administration of HDAC6 inhibitors, however, have been demonstrated to reduce their HDAC6 selectivity, which potentially leading to off-target effects. However, the non-selectivity of pan-HDAC inhibitors has limited their clinical application due to side effects and off-target toxicity. When we consider all these reasons above, design and development of novel and selective HDAC6 inhibitors are crucial to overcome the potential issues.

When we consider the structures of the HDAC inhibitors, it is seen that, most of them (e.g. SAHA, belinostat and panobinostat) consist of hydroxamic acid moiety as Zn^{2+} binding group. On the other hand, chidamide and similar

compounds consist of amino-substituted benzamide moiety. In this study, it is aimed to design of a series of novel HDAC6 inhibitors and to investigate their binding properties against HDAC6 by using in silico protocols, including molecular docking, molecular dynamics simulations and MM-PBSA calculations. To create a suitable HDAC6 inhibitor skeleton, here it was designed novel HDAC6 inhibitors comprising pyridinecarboxamide "zinc binding group" (ZBG), phenyl linker, and naphthyl "cap group". Pyridinecarboxamide moiety, plays a crucial role in this study, due to its potential interaction with Zn^{2+}. Since the pyridinecarboxamide structural motif consist of both carbonyl group and nitrogen containing aromatic ring, it is expected to observe a chelation between pyridine nitrogen-Zn^{2+} and carbonyl oxygen-Zn^{2+}. Chemical structures of designed molecules (**IA61-IA72**) are listed in Figure 2.

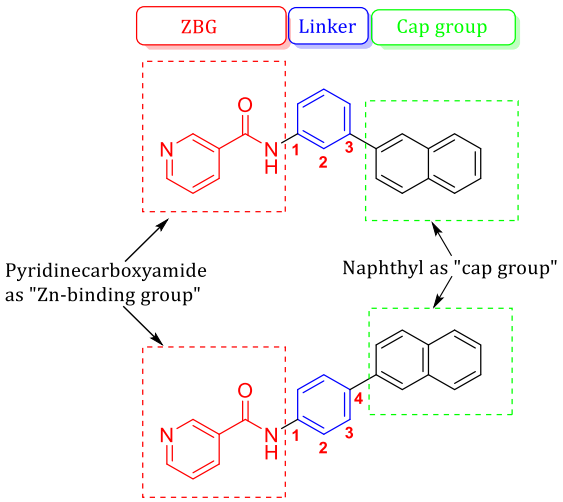


Figure 2. Design scheme of the potential HDAC6 inhibitors

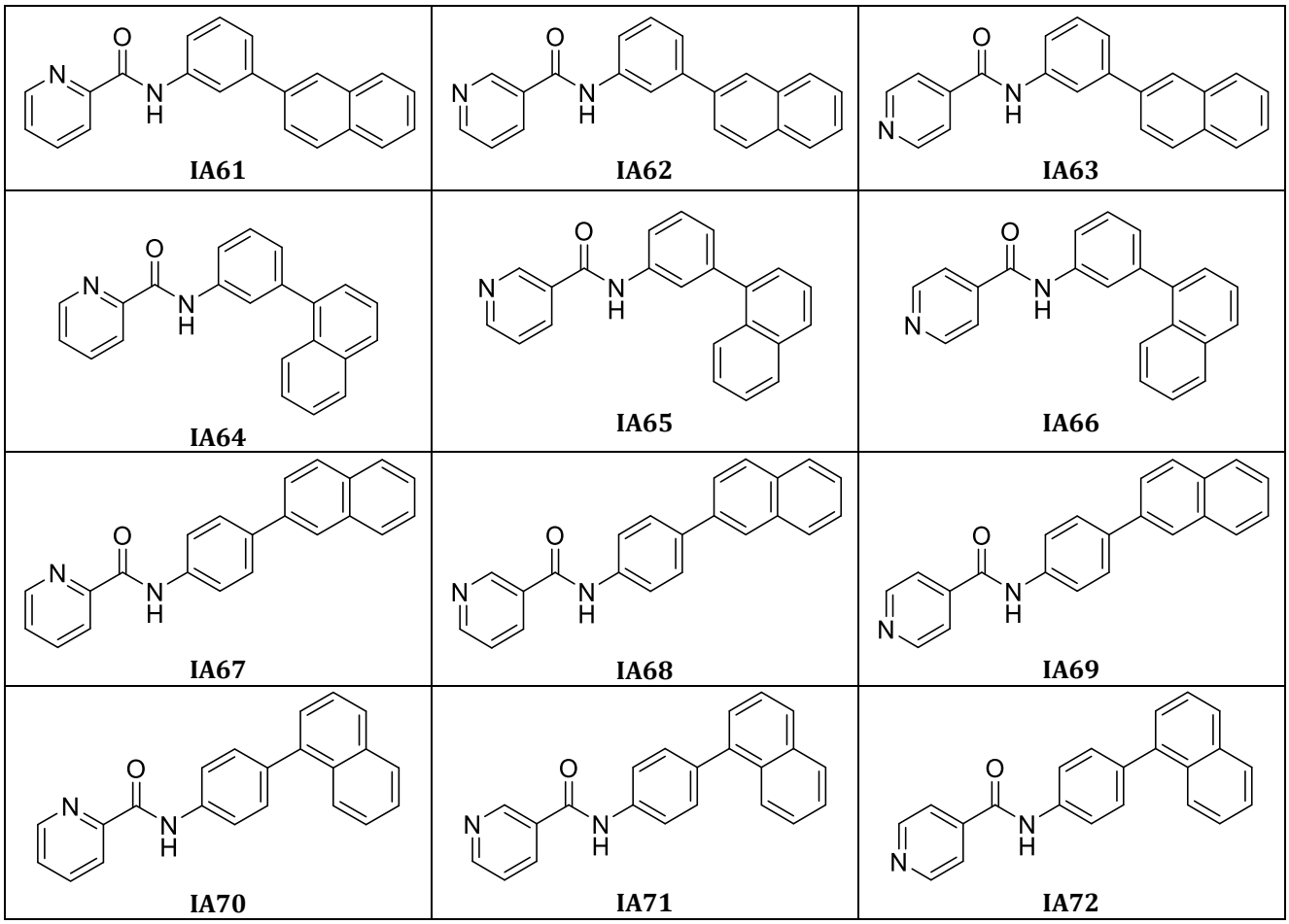


Figure 3. Chemical structures of the designed molecules **(IA61-IA72)**

2. Material and Method

2.1. Target protein and ligand preparation

X-ray crystal crystallography model of the target protein HDAC6 (PDB ID: 5EDU) was retrieved from RCSB Protein Data Bank (www.rcsb.org) web site. PDBFixer was used to prepare the protein for docking studies. It was cleaned off the existing water molecules, and USCF Chimera's DockPrep tool was used to add the missing residues and hydrogens to the protein.

For ligand preparation, molecules were drawn using ChemDraw. Structures were minimized by utilizing MMFF94 force, 3D coordinates generated, and converted to ready-to-dock format by using OpenBabel [18,19] The ligand topology and parameters files of designed compounds for use in the MD simulations were generated using SwissParam web service [20].

2.2. Molecular Docking

Smina [21], a fork of Autodock Vina[22], was used in molecular docking studies. Interactions between docked ligands and receptor were visualized by BIOVIA, Dassault Systèmes, Discovery Studio Visualizer, v21.1.0.20298, San Diego: Dassault Systèmes, 2021 and PyMOL, The PyMOL Molecular Graphics System, Version 3.0 Schrödinger, LLC. Furthermore, one of them according to their residue interactions and as well as binding affinity was selected for MD analysis.

2.3. Molecular Dynamics (MD) Simulations

Molecular dynamics simulation was used for determining stability of the ligand in the active site of the target protein in over time, which coordinates for it was provided by the molecular docking. MD simulation was computed using GROMACS version 2021[23,24]. The same methodology was used described in our previous work[25].

2.4. MM-PBSA Calculations

To clearly assess the binding of the selected compounds with the active site of the protein, MM-PBSA (Molecular Mechanics Poisson-Boltzmann Surface Area) calculations were performed using the *g_mmpbsa* package of GROMACS. Binding averages of the whole trajectory have been utilized for each compound at every 100 ps, resulting in 1000 frames in total. Furthermore, the last 10 ns while using every frame available, meaning last 1000 frames, 90-100 ns, interval also calculated to provide additional information regarding the overall stability of the compounds in the simulation.

3. Results

3.1. Molecular Docking Studies

Molecular docking studies are important for discovery of novel drug candidates, since the experimental binding mechanism and affinity can be predicted by this method, and it provides indispensable information about the possible interactions. Docking scores give us information about the binding energy between the ligands and the target protein. A very negative score corresponds to a strong binding. Thus, smaller the docking score, better the affinity.

When we check the docking scores between the designed molecules and HDAC6 protein, PDB ID: 5EDU, **IA64** shows the best binding energy with -8.8 kcal/mol. Other ligands were also shown good binding energies between 8.1 – 8.6 kcal/mol. When we examine the best candidate's (IA64) interactions in the active site, it is observed that it has a closest interaction with Zn^{2+} (grey sphere) with the expected zinc binding group (ZBG) interaction (Figure 4). Main interactions between the ligands and the 5EDU were mainly observed as Π-Π (pi-pi) interactions with Phe620, Phe679 and Phe680, H bond interaction with His651, Π-alkyl interactions with Leu749, and Π-cation interaction with Arg673 (see the 3D and 2D representations at Figure 4, 5 and 6).

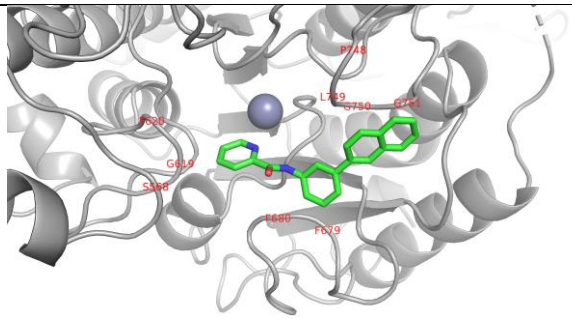
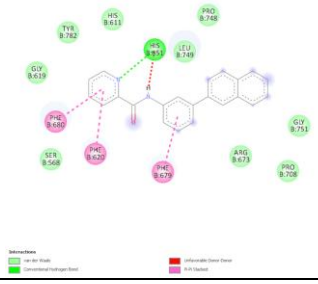
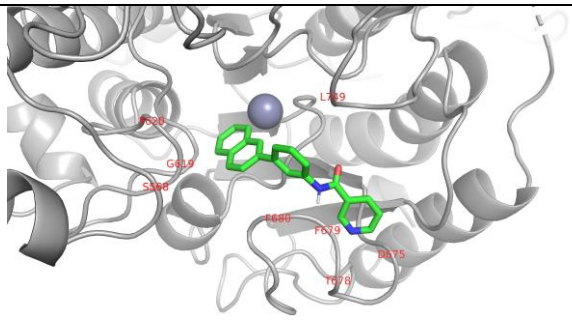
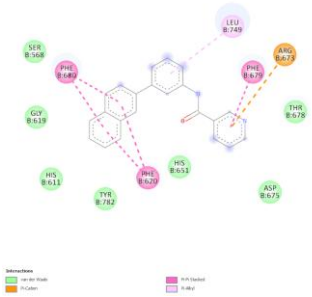
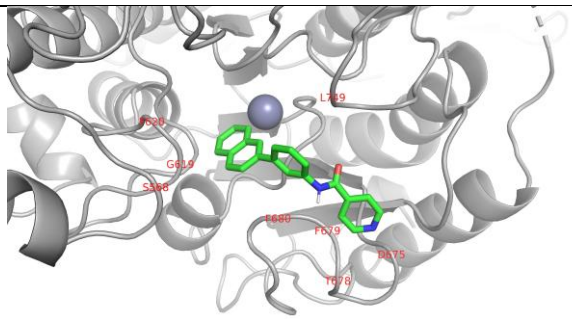
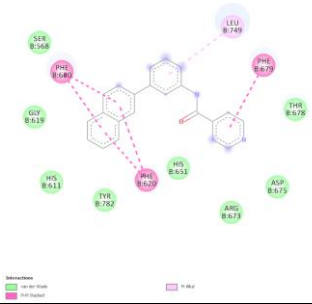
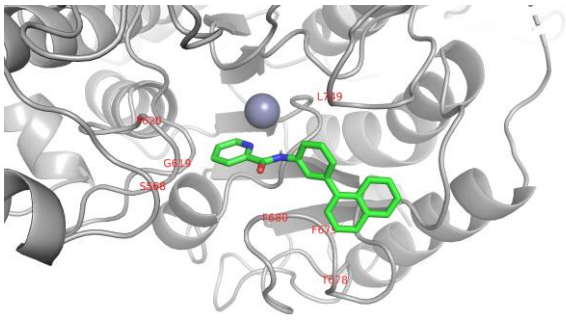
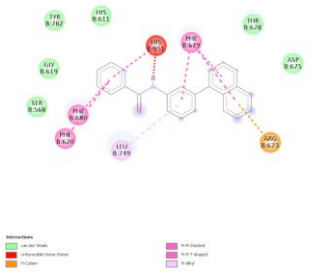
Compound ID	Docking Score (kcal/mol)	3D representation of ligand-protein interactions	2D ligand-protein interactions
IA61	-8.4		
IA62	-8.1		
IA63	-8.1		
IA64	-8.8		

Figure 4. 2D and 3D representations of HDAC6 (5EDU) and ligands interactions **(IA61-IA64)**.

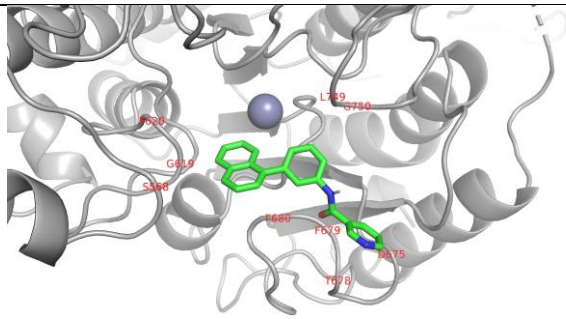
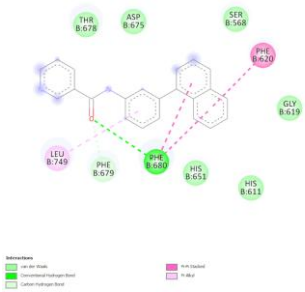
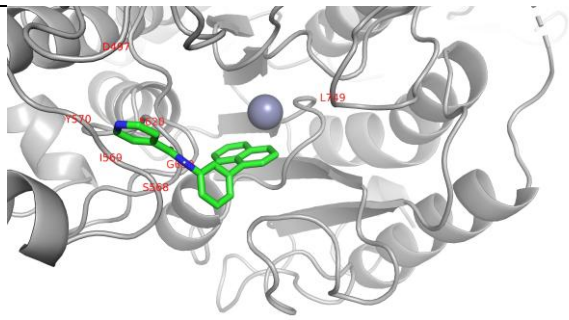
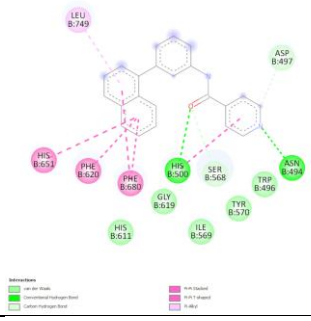
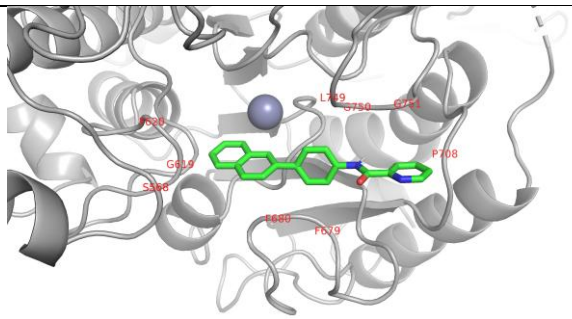
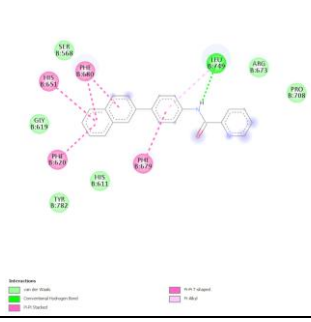
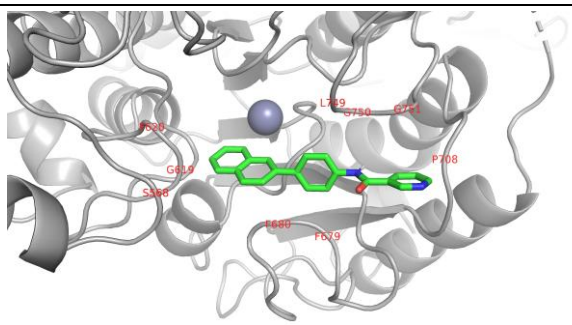
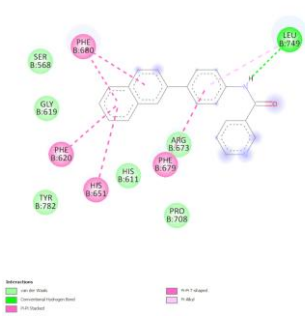
Compound ID	Docking Score (kcal/mol)	3D representation of ligand-protein interactions	2D ligand-protein interactions
IA65	-8.6		
IA66	-8.2		
IA67	-8.3		
IA68	-8.2		

Figure 5. 2D and 3D representations of HDAC6 (5EDU) and ligands interactions **(IA65-IA68)**.

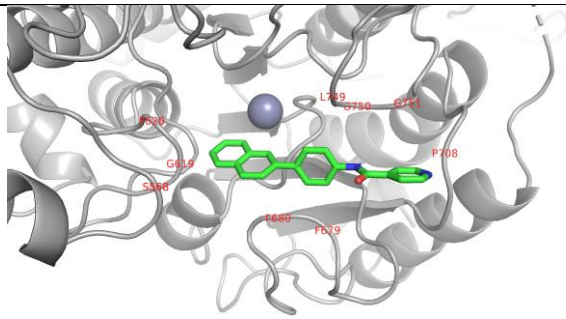
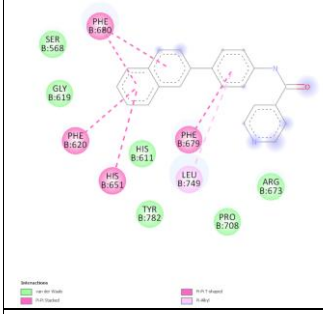
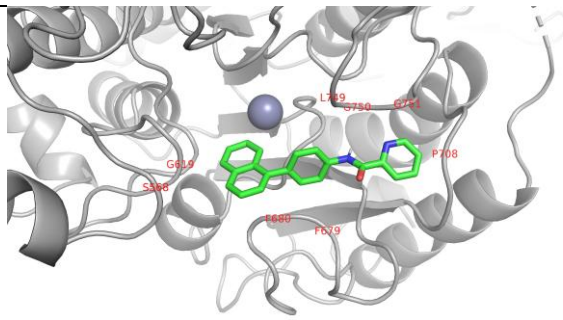
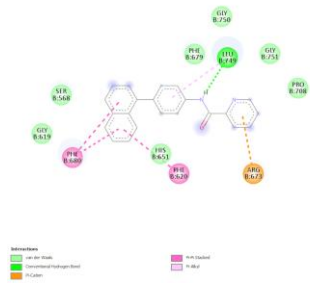
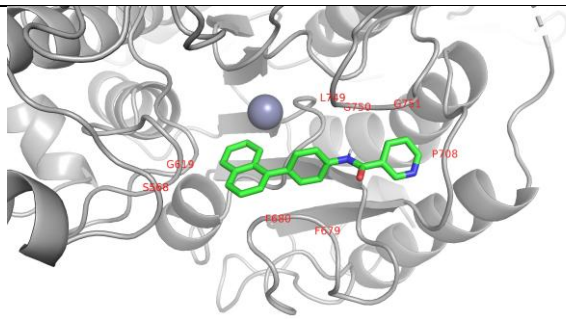
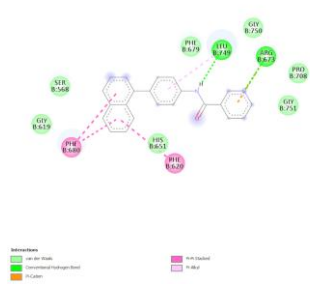
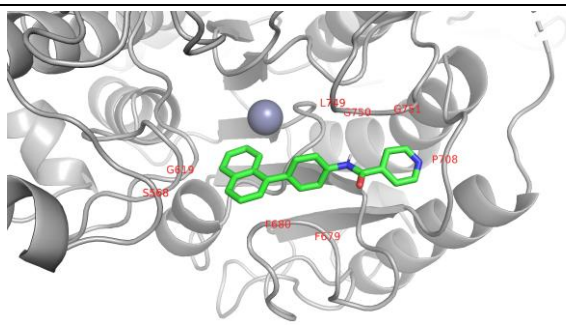
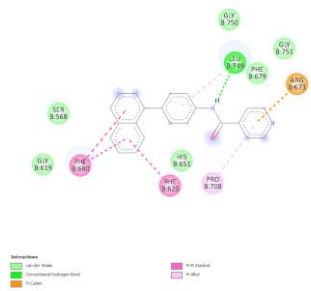
Compound ID	Docking Score (kcal/mol)	3D representation of ligand-protein interactions	2D ligand-protein interactions
IA69	-8.2		
IA70	-8.3		
IA71	-8.5		
IA72	-8.4		

Figure 6. 2D and 3D Representations of HDAC6 (5EDU) and Ligands Interactions **(IA69-IA72)**.

3.2. Molecular Dynamics (MD) Simulations & MM-PBSA Calculations

MD simulations give us crucial information about the stability of the ligand-protein complex. In this study, docking pose of the molecule **IA64**, which has the best docking score, has been selected for further studies. MD simulation studies have been performed for the evaluation of the **IA64-5EDU** protein complex. For this purpose, 100 nanoseconds (ns) molecular dynamic simulation was applied. There are a lot of information which can be obtained from MD simulations. Hereby, it is presented the root mean square deviation (RMSD) plot, H-bond plot, distance between the center of mass (COM) of the ligand and COM of the amino acid residues in active site of the protein.

The RMSD plot of shows us the difference between the protein's backbone atoms from its initial conformation to its final conformation. The stability of the protein is inversely correlated with fluctuations observed during the simulations. For more stable the protein structures, we observe smaller deviations. In Figure 7A, RMSD plot shows

that the deviation of the protein and backbone atoms do not exceed 3Å. On the other hand, although IA64 shows a fluctuation at the beginning (0-17 ns) and last period of the simulation, its RMSD values are smaller than 5Å at the most of the period of the simulation. Especially, between 40 ns and 90 ns period, RMSD value is around 3Å (Figure 7A).
During the simulation, the number of the H-bond interaction is observed as one H-bond. Although there is no H-bond interaction at beginning of the simulation, between 18 ns and 80 ns a constant H-bond interaction is detected (Figure 7B).

The Contact Heatmap Plot (Figure 7C) shows the distance (in Å) between the center of mass (COM) of the ligand and COM of the amino acid residues in active site of the protein. Phe680, Phe679, Leu749, Gly750 are observed as the closest amino acid residues during the simulation. Besides, the distance between the COM of the ligand and Zn^{2+} is observed as 5Å to 10Å after the 20 ns of the simulation. By using MM-PBSA calculation methodology, average binding energy was calculated as –19.2 kcal/mol (Figure 7B).

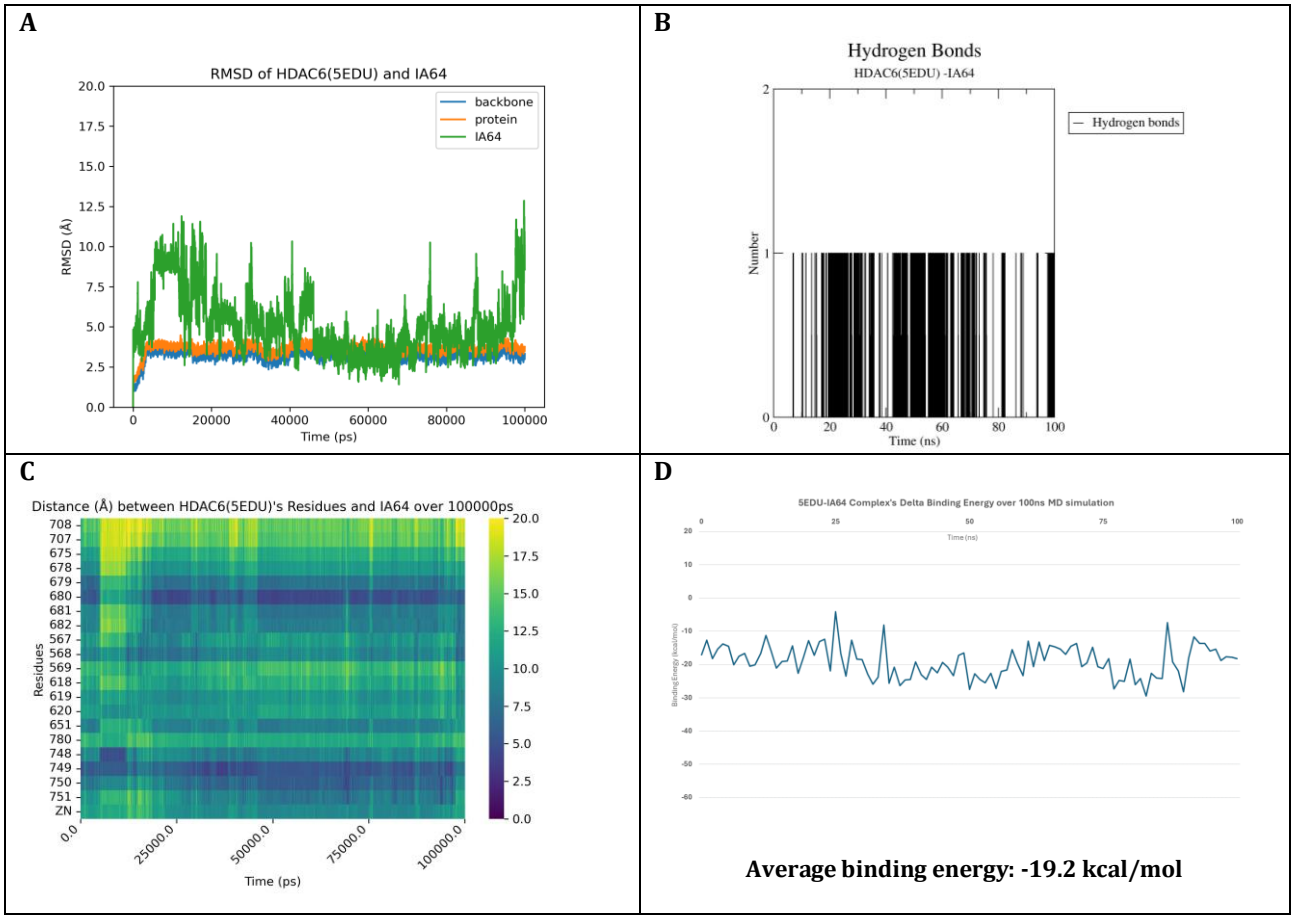


Figure 7. A) RMSD Plot, **B)** H-bond Plot, **C)** Contact Heatmap Plot, and **D)** MM-PBSA Analysis of **IA64-5EDU** Complex During 100 ns Simulation.

4. Discussion and Conclusion

In this study, a series of novel HDAC6 inhibitors were designed and their binding properties were evaluated against HDAC6 by using in silico protocols, including molecular docking and MD simulation. Amide functional group is commonly used fragment in the HDAC inhibitors. Amide group can make a number of hydrogen bonds in the active site of the HDAC6. In the design of the molecules, pyridinecarboxamide moiety was focused, since pyridine ring has a nitrogen atom and it may form additional hydrogen bond with the side chains, and it has also potential to make chelation with Zn^{2+}. Different pyridines (2-pyridyl, 3-pyridyl and 4-pyridyl groups) were used in the design of the potential inhibitors according to the position of the nitrogen atom on pyridine. As a linker, phenyl is chosen because of its potential Π-Π (pi-pi) interactions with phenylalanine (Phe) side chains, and Π-alkyl interactions with hydrophobic leucine (Leu) side chains in the active site of the protein. We can see such a phenyl linker in many HDAC inhibitors, such as belinostat, panobinostat and chidamide. For the cap, naphthyl group was chosen considering the ability to close the "cap region" of the active site with its size. In order to reveal another structure-activity relationship, naphthyl groups was bonded to the phenyl linker on either carbon 3 or carbon 4.

According to results, the most promising candidate was determined as IA64, which has 2-pyridinecarboxamide group as ZBG, and naphthyl group bonded to carbon 3 of phenyl linker. When we check the interactions between the most promising candidate IA64 and HDAC6 complex, the close interaction of 2-pyridinecarboxamide group with Zn^{2+} and histidine side chain (His651) which has a coordination with Zn^{2+} was clearly seen. Other important interactions were observed as Π-Π interactions of Phe620, Phe679 and Phe680 residues with phenyl linker. MD simulation data proves the consistent interactions of these Phe residues with molecule IA64. These results are consistent with our expectations.

Considering the results of this in silico study, among the designed molecules, IA64 could be considered as a potential HDAC6 inhibitor candidate. Besides, the ease of the synthesis of the candidate molecule is always one of the important parameters in drug design process. On the other hand, although in silico studies show promising results, in vitro and in vivo validations are always needed. As a result, in this study, it was proposed the design of a new inhibitor candidate against HDAC6.

Acknowledgment

Author thanks Res. Asst. Ceyhun Sarı for their help in MD simulation studies.

References

[1] Chen, H. P., Zhao, Y. T., Zhao, T. C. 2015. Histone deacetylases and mechanisms of regulation of gene expression. Critical reviews in oncogenesis, 20(1-2), 35–47.

[2] Park, S.Y., Kim, J.S. 2020. A short guide to histone deacetylases including recent progress on class II enzymes. Exp Mol Med 52, 204–212.

[3] Ruzic, D.; Ellinger, B.; Djokovic, N.; Santibanez, J.F.; Gul, S.; Beljkas, M.; Djuric, A.; Ganesan, A.; Pavic, A.; Srdic-Rajic, T.; et al. 2022. Discovery of 1-Benzhydryl-Piperazine-Based HDAC Inhibitors with Anti-Breast Cancer Activity: Synthesis, Molecular Modeling, In Vitro and In Vivo Biological Evaluation. Pharmaceutics. 14, 2600.

[4] Bertrand, P. 2010. Inside HDAC with HDAC Inhibitors. Eur. J. Med. Chem. 45, 2095–2116.

[5] Li, Y., Shin, D. and Kwon, S.H. 2013. Histone deacetylase 6 plays a role as a distinct regulator of diverse cellular processes. FEBS J, 280, 775-793.

[6] Simões-Pires, C., Zwick, V., Nurisso, A., Schenker, E., Carrupt, P. A., & Cuendet, M. 2013. HDAC6 as a target for neurodegenerative diseases: what makes it different from the other HDACs?. Molecular neurodegeneration, 8, 7.

[7] Onishi, T., Maeda, R., Terada, M., Sato, S., Fujii, T., Ito, M., Hashikami, K., Kawamoto, T., Tanaka, M. 2021. A novel orally active HDAC6 inhibitor T-518 shows a therapeutic potential for Alzheimer's disease and tauopathy in mice. Sci Rep , 11, 15423.

[8] Hontecillas-Prieto, L., Flores-Campos, R., Silver, A., de Álava, E., Hajji, N., & García-Domínguez, D. J. 2020. Synergistic Enhancement of Cancer Therapy Using HDAC Inhibitors: Opportunity for Clinical Trials. Frontiers in genetics, 11, 578011.

[9] Mann, B.S.; Johnson, J.R.; Cohen, M.H.; Justice, R.; Pazdur, R. 2007. FDA Approval Summary: Vorinostat for Treatment of Advanced Primary Cutaneous T-Cell Lymphoma. Oncologist, 12, 1247–1252.

[10] Lee, H.-Z.; Kwitkowski, V.E.; Del Valle, P.L.; Ricci, M.S.; Saber, H.; Habtemariam, B.A.; Bullock, J.; Bloomquist, E.; Li Shen, Y.; Chen, X.-H.; et al. 2015. FDA Approval: Belinostat for the Treatment of Patients with Relapsed or Refractory Peripheral T-Cell Lymphoma. Clin. Cancer Res., 21, 2666–2670.

[11] Raedler, L.A. Farydak. 2016. (Panobinostat): First HDAC Inhibitor Approved for Patients with Relapsed Multiple Myeloma. Am. Health Drug Benefits, 9, 84–87.

[12] Lu, X.; Ning, Z.; Li, Z.; Cao, H.;Wang, X. 2016. Development of Chidamide for Peripheral T-Cell Lymphoma, the First Orphan Drug Approved in China. Intractable Rare Dis. Res., 5, 185–191.

[13] Grant, C.; Rahman, F.; Piekarz, R.; Peer, C.; Frye, R.; Robey, R.W.; Gardner, E.R.; Figg, W.D.; Bates, S.E. 2010. Romidepsin: A New Therapy for Cutaneous T-Cell Lymphoma and a Potential Therapy for Solid Tumors. Expert Rev. Anticancer Ther., 10, 997–1008.

[14] Columbia University Multi-Center. 2021. Phase IB Trial of ACY-1215 (Ricolinostat) Combined with Nab-Paclitaxel in Unresectable or Metastatic Breast Cancer. Available online: https://clinicaltrials.gov/study/NCT02632071 (Accessed on 16 January 2025).

[15] Celgene. 2017. A Phase 1b Study of the Selective HDAC6 Inhibitor ACY-241 in Combination with Ipilimumab and Nivolumab in Patients with Unresectable Stage III or Stage IV Melanoma. Available online: https://clinicaltrials.gov/study/NCT02935790 (Accessed 16 January 2025).

[16] Celgene . 2023. A Phase 1b Study of the Selective HDAC6 Inhibitor ACY-241 in Combination with Nivolumab in Patients with Unresectable Non-Small Cell Lung Cancer. Available online: https://clinicaltrials.gov/study/NCT02635061 (Accessed on 16 January 2025).

[17] Choi, M.A., Park, S.Y., Chae, H.Y., Song, Y., Sharma, C., Seo, Y.H. 2019. Design, synthesis and biological evaluation of a series of CNS penetrant HDAC inhibitors structurally derived from amyloid-β probes. Sci Rep 9, 13187.

[18] Boyle, E.H., Jr., Humphrey, R.H., Pollack, J.M., Hawver, T.H. and Story, P.A. 2011. The relation between emotional intelligence and job performance: A meta-analysis. J. Organiz. Behav., 32, 788-818.

[19] Halgren, T.A. 1996. Merck molecular force field. V. Extension of MMFF94 using experimental data, additional computational data, and empirical rules. J. Comput. Chem., 17, 616-641.

[20] Zoete, V., Cuendet, M.A., Grosdidier, A. and Michielin, O. 2011. SwissParam: A fast force field generation tool for small organic molecules. J. Comput. Chem., 32, 2359-2368.

[21] Koes, D. R., Baumgartner, M. P., Camacho, C. J. 2013. Lessons Learned in Empirical Scoring with smina from the CSAR 2011 Benchmarking Exercise. Journal of Chemical Information and Modeling, 53, 1893-1904.

[22] Trott, O. and Olson, A.J. (2010), AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. J. Comput. Chem., 31: 455-461.

[23] Abraham, M. J., Murtola, T., Schulz, R., Páll, S., Smith, J. C., Hess, B., Lindah, E. 2015. GROMACS: High performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers. SoftwareX, 1–2, 19–25.

[24] Berendsen, H. J. C., Postma, J. P. M., Van Gunsteren, W. F., Dinola, A., & Haak, J. R. (1984). Molecular dynamics with coupling to an external bath. The Journal of Chemical Physics, 81(8), 3684–3690.

[25] Gencer Akçok, E.B., Güner, H., Akçok, İ. 2024. Determination of promising inhibitors for N-SH2 domain of SHP2 tyrosine phosphatase: an in silico study. Mol Divers, 28, 3393–3407.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Doğrusal Olmayan Sistem Durum Tahmini İçin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Tabanlı Yeni Bir Parçacık Filtresi

Fatma Selcen TURGUN*[1], Hasan ZORLU [2]

*[1] Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, YOZGAT
[2] Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 29.01.2025, Kabul / Accepted: 14.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Durum tahmini,
Parçacık filtresi,
Yapay arı kolonisi,
Parçacık sürü optimizasyon algoritması

Öz: Sıralı Monte Carlo yöntemi olarak da bilinen Parçacık Filtresinin (PF) temel fikri, durumun minimum varyans tahminini elde etmek için sistemin olasılık yoğunluk fonksiyonunu bazı ayrık rastgele örnekleme noktaları ile yaklaştırmaktır. Olası sistem durumlarını temsil etmek için bir dizi parçacıklar, ağırlıkları ve gözlemleri dâhil ederek tahmini sürekli olarak günceller. Bununla birlikte, çoğu parçacığın ağırlığı birkaç yinelemeden sonra ihmal edilebilir hale geldiğinden parçacık fakirleşmesi ve parçacık çeşitliliğinin azalması sorunları ortaya çıkar. Bu makale, doğrusal olmayan ve Gauss olmayan sistemler için durum tahmininde Parçacık Filtresi (PF) algoritmasının performansını artırmak için Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritmasının standart PF'ye dâhil edilmesini tanıtmaktadır. PF'nin sorunlarını çözmek için YAK algoritması, PF'nin yeniden örnekleme aşamasından sonra algoritmaya dâhil edilir ve parçacıkların istenen olasılık dağılımına daha etkin bir şekilde yaklaşmalarını sağlar. Önerilen yaklaşım, YAK algoritmasının güçlü yönlerinden yararlanarak en yüksek ağırlıklara sahip parçacıkları geliştirerek, sistemin gerçek durumunu daha iyi temsil etmeyi ve önemli parçacıkların sayısını artırmayı amaçlamaktadır. Önerilen yöntem, geleneksel PF ve Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritmasıyla optimize edilmiş PF ile karşılaştırılmıştır. YAK tabanlı algoritmanın etkinliğini göstermek için bir bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen YAK tabanlı yeni algoritmanın tahmin doğruluğunu standart Parçacık Filtresine kıyasla önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

A New Particle Filter Based On Artificial Bee Colony Algorithm For Nonlinear System State Estimation

Keywords
State estimation,
Particle filter,
Artificial bee colony,
Particle swarm optimization algorithm

Abstract: The basic idea of the Particle Filter (PF), also known as the sequential Monte Carlo method, is to approximate the probability density function of the system with some discrete random sampling points to obtain a minimum variance estimate of the state. A set of particles to represent possible system states continuously updates the estimate by incorporating weights and observations. However, problems of sample impoverishment and reduced particle diversity arise as the weight of most particles becomes negligible after a few iterations. This paper introduces the incorporation of the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm into the standard PF to improve the performance of the Particle Filter (PF) algorithm in state estimation for nonlinear and non-Gaussian systems. To solve the problems of the PF, the ABC algorithm is incorporated into the PF algorithm after the resampling stage, allowing the particles to more efficiently converge to the desired probability distribution. The proposed approach aims to better represent the true state of the system and increase the number of important particles by developing particles with the highest weights by utilising the strengths of the ABC algorithm. The proposed method is compared with conventional PF and PF optimised by Particle Swarm Optimisation (PSO) algorithm. A computer simulation is carried out to demonstrate the effectiveness of the ABC-based algorithm. The simulation results show that the proposed new ABC-based algorithm significantly improves the prediction accuracy compared to the standard Particle Filter.

*İlgili Yazar, email: f.selcen.bozkurt@yobu.edu.tr

1. Giriş

Doğrusal olmayan sistem, girdi ve çıktı arasındaki ilişkinin basit bir doğrusal denklemle ifade edilemediği sistemlere verilen genel bir isimdir. Doğrusal bir denklemle tam olarak ifade edilemez, daha karmaşık ilişkiler söz konusudur. Süperpozisyon ilkesi geçerli değildir. Birden fazla girdinin etkisi, girdilerin toplamının etkisiyle aynı olmayabilir. Homojenlik ilkesi de geçerli değildir. Girdiyi bir sabit ile çarparsak, çıktı aynı sabit ile çarpılmayabilir. Doğrusal olmayan sistemler, gerçek dünyadaki birçok sistemin daha doğru bir modellemesini sağlar. Bu nedenle mühendislik, fizik, biyoloji, ekonomi gibi birçok alanda önemli bir çalışma alanıdır. Mühendislikte elektronik devre tasarımı, kontrol sistemleri, robotik, havacılık gibi alanlarda sıklıkla karşılaşılır. Doğrusal olmayan sistem durum tahmini, gerçek dünyadaki birçok sistemin karmaşık davranışlarını daha iyi anlamak ve kontrol etmek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu teknik, bir sistemin iç durumunu, direkt olarak ölçülemeyen değişkenlerini, mevcut ölçümler ve sistem modeli kullanılarak tahmin etmeyi amaçlar. Birçok mühendislik uygulamasında, dinamik bir sistemin durumlarının tahmin edilmesi gerekir. Bir durum tahmin problemi, dinamik bir sistemin matematiksel modeli verildiğinde, gürültülü bir ölçüm kullanarak zamanla değişen durumların tahmin edilmesini istemektedir [1]. Tahmin problemlerinde odak genellikle gözlemlerden gerçek sinyalin çıkarılması olarak adlandırılan filtrelemedir. Filtreler genellikle çalışırken belirli bir amaç fonksiyonunu en aza indirir. Bu tür filtrelere Optimal filtreler denir [2]. Optimal filtreler, özyinelemeli ve toplu filtreler olarak kategorize edilir [3][4]. Toplu filtre, örneğin en küçük kareler filtresi, bilinmeyen durumları tahmin etmek için tüm ölçüm geçmişini kullanır. Özyinelemeli filtreler ise ölçümleri sırayla alma ve işleme yeteneğine sahiptir. Özyinelemeli filtreler ayrıca doğrusal ve doğrusal olmayan filtreler olarak kategorize edilebilir [3][4]. Yinelemeli filtreler temelde iki aşamadan oluşur, bunlar; tahmin ve güncellemedir [4]. Tahmin, geçerli adımın ilk tahminini üretmek için önceki zaman adımının tahmini durumlarını kullanır. Bu aşama aynı zamanda önsel durum tahmini olarak da bilinir çünkü mevcut zaman adımında elde edilen gözlemleri kullanmaz. Güncelleme aşamasında, önsel durum tahmini, durum tahminini iyileştirmek için mevcut gözlemle birleştirilir. Bu iyileştirilmiş tahmin aynı zamanda sonsal durum tahmini olarak da adlandırılır. Dinamik durumlar, alınan ölçüme dayalı olarak elde edilen sonsal olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) kullanılarak tahmin edilebilir. Literatürde, Kalman Filtresi (KF) [5], Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) [6], Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) [7], Parçacık Filtresi (PF) [8] olmak üzere birçok özyinelemeli filtre bulunur.

Mevcut filtreler arasında, Parçacık Filtreleri (PF'ler), sistem modelini işleme sürecinde neredeyse herhangi bir varsayıma ihtiyaç duymayan gelişigüzel olasılık yoğunluklarına yaklaşabilir. Bu nedenle, PF'ler, salgın tahmini, mobil robot lokalizasyonu ve haritalama, nesne izleme, jeofizik sistemler, yer bilimleri ve uzaktan algılama, ulaşım sistemleri ve orman yangını yayılma simülasyonu gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Olasılık yoğunluklarının noktasal parçacık temsiline dayalı olarak çalışır [10]. PF'ler de ki her parçacık, bir sistemin olası bir durumunu temsil eder. Bu parçacıklar sistemin durumuna ilişkin gözlem ölçümlerini kabul ederek, sistemin gerçek durumuna sürekli olarak yaklaşmak için tahmine dayalı bilgilerle yeni parçacıklar üretir. PF'ler, çeşitli karmaşık problemlere, özellikle doğrusal olmayan ve Gauss olmayan problemlere uygulanır [11]. Örnekleme, ağırlık hesaplama ve yeniden örnekleme olmak üzere PF'lerin yinelemeli sürecinde üç ana adım vardır.

Örnekleme aşamasında, sistem durumunu temsil eden önceki parçacıklar kullanılarak yeni bir parçacık seti oluşturulur. Daha sonra tüm parçacıkların ağırlıkları hesaplanır ve normalizasyon yapılır. Önsel durum tahmininde mevcut zaman adımında elde edilen ölçümler kullanılmaz [12]. Bu PF'nin parçacık fakirleşmesi sorunu olarak bilinir. Bu soruna çözüm olarak sunulan yeniden örnekleme aşamasında, yavru parçacıklar normalizasyon yapılmış ağırlıklara göre elde edilir ve bu yeniden örneklenen parçacıklar bir sonraki iterasyonun girdisi olarak kullanılacaktır. Ancak standart yeniden örnekleme prosedürü, önemli parçacıkları kopyalar ve uygunluklarına göre önemsiz olanları atar ama bu da parçacık yoksullaşmasına sebep olur [13].

Son zamanlarda, biyolojik evrim ilkelerine dayanan yeni bir teknik olarak, evrimsel hesaplama, çeşitli doğrusal olmayan ve çok amaçlı optimizasyon problemlerine giderek daha yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Evrimsel hesaplama ve parçacık filtreleri belirli benzer özelliklere sahip olduğundan, geçmiş göreceli araştırmalarda parçacık filtrelerinin parçacık yoksullaşma problemine çözüm geliştirmek için bazı evrimsel algoritmalar tanıtılmıştır. [14], [15] ve [16]'da yeniden örneklemeden sonra örneklerin çeşitliliğini artırmak için Genetik Algoritma (GA) ve PF birleştirilmiştir. Örnek büyüklüğünü azaltmak ve verimliliği artırmak için parçacık filtresine yerel bir arama yöntemi eklenmiştir [17]. [18] ve [19]'de yeniden örnekleme sürecini iyileştirmek için Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) kullanılmıştır. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), parçacık yoksullaştırma ve örnek boyutu bağımlılık problemlerini çözmek için PF'ye dâhil edilmiştir [20]. En yeni gözlemleri örnekleme sürecine dâhil ederek, parçacıklar en potansiyel bölgelere doğru hareket ettirilir ve

parçacıkların dağılımı optimize edilebilir sonucuna ulaşılmıştır. [21]'de PSO algoritması ve GA algoritması kombine edilip PF'ye dâhil edilmiştir. Bu algoritma, parçacık sürüsü optimizasyonunun hızlı yakınsama hızını genetik algoritmanın güçlü küresel arama yeteneğiyle birleştirmiştir.

Bu makalede, Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması olarak bilinen meta-sezgisel yönteme dayalı olarak doğrusal olmayan sistemlerin durum tahmini için yeni bir Parçacık Filtresi önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın ana fikrinde parçacıklar yeniden örnekleme adımından sonra tüm parçacık durumlarından küresel optimum çıktıyı daha da iyileştirmek için Yapay Arı Kolonisi algoritmasına dâhil edilir, böylelikle sonsal dağılıma daha da yaklaşılabilir. Yeniden örnekleme adımının getirdiği parçacık çeşitliliği azalması sorununa çözüm sunmak için tasarlanmış yeni bir değiştirilmiş PF önerilmiştir. Genel PF ve PSO algoritmasıyla optimize edilmiş PF ile karşılaştırıldığında, daha doğru tahmin sonuçları sağlamıştır. Tanımlanan doğrusal olmayan bir problem üzerinde önerilen YAK tabanlı PF ve PSO algoritmasıyla optimize edilmiş PF algoritması uygulanmıştır. Tahminin simülasyon sonuçları tatmin edicidir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de genel parçacık filtresi ile PSO ve YAK algoritması kısaca gözden geçirilmektedir. PSO ve YAK algoritması tabanlı PF tanıtılmaktadır. 3. bölümde bir durum tahmin problemi formüle edilmiştir ve yeni tahmin algoritması ile gerçekleştirilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar 4. bölümde sunulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Standart parçacık filtresi

Parçacık Filtresi, Bayes filtre teorisinden türetilmiştir [22]. Bayes filtresinin ana fikri, bilinen sistem bilgilerini kullanarak sistem durumunun sonsal dağılımını oluşturmaktır. Sistemin durumu doğrudan ölçülemezken, Bayes teorisine göre sistemin durumunu tahmin etmek için sistemin gözlemini kullanmak gerekir [23]. Genel olarak, önceki dağılımı tahmin etmek için süreç modelini kullanır ve ardından sonsal dağılımı elde etmek için yeni gözlemleri dâhil ederek bu dağılımı günceller.

PF, yinelemeli Bayes filtrelemeyi gerçekleştirmek için sıralı Monte Carlo simülasyonunu kullanır. Parçacık filtresinin temel düşüncesi, sonsal dağılımı N ağırlıklı örnek kümesiyle temsil etmek ve tüm parçacıkların ağırlıklı toplamını kullanarak durum tahmini elde etmektir. Örnek kümesi boyutu sonsuz olma eğilimindeyse, Monte Carlo karakteri ve sonsal olasılık dağılımı eşdeğerdir [23].

PF, durum olasılık dağılımını temsil etmek için ağırlıklı parçacıklar kullanır. Doğrusal olmayan filtreleme problemini çözmek için tasarlanmış parametrik olmayan bir yaklaşım tekniğidir ve durum uzay modeliyle tanımlanabilen doğrusal olmayan herhangi bir sisteme uygulanabilir.
Bir sistemin durum uzay modeli şu şekilde tanımlanabilir:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) \tag{1}$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \tag{2}$$

Burada $f(.)$ ve $h(.)$ sırasıyla durum transfer ve gözlem ölçüm fonksiyonudur. x_k, k zamanındaki sistem durum değişkenidir, z_k gözlemlenen ölçüm değeridir, u_{k-1} süreç ve v_k gözlem ölçüm gürültüsüdür.

Standart Parçacık Filtresi algoritmasında ilk olarak önceki dağılımdan $x_k^i (i = 1,2, \dots, N)$ parçacık kümesi oluşturulur ve burada her parçacığın ağırlığı 1/N'dir. Yaklaşık sonsal dağılım ise şöyledir:

$$p(x_{0:k}|z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N} u_k^i \, \delta(x_{0:k} - x_{0:k}^i) \tag{3}$$

Burada $x_{0:k}^i = [x_0^i, x_1^i, \dots, x_k^i]$ $p(x_{0:k}|z_{1:k})$ tarafından üretilen rasgele bir örnektir. $z_{1:k} = [z_1, z_2, \dots z_k]$ ölçüm verisidir. u_k^i, x_k^i örneği için önem ağırlığıdır. $\delta()$ Dirac fonksiyonunu temsil eder. Ancak pratikte $p(x_{0:k}|z_{1:k})$ genellikle yanıltıcı olduğundan x_k^i için $q(x_{0:k}|z_{1:k})$'dan önem örneklemesi yapılır. u_k^i tahmini daha sonra şu şekilde hesaplanabilir:

$$u_k^i = \frac{p(x_{0:k}^i|z_{1:k})}{q(x_{0:k}^i|z_{1:k})} \tag{4}$$

Daha sonra ağırlık güncelleme denklemini şu şekilde belirlenebilir:

$$u_k^i = u_{k-1}^i \frac{p(z_k|x_k^i)\, p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{0:k-1}^i, z_{1:k})} \tag{5}$$

Burada $p(z_k|x_k^i)$ olasılık fonksiyonu ve $p(x_k^i|x_{k-1}^i)$ durum transfer dağılımıdır. Sistem Markov sürecini takip ediyorsa, ağırlık güncellemesi şu şekilde basitleştirilebilir:

$$u_k^i = u_{k-1}^i \frac{p(z_k|x_k^i)\, p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{k-1}^i, z_k)} \tag{6}$$

Pratik hesaplamalarda, yoğunluk fonksiyonu $q(x_k^i|x_{k-1}^i, z_k)$ sıklıkla önceki dağılım olan $p(x_k^i|x_{k-1}^i)$ ile değiştirilir. Her yineleme için önem ağırlık güncellemeleri aşağıdaki gibidir:

$$u_k^i = u_{k-1}^i p(z_k|x_k^i) \tag{7}$$

Ağırlıklar daha sonra şu şekilde normalizasyon yapılır:

$$u_k^i = \frac{u_k^i}{\sum_{i=1}^N u_k^i} \tag{8}$$

Dejenerasyondan kaçınmak için standart yaklaşım, düşük ağırlıklı parçacıkların yüksek ağırlıklı parçacıklarla tekrarlanmasını ortadan kaldırmaktır. Yeniden örnekleme adımı, yeniden örneklemeden sonra toplam parçacık sayısı değişmeden kalan ve u_k^i 1/N'ye eşit olan yeni bir parçacık kümesi elde etmek için u_k^i'ye göre örneği kopyalama işlemidir. Yeniden örneklemeden sonra, yeni bir parçacık seti $\{\hat{x}_k^i\}_{i=1}^N$ oluşturulur ve yeniden örnekleme eşiği, şu şekilde hesaplanan etkin örnek N_{eff} olarak tanımlanır:

$$N_{eff} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^N (u_k^i)^2} \tag{9}$$

Yeni hedef durum tahmini elde edilen yeni parçacıklara ve ağırlıklara dayalı olarak şu şekilde güncellenebilir:

$$\tilde{x}_k = \sum_{i=1}^N x_k^i\, u_k^i \tag{10}$$

Sonrasında algoritma önem örneklemesi adımına döner ve filtreleme bitene kadar filtrelemeye devam eder. Yukarıdaki adımlarda görüldüğü üzere, PF'nin yeniden örnekleme işleminin parçacıkların çeşitliliğini azalttığı ve hedef durum tahmininde büyük bir hataya yol açacağı gözlemlenir.

Algoritma 1'de, standart parçacık filtresinin sözde kodu gösterilmektedir.

Algoritma 1. Standart parçacık filtresi sözde kodu

$\left[\{x_k^j, u_k^j\}_{i=1}^N\right] = PF\left[\{x_{k-1}^j, u_{k-1}^j\}_{i=1}^N, z_k\right]$
For=1:N
    parçacık seti $x_k^i \sim p(x_k, x_{k-1}^i)$
    her bir parçacığın ağırlığı $u_k^i = p(z_k|x_k^i)$
End For
toplam ağırlıkları hesapla: $t = topla\left(\{u_k^i\}_{i=1}^N\right)$
For= 1:N
    Normalize: $u_k^i = t^{-1} u_k^i$
End For
Yeniden Örnekleme
$\left[\{x_k^j, u_k^j, \ldots\}_{i=1}^N\right] = Yeniden\ Örnekleme\left[\{x_k^j, u_k^i\}_{i=1}^N\right]$
Durum Tahmini

2.2. Parçacık filtresi sınırlamaları

Parçacık Filtresi, yaklaşık sonsal dağılımı hesaplamak için sıralı önem örneklemesi (SIS) yöntemini kullanır. Genel Parçacık filtresinin önem fonksiyonu optimalin altında olduğundan, bu yöntemde iki ciddi sorun vardır. İlk sorun, olasılık çok dar olduğunda veya olasılık önceki dağılımın sonunda olduğunda olasılık ve önceki dağılımın örtüşme bölgesi çok küçüktür ve bu da örnek fakirleşmesi sorununu ortaya çıkarır. Dolayısıyla, güncelleme adımından sonra, yalnızca birkaç parçacığın önemli önem ağırlıkları olacaktır. Bu nedenle, örnek seti yalnızca birkaç farklı parçacık içerir ve bazen birkaç yinelemeden sonra tek bir örneğe düşer. Sonuç olarak, önemli örnekler kaybolabilir. Genel Parçacık filtresinin diğer bir sorunu ise örnek boyutu bağımlılığıdır. Örnek seti boyutu küçükse, gerçek durum etrafında dağılmış parçacıklar olmayabilir. Bu nedenle, birkaç yinelemeden sonra parçacıkların gerçek duruma yakınsaması çok zordur. Genel Parçacık filtresi için, bu sorunu çözmenin bir yolu örnek set boyutunu artırmaktır. Ancak, başarılı bir tahmin sağlamak için tüm durum uzayını kapsayan yeterince büyük örnek seti sağlarsak, parçacık filtresinin hesaplama verimliliği düşecektir ve hatta sistemin gerçek zamanlı gereksinimlerini karşılayamama durumu meydana gelecektir [24].

2.3. Parçacık sürü optimizasyon algoritması

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen, stokastik bir küresel optimizasyon tekniğidir [25]. Bu algoritma, kuş veya balık sürülerinin yiyecek arama davranışlarını model alarak, popülasyon tabanlı bir yaklaşım sergiler. PSO, evrimsel hesaplama ve sürü zekası özelliklerini bir araya getirir ve özellikle doğrusal olmayan, türevlenemeyen, çok modlu optimizasyon problemlerini çözmede sağlam ve hızlı bir yöntem olarak bilinir [26]. Bu özellikleri sayesinde PSO, optimizasyon problemlerinde geniş bir uygulama alanı bulmuş ve çeşitli mühendislik ve bilim dallarında başarıyla kullanılmıştır.

Algoritmanın temelinde, bireyler yani parçacıklar arasındaki iş birliği ve rekabet yoluyla karmaşık bir çözüm alanında arama yapmak ve optimum sonuca ulaşmak yer alır. PSO algoritması, başlangıçta uygulanabilir çözüm alanında bir popülasyon oluşturur. Parçacıkların ağırlığı ve hacmi bulunmaz. N boyutlu bir uzayda popülasyondaki her bir birey çözüm alanında bir hız vektörü ile hareket eder. Parçacıkların hareketi hem kendi bireysel deneyimlerinden hem de tüm parçacıkların genel deneyiminden etkilenerek güncellenir. Her nesilde, parçacıklar iki kritik değeri takip eder: biri, bireysel parçacığın şimdiye kadar bulduğu en iyi çözüm, diğeri ise tüm popülasyonun bulduğu en iyi çözüm. Bu süreç, parçacıkların uygunluk değerleri doğrultusunda yönlendirilir ve popülasyondaki diğer parçacıklarla yapılan iş birliği ve rekabet sayesinde optimizasyon arayışı sürdürülür.
PSO algoritmasının özü, parçacıkların bir sonraki konumlarını hem bireysel hem de küresel en iyi çözümlerin bilgilerini kullanarak belirlemeleridir. Bu yapı, algoritmayı çok çeşitli sürekli fonksiyonların optimizasyonunda etkili kılar [27].

m parçacıktan oluşan rastgele bir parçacık sürüsü için, i. parçacığın n boyutlu uzaydaki konumları ve hızları sırasıyla $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ve $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 'dir. İterasyonların her adımında, parçacıklar konumlarını ve hızlarını iki en iyi değere göre günceller. Bunlardan biri $Pbest_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, i. parçacığın mevcut adıma kadar olan bireysel önceki en iyi değeridir. Bir diğeri ise $Gbest_i = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, popülasyondaki tüm parçacıkların en iyi değeridir. En iyi iki değer bulunduktan sonra, her parçacık konumunu ve hızını aşağıdaki denklemlere göre günceller.

$$v_{id}^{k+1} = w * v_{id}^{k} + c_1 * r_1 * \left(x_{pbest} - x_{id}^{k}\right) + c_2 * r_2 * \left(x_{gbest} - x_{id}^{k}\right) \tag{11}$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^{k} + v_{id}^{k+1} \tag{12}$$

Burada, v_{id}^{k} k. iterasyondaki i. parçacığın v_i hızının d. bileşeni, i =1,2, ... ,N. w eylemsizlik katsayısı veya diğer bir ifadeyle atalet ağırlığı, $c_1$ve c_2 ivme katsayıları pozitif sabitlerdir. r_1 ve r_2 U(0,1) dağılımına uyan tekdüze olasılık dağılımına göre üretilen rasgele sayılardır. Genel olarak PSO büyük atalet ağırlığı kullanarak güçlü küresel arama yeteneğine sahiptir ve bunun tersi de geçerlidir.

2.3.1. Parçacık sürü optimizasyon algoritmasına dayalı parçacık filtresi

Yukarıdaki PSO ve Parçacık Filtresinin tanıtımından ikisinin birçok ortak yönü olduğunu görebiliriz. Öncelikle, PSO parçacıkların konumlarını ve hızlarını arama alanında yinelemeli olarak güncelleyerek en iyi değeri elde ederken, PF parçacıkların konumlarını ve ağırlıklarını yinelemeli olarak güncelleyerek arka olasılık dağılıma en iyi yaklaşımı elde eder. İkinci olarak, PSO'da en iyi uygunluk değerine sahip bir parçacık arama alanındaki en uygun noktayı belirtir. Benzer şekilde, PF'de en yüksek ağırlığa sahip bir parçacık en olası sistem durumu olarak

kabul edilir. Üçüncüsü, hem PSO hem de PF'de amaç parçacıkları en iyi konumlara doğru hareket ettirmektir. PSO parçacıkları, her parçacığın konumunu ve hızını her parçacığın önceki en iyi değerine ve tüm parçacıkların küresel en iyi değerine göre güncelleyerek en uygun noktaya doğru hareket ettirirken, PF her parçacığın önce durum modelini kullanarak konumunu günceller ve ardından ölçüm modeli aracılığıyla her parçacık kendi ağırlık değerini günceller, parçacığı gerçek arka olasılık dağılıma doğru hareket ettirir. Bu nedenle, PSO algoritması yukarıdaki benzerliklere dayanarak standart parçacık filtresinin performansını iyileştirebilir.

Bu bölümde önerilen PSO-PF algoritması tanıtılmıştır. Parçacık filtrelemenin eksikliklerini gidermek için, literatürde [28], yeniden örnekleme sürecini iyileştirmek, parçacık bozulmasını azaltmak ve durum tahmininin doğruluğunu ve algoritmanın yakınsamasını iyileştirmek için parçacık filtrelemeye parçacık sürüsü optimizasyonu eklenmiştir [29]. Parçacık sürüsü optimizasyon yöntemi, parçacık filtresinin yeniden örnekleme aşamasından sonra tüm parçacık durumlarından küresel optimum çıktıyı daha da rafine etmek için kullanılır. Algoritma 2, öncelikle tüm parçacık durumlarını başlatan ve ardından tahmin, ölçüm ve yeniden örneklemeyi gerçekleştirmek için parçacık filtresini kullanan PSO-PF algoritmasının sözde kodunu gösterir.

PSO-PF algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir:

(1) Adım 1'de ölçüm değerini elde edilir. İlk olarak, bir uygunluk fonksiyonu tanımlanarak her parçacığın uygunluğu uygunluk fonksiyonu denklem (13) ile hesaplanır. Geleneksel parçacık filtresi, optimal olmayan bir önem fonksiyonu kullanır, bu nedenle parçacık örnekleme süreci optimal olmayan haldedir, parçacık filtresi örnekleme sürecini optimize etmek için, en son ölçülen değerler örnekleme sürecine duruma dahil edilir.

$$z_k(fitness) = exp\left[-\frac{1}{2R_k}\left(z_k - \widehat{z^i}(k|k\text{-}1)\right)^2\right] \tag{13}$$

Burada z_k en son ölçülen değer, R_k, gözlemlenen ölçüm gürültü varyansıdır; $\widehat{z^i}_{(k|k-1)}$ ise tahmin değeridir.

(2) Parçacık seti oluşturulur. Başlangıç parçacıkların belirtmek için önem yoğunluk fonksiyonundan N adet $\{x^i_{0:k}, w^i_k\}^N_{i-1}$ parçacık örneklenir ve parçacık sürüsü başlatılır. Her bir örneğin başlangıç ağırlıklarını $\{w^i_k = 1/N\}$ olarak tanımlanır, önem yoğunluk fonksiyonunun transferinin önsel olasılığı denklem (14) kullanılarak bulunur.

$$x^i_k \sim q\left(x^i_k | x^i_{k\text{-}1}, z_k\right) = p\left(x^i_k | x^i_{k\text{-}1}\right) \tag{14}$$

(3) Her parçacığın uygunluk değeri hesaplanır ve en uygun konumu belirlenir. En son ölçülen değerlere göre, mevcut parçacık ağırlıklarını denklem (15) ile hesaplanır.

$$w^i_k = w^i_{k\text{-}1}\, p\left(z_k | x^i_k\right) \tag{15}$$

(4) Parçacıklar yeniden örnekleme sürecine girer. Parçacık sürüsü optimizasyon yöntemi, en iyi çözümü elde etmeye yönelik bir algoritma olduğundan, parçacık filtresinin yeniden örneklemesinden sonra tüm parçacık durumlarından küresel en iyi çıktıyı daha da hassaslaştırmak için kullanılır.

(5) Tüm parçacık durumları parçacık sürüsü optimizasyon yöntemine kopyalanır. Her parçacığın hızını ve konumunu güncellemek için PSO algoritması ve sırasıyla denklemler (11) ve (12)'u kullanılır. Böylece parçacıklar gerçek duruma yakın hale getirilir. Parçacıklar gerçek duruma yakın konumlanmışsa, parçacık sürüsündeki her parçacığın uygunluğu çok yüksektir. Tersine, parçacık sürüsündeki her parçacığın bireysel optimum değerleri ve parçacık sürüsünün küresel optimum değeri çok düşükse, parçacıklar gerçek duruma yakın konumlanmamış demektir, bu sırada parçacık kümesi, PSO algoritmasını kullanarak her parçacığın hızını ve konumunu optimum değere göre günceller ve parçacıkların gerçek duruma hareket etmesini sağlar. PSO algoritmasının özü, tüm parçacıkları yüksek olasılık olasılığına sürmektir. En son parçacık ağırlıkları denklem (16) ile normalize edilir.

$$\widetilde{w}^i_k = \frac{w^i_k}{\sum_{i=1}^N w^i_k} \tag{16}$$

(6) Elde edilen yeni parçacıklara ve ağırlıklara dayalı olarak durum tahminleri hesaplanır.

$$\tilde{x}_k = \sum_{i=1}^{N} x_k^i \, u_k^i \tag{17}$$

Maksimum yineleme sayısına ulaşılıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Koşullar sağlanırsa algoritma durur, sağlanmazsa yinelemeli olarak Adım 2'ye döner.

Algoritma 2'de PSO algoritması ile optimize edilmiş parçacık filtresinin sözde kodu gösterilmiştir.

Algoritma 2. PSO algoritması ile optimize edilmiş parçacık filtresinin sözde kodu

(1)$İlklendirme$
$For\ i = 1, \dots, N, ilk\ parçacıkları\ oluşturma, x_0^{n,(i)} \sim p(x_0^n)$
(2)$For\ k > 0$
(2.1)PF ölçüm $güncellemesi$
$\left[\{x_k^i\}_{i=1}^N\right] = PF\left[\{x_k^i\}_{i=1}^N, z_k\right]$
(2.2)$Parçacıkların\ ağırlıklarının\ hesaplanması$
(2.3)$Yeniden$ Örnekleme
(2.4)$Tüm\ parçacık\ durumlarının\ PSO\ yöntemine\ kopyalanması$
$Parçacık\ En\ İyisini\ Hesapla\ P', P_{pbest}[t]);$
$Ağırlıklı\ Yeleği\ Hesapla\ P_{pbest}[t], P_{gbest}[t]);$
$Hızları\ Hesapla\ (V[t]);$
$Parçacık\ güncellemesi\ P'$
$t = t + 1;$
(2.5)$Ağırlıkların\ normalize\ edilmesi$
$\tilde{w}_k^i = \frac{w_k^i}{\sum_{i=1}^N w_k^i}$
(2.6)$Durum\ Tahmini$
(2.6) $k = k + 1\ ve\ (2.1)'den\ itibaren\ yineleme\ gerçekleştirilir.$

2.4. Yapay arı kolonisi algoritması

Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması, bal arılarının yiyecek arama davranışlarından ilham alan popülasyon tabanlı bir metasezgisel optimizasyon tekniğidir [30]. Derviş Karaboğa tarafından 2005 yılında önerilen bu algoritma, karmaşık sorunlara en uygun çözümleri bulmak için bir arı kolonisinin arama sürecini, işbirlikçi davranışını taklit eder [31].

YAK algoritmasında, yiyecek arayan arılar üç gruba ayrılır, bunlar görevli işçi, gözcü ve keşifçi arılardır. Kolonin ilk yarısı işçi yapay arılardan oluşur ve ikinci yarısı gözcü arıları içerir. Her yiyecek kaynağı için yalnızca bir işçi arı vardır. İşçi arılar belirli yiyecek kaynaklarını kullanır ve diğer arılarla bilgi paylaşır. Başka bir deyişle, kovanın yakınındaki yiyecek kaynaklarının sayısı işçi arıların sayısına karşılık gelir. Bir yiyecek kaynağının konumu, optimizasyon problemine olası bir çözümdür. Gözcü arılar, işçi arılar tarafından paylaşılan bilgilere dayanarak yiyecek kaynaklarını seçerler ve en umut verici alanlara odaklanırlar. Keşifçi arılar ise potansiyel çözümler için yeni alanları keşfederek arama sürecinde çeşitliliği garanti ederler [30].

İlgili problemin kalitesi, bir yiyecek kaynağında bulunan nektar miktarıyla ilgilidir. İşçi veya gözcü arıların sayısı, koloni büyüklüğüne eşittir. YAK algoritmasının üç temel kontrol parametresini vardır ve bunlar sırayla; koloni büyüklüğü, sınır değeri ve maksimum döngü sayısının (MCN) değeridir [30].

YAK algoritması, işçi, gözcü ve keşifçi arı aşamasını iteratif olarak tekrar eder. Bu süreç, maksimum iterasyon sayısına ulaşmak veya tatmin edici bir çözüm bulmak gibi bir sonlandırma kriteri karşılanana kadar devam eder. YAK algoritması, fonksiyon optimizasyonu, sınıflandırma sorunları, parametre tahmini ve özellik seçimi dahil olmak üzere çeşitli optimizasyon problemlerine başarıyla uygulanmıştır [32]. Sadeliği, çok yönlülüğü ve çok çeşitli optimizasyon problemlerini çözmedeki etkinliği, onu sürü zekası tabanlı optimizasyon algoritmalarında popüler bir seçim haline getirmiştir [33].

YAK algoritması ana adımları şu şekilde açıklanabilir [33][34]:

YAK algoritmasında süreç, ilk yiyecek kaynaklarının rastgele belirlenmesiyle başlar. Rastgele pozisyon üretim süreci, (18) denklemini kullanarak her parametrenin alt ve üst sınırları arasında bir değer üreterek gerçekleştirilir.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0,1) * (x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (18)$$

Burada, $i = 1 \ldots SN$ ve $j = 1 \ldots PN$ 'dir. Burada SN, yiyecek kaynaklarının sayısı ve PN ise optimize edilecek parametre sayısıdır. x_j^{min}, j parametresinin alt sınırını ve x_j^{max}, j parametresinin üst sınırını tanımlar.

İşçi arılar, (19) denkleminde verilen eşitliği kullanarak yiyecek kaynağının civarında yeni bir komşu yiyecek kaynağı belirler ve kalitesini değerlendirir. Burada, j, [1, D] aralığında rastgele üretilen bir tam sayıdır. γ, [–1, 1] aralığında alınan rastgele bir değerdir. (19) denkleminde, v_i kaynağı, x_i'nin yalnızca bir parametresini değiştirerek bulunur.

$$v_{ij} = x_{ij} + \gamma * (x_{ij} - x_{kj}) \quad k \in \{1, \ldots, SN\} \; j = 1, \ldots, D \quad (19)$$

Eğer v_i, x_i'den iyiyse, işçi arı o adresi hafızasından siler. Aksi takdirde, eski adrese gitmeye devam eder. YAK algoritmasında gözcü arılar bu bilgiler ışığında nektar miktarını hesaplar ve bu ilgili olasılıklara ek olarak farklı yenilebilir kaynakları seçer [33]. Temel YAK algoritmasında Bir rulet çarkı seçimi (RWS) yöntemi kullanılarak kalite değerine dayalı bir seçim süreci gerçekleştirilir [35]. Rulet çarkı yöntemine göre, kaynakların seçim olasılığı denklem (20) ile hesaplanır. Burada, uygunluk i, i'inci kaynağın kalitesini gösterir ve SN, işçi arı sayısını temsil eder. Tüm işçi arıların arama süreçleri tamamlandıktan sonra gözcü arıların birbirleri ile yaptıkları titreşim hareketleri ile yiyecek kaynakları ile ilgili bilgiler aktarılır.

$$P_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=0}^{SN} fitness_j} \quad (20)$$

Gözcü arılar bir yiyecek kaynağı seçtiklerinde, her arı yiyecek kaynağının yakınında denklem (20) ile seçilen yeni bir çözüm bulur. Yeni çözüme ve eldeki çözümü iyileştirmek için seçilen yiyecek kaynağına açgözlü bir seçim uygulanır. Konum, sınırlı sayıda yinelemeyle daha fazla geliştirilemediğinde, yiyecek kaynağı atılır. Keşifçi arı denklem (18)'i yeni bir yiyecek kaynağı belirlemek için kullanır. Gereksinimler karşılanırsa, YAK algoritması sona erer. Aksi takdirde, ilk adıma geri dönülür.

Parçacık filtresini iyileştirmek için YAK algoritmaların kullanılması, YAK algoritmanın parçacıkların kullanım verimliliğini artırabilen, sonsal olasılık dağılımına yaklaşmak için gereken parçacıkları daha az yapan ve yeniden örneklemenin getirdiği sorunları önleyen benzersiz optimizasyon yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Hesaplamayı belirli bir ölçüde azaltır, algoritmanın gerçek zamanını etkili bir şekilde iyileştirebilir. Ayrıca, YAK algoritması parçacık çeşitliliğini etkili bir şekilde artırabildiğinden, parçacık bozulmasını çözebilir böylece algoritmanın doğruluğunu artırabilir, filtre sapması olgusunu etkili bir şekilde önleyebilir ve durum tahmin doğruluğunu artırabilir.

2.4.1. Yapay arı kolonisi algoritmasına dayalı parçacık filtresi

Bu makalede Parçacık Filtresi algoritması parçacık bozulmasını iyileştirmek, parçacıkların çeşitliliğini artırmak ve algoritmanın yerel optimuma düşmesini önlemek için yeni bir yöntem olarak YAK algoritması ile optimize edilmiştir. Parçacık filtresinin sınırlamalarının üstesinden gelmek için, YAK algoritmasının örnekleme sürecini optimize etmesi düşünülmüştür. PF ve YAK algoritmalarını bir araya getirmek ve daha verimli bir Parçacık filtresi oluşturmak mümkündür [29].

İlk olarak, bir uygunluk fonksiyonu denklem (13) ile en son gözlem dikkate alınır.

YAK algoritması, tüm parçacıkları en iyi uygunluk değerine sahip olana doğru hareket ettirir. Tüm parçacıklar yüksek olabilirlik bölgesi etrafında dağılmışsa, her parçacığın uygunluk değeri yüksektir.

YAK-PF 'nin adımları aşağıdaki gibidir:[29]
(1) Parçacık seti oluşturulur. Denklem (14) ile başlangıç parçacıkları olarak önem yoğunluğu fonksiyonundan N adet $\{x_0^i, i = 1, \ldots, N\}$ parçacık örneklenir.

(2) Her parçacığın uygunluk değeri hesaplanır ve en uygun konumu belirlenir.

(3) Parçacıkların ağırlıkları denklem (15) ile hesaplanır.

(4) Yeniden örnekleme.

(5) Parçacık seti YAK algoritmasının popülasyonunu oluşturacak şekilde tanımlanır. YAK algoritması ana döngüsü parametreleri belirlenir. İşçi arılar için hızlanma katsayısı tanımlanır, yeni yiyecek pozisyonu belirlenir ve sınırlar uygulanır. Değerlendirme ve karşılaştırma gerçekleştirilir. Uygunluk değerleri ve seçim olasılıkları hesaplanır. Gözcü arılar için rulet çarkı seçim yöntemi tanımlanır. Hızlanma katsayısı tanımlanır ve yeni yiyecek pozisyonu belirlenir. Sınırlar uygulanır, değerlendirme ve karşılaştırma gerçekleştirilir. Bulunan en iyi çözüm güncellenir ve şimdiye kadar bulunan en iyi hafıza da tutulur [29].

(6) Parçacık ağırlıkları denklem (16) ile normalize edilir.

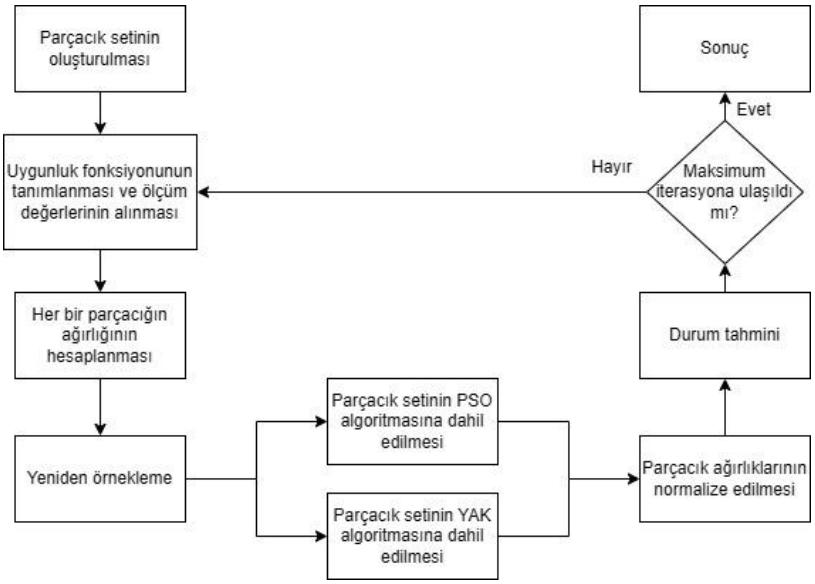
(7) Durum tahmini gerçekleştirilir. Maksimum yineleme sayısına ulaşılıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Koşullar sağlanırsa algoritma durur, sağlanmazsa yinelemeli olarak Adım 2'ye döner.

Algoritma 3'de YAK algoritması ile optimize edilmiş parçacık filtresinin sözde kodu gösterilmiştir.

Algoritma 3. YAK algoritması ile optimize edilmiş parçacık filtresinin sözde kodu

$(1)\text{İ}lklendirme$
$For\ i = 1, \dots, N, ilk\ parçacıkları\ oluşturma, x_0^{n,(i)} \sim p(x_0^n)$
$(2) For\ k > 0$
$(2.1) PF\ \text{ölçüm}\ güncellemesi$
$\left[\{x_k^i\}_{i=1}^N\right] = PF\left[\{x_k^i\}_{i=1}^N, z_k\right]$
$(2.2) Parçacıkların\ ağırlıklarının\ hesaplanması$
$(2.3) Yeniden\ \text{Örnekleme}$
$(2.4) Her\ bir\ parçacığın\ YAK\ algoritmasına\ dahil\ edilmesi$
$\left[\{x_k^{i*}\}_{i=1}^N\right] = YAK\left[\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^N, z_k\right]$
$(2.5) Ağırlıkların\ normalize\ edilmesi$
$\widetilde{w}_k^i = \frac{w_k^i}{\sum_{i=1}^N w_k^i}$
$(2.5) Durum\ Tahmini$
$(2.6)\ k = k+1\ ve\ (2.1)'den\ itibaren\ yineleme\ gerçekleştirilir$

YAK ve PSO algoritmalarıyla optimize edilmiş PF'nin akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. PSO-YAK-PF akış diyagramı

3. Bulgular

Bu makalede bahsedilen algoritmaların etkili performansını test etmek için doğrusal olmayan bir sistem olarak tek değişkenli bir büyüme modeli seçilmiştir. Model tahmin yöntemlerinin performanslarını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Modelin simülasyon sonuçlarının elde edildiği bilgisayarın temel frekansı 2.6GHZ'dir; sabit disk kapasitesi 80G'dir. Simülasyon yazılımı MATLAB (R2015b)'dir. Modelin durum denklemi ve ölçüm denklemi şunlardır [36]:

Durum denklemi:

$$x(t) = 1 + sin(0.04\pi t) + 0.5x(t-1) + u(t-1) \tag{21}$$

Ölçüm denklemi:

$$z(t) = \begin{cases} 0.2x(t)^2 + v(t) & 1 \le t \le 30 \\ 0.5x(t) - 2 + v(t) & 30 < t \le T \end{cases} \tag{22}$$

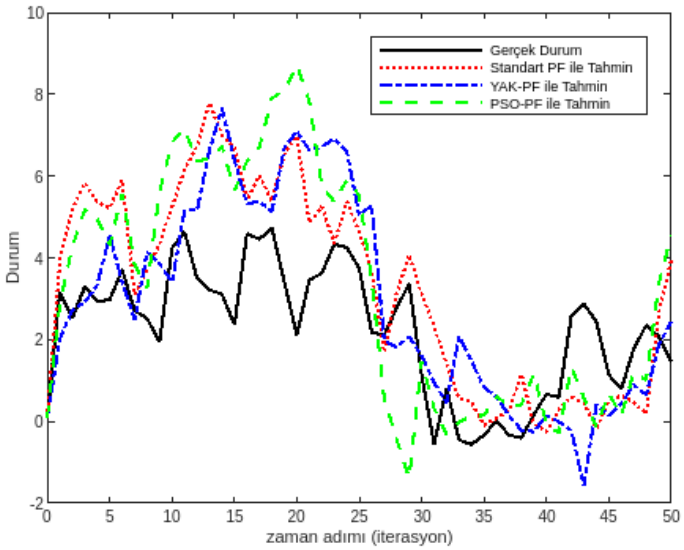
Formül de, $u(t-1)$ bir Gamma (3,2) rasgele değişkenidir ve $v(t) \sim N(0, 0.00001)$ ölçüm gürültüsüdür, bunların her ikisi de Gauss gürültüsüdür. T=50 iterasyon sayısıdır. Parçacık filtresi, [37] ve [38]'den referans alarak geliştirilen Parçacık Sürü Optimizasyon algoritmasıyla optimize edilmiş parçacık filtresi ve geliştirilen yeni yöntem kullanılarak modelin sistem gürültü varyansı R=1, parçacık sayısı N=10 ve ölçüm gürültü varyansının (Q) farklı değerleri için filtrelerin durum tahmini simüle edilmiştir. Bu çalışmada, gürültü varyansı olarak 1, 3 ve 6 değerleri seçilmiştir. Bu değerler, parçacık filtre algoritmalarının performansını düşük (1), orta (3) ve yüksek (6) gürültü seviyelerinde değerlendirmek amacıyla tercih edilmiştir. Literatürde, parçacık filtrelerinin performansının gürültü seviyelerine bağlı olarak değiştiği ve yüksek gürültü varyanslarında algoritmaların kararlılığının azaldığı belirtilmektedir. Örneğin, Zhang ve diğerleri, sensör gürültüsünün büyük olduğu durumlarda parçacık filtrelerinin performansının önemli ölçüde düştüğünü ve doğru durum tahminlerinin elde edilmesinin zorlaştığını göstermiştir [39]. Benzer şekilde, Liu, ölçüm gürültüsünün yüksek olduğu durumlarda geleneksel parçacık filtrelerinin performansının ciddi şekilde bozulduğunu belirtmektedir [40]. Bu nedenle, çalışmamızda gürültü varyansının 9 gibi daha yüksek bir değeri değerlendirmeye alınmamıştır; çünkü literatürde de belirtildiği gibi, bu seviyelerde parçacık filtrelerinin performansı önemli ölçüde düşmekte ve algoritmaların kararlılığı azalmaktadır. Farklı Q değerleri ile yapılan karşılaştırmalarda Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE) ölçütleri, denklem (23), performans değerlendirmesi için kullanılmıştır. PSO algoritması için $c_1 = 1.5$ ve $c_2 = 2.0$ ve atalet ağırlığı 1 alınmıştır. Bu parametrelerden c_1 değeri parçacıkların kendi en iyi konumlarına yönelme eğilimini, c_2 ise topluluğun en iyi konumuna yönelme eğilimini ifade eder. Bu bağlamda, kullanılan değerler, parçacıkların hem kendi tecrübelerinden hem de topluluğun ortak bilgisinden faydalanarak daha etkili bir arama yapmalarını sağlamak amacıyla seçilmiştir. YAK algoritması parametreleri ise maksimum iterasyon sayısı (limit) 40 ve arı koloni boyutu (SN) 10 olarak belirlenmiştir. Karar değişkenlerinin sayısı 10 alınmıştır. Bu değer karar değişkenleri matris boyutunu ve de buna bağlı olarak ivme katsayısının değişkeni olarak etkilemektedir. Karar değişkenleri alt sınırı -20 ve karar değişkenleri üst sınırı +20 seçilmiştir. Bu çalışmada, belirlenen parametrelerin denendiklerinde performans/test süresi bakımından en verimli olduğu değerler dikkate alınmıştır.

Parçacık fakirleşmesi, ölçüm gürültüsünün büyüklüğü ve filtrede kullanılan parçacık sayısı ile ilişkilidir. Algoritmaların ölçüm gürültüsünün büyüklüğü faktörüne karşı sağlamlığını değerlendirmek için, bu çalışmada ölçüm gürültüsünün varyansı üç farklı değere ayarlanmıştır. Parçacık sayısı farklı ölçüm gürültü varyans değerlerinde sabit tutulmuştur. Bunun sebebi pratik uygulamalarda standart parçacık filtresindeki parçacık setinin boyutu çok büyük olamaz ve parçacık sayısı ne kadar büyükse o kadar fazla hesaplama karmaşası ortaya çıkar.

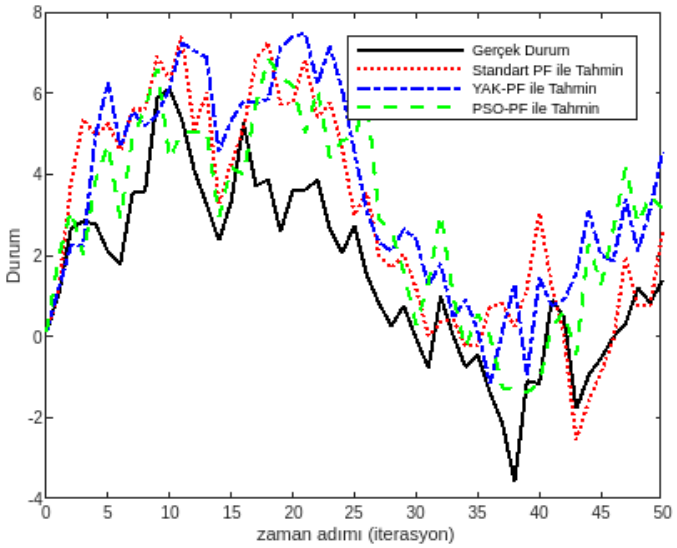
Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE), çeşitli alanlardaki modellerin tahmine dayalı performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan Ortalama Kare Hata (MSE) metriğinin bir çeşididir [41]. RMSE, MSE'nin karekökü alınarak elde edilir, böylece değerlendirme kriterinin orijinal verilerle aynı birimde sunulması sağlanır. RMSE değeri, gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki tipik sapmanın kolayca yorumlanabilir bir ölçüsünü sunar. Daha düşük bir RMSE, gözlenen ve tahmin edilen değerler arasında mükemmel bir uyumu temsil eden sıfır ile gelişmiş tahmin doğruluğunu ifade eder. Denklem (23)'de x_n beklenen değerleri, $\tilde{x}_n$ tahmin edilen değerleri ve N örnek sayısını göstermektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(x_n - \tilde{x}_n)^2} \tag{23}$$

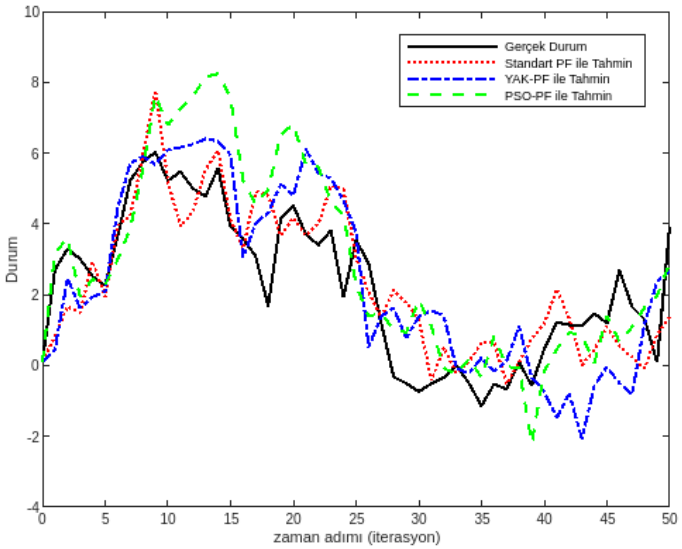
Aşağıdaki şekiller durum tahminlerinin tek bir çalışmasından üretilen farklı filtrelerin tahminlerini karşılaştırır. Şekil 2,3 ve 4'de Standart PF filtresinin, PSO algoritmasıyla optimize edilmiş PF filtresinin ve YAK tabanlı PF'nin, ölçüm gürültü varyansının (Q) sırasıyla 1, 3 ve 6 değerlerinde ve iterasyon sayısının 50 olduğu durumdaki deneysel simülasyonu görülmektedir.



Şekil 2. PF algoritmalarının Q=1 için deneysel simülasyonu



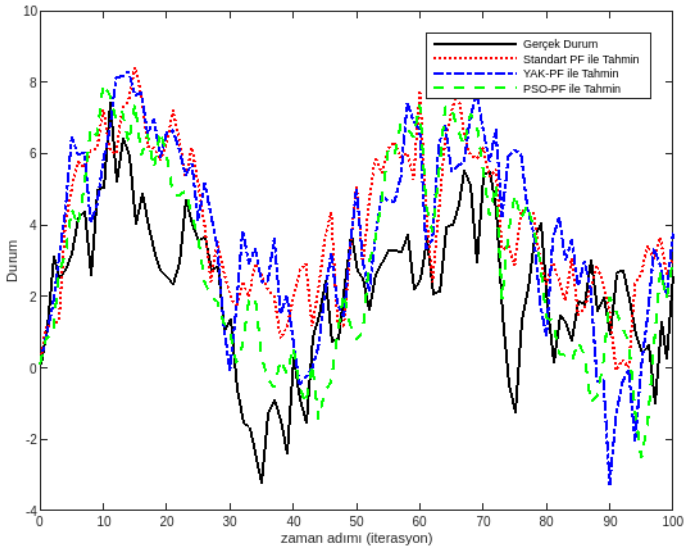
Şekil 3. PF algoritmalarının Q=3 için deneysel simülasyonu



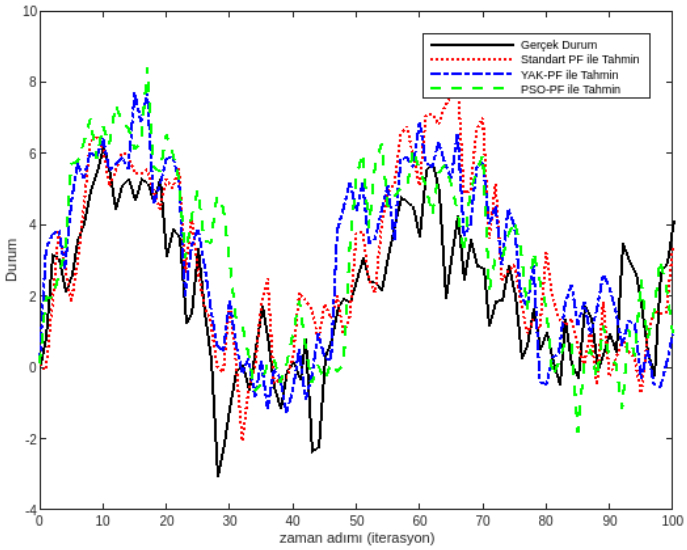
Şekil 4. PF algoritmalarının Q=6 için deneysel simülasyonu

Şekil 2, 3 ve 4'den, YAK algoritma tabanlı PF ile tahmin sonuçlarının standart parçacık filtresi ve PSO algoritması ile optimize edilmiş PF ile gerçekleştirilen tahmin sonuçlarına göre gerçek duruma çok daha yakın olduğunu görülmektedir. Tablo 1'de gerçekleştirilen simülasyonların RMSE değerleri verilmiştir. Buradan anlaşıldığı üzere YAK tabanlı PF'nin gerçek duruma daha yakındır. Bunun temel nedeni, YAK algoritmasının parçacık çeşitliliğini artırması ve daha iyi uygunluğa sahip parçacıkları tutulmasıdır. Birden fazla iterasyondan sonra, sistemin gerçek durumuna daha da yakınlaşır. Parçacık sayısının ve algoritmanın karmaşıklığının artmasıyla birlikte çalışma süresi de uzamaktadır.

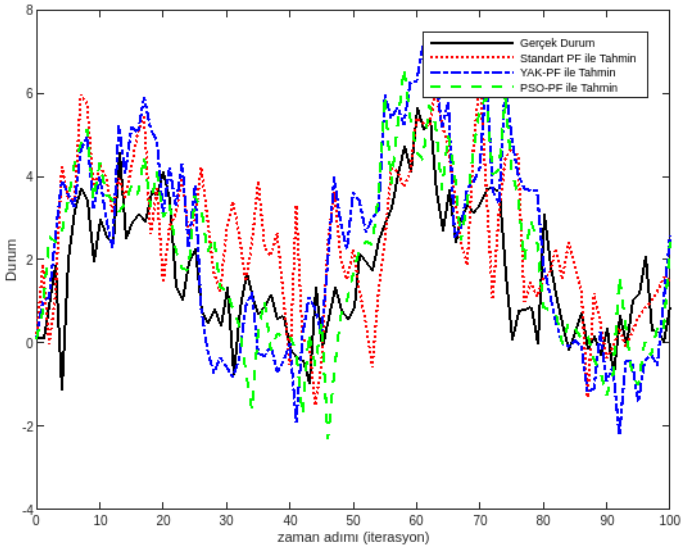
Şekil 4, 5 ve 6'da ise filtrelerin ölçüm gürültü varyansının (Q) sırasıyla 1, 3 ve 6 değerlerinde ve iterasyon sayısının 100 olduğu durumdaki deneysel simülasyonu görülmektedir.



Şekil 5. PF algoritmalarının Q=1 için deneysel simülasyonu 100



Şekil 5. PF ve YAK tabanlı PF'nin Q=3 için deneysel simülasyonu 100



Şekil 6. PF ve YAK tabanlı PF'nin Q=6 için deneysel simülasyonu 100

Şekil 4, 5 ve 6'ya bakıldığında, YAK algoritması destekli parçacık filtresinin (PF), standart parçacık filtresi ve PSO algoritmasıyla optimize edilmiş PF'ye göre gerçek duruma daha yakın tahminler sağladığı iterasyon sayısı artmasıyla da sonucun değişmediği gözlemlenmiştir. Tablo 1'de ki RMSE değerleri de YAK tabanlı PF'nin daha doğru sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır.

Tablo 1. Farklı algoritmaların kök ortalama kare hatalarının (RMSE) karşılaştırması

	Algoritma		
Parametre	PF	PSO-PF	YAK-PF
T=50, Q=1	2.560659	1.377214	1.263523
T=50, Q=3	2.676719	1.654520	1.557265
T=50, Q=6	2.276009	1.494696	1.271453
T=100, Q=1	2.276854	1.806892	1.482641
T=100, Q=3	2.480433	1.697316	1.469528
T=100, Q=6	2.033237	1.601216	1.786575

4. Tartışma ve Sonuç

Bu makalede, örnek fakirleşmesi ve parçacık çeşitliliğinin azalması sorununu çözmek için akıllı optimizasyon algoritması ile doğrusal olmayan filtreleme için yeni bir parçacık filtresi algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, yeniden örneklemeden sonra parçacık durumlarından en uygun durumu arayan parçacık setini optimize etmek için YAK algoritması aracılığıyla çok amaçlı optimizasyondan yararlanır. Geliştirilmiş algoritma, yukarıda ifade edilen RMSE değerlerine bakıldığında parçacıkların çeşitliliğini ve sistem durumu tahmininin doğruluğunu

artırdığı görülmektedir. YAK algoritmasının parçacık filtresine dâhil edilmesi bu makalenin en önemli katkısıdır. Simülasyon sonuçları, standart parçacık filtresi algoritması, PSO tabanlı parçacık filtresi ve YAK tabanlı parçacık filtresi algoritmasının karşılaştırıldığını göstermektedir. Deneyler, yeni parçacık filtresinin diğer parçacık filtrelerine göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca parçacık filtre algoritmalarının tek boyutlu doğrusal olmayan sistemlerdeki performansını farklı gürültü varyansları altında inceleyerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Özellikle 1, 3 ve 6 gibi gerçekçi varyans seviyelerinde yapılan testler, yöntemin ölçüm belirsizliğine karşı dayanıklılığını ortaya koymuştur. Çalışma, bu yönüyle hem tek boyutlu sistemlerde parçacık filtre uygulamalarına dair kapsamlı bir değerlendirme sunmakta hem de filtre performansının gürültüye duyarlılığına ilişkin literatüre yeni bulgular kazandırmaktadır. Gelecek çalışmalarda, önerilen algoritma doğrusal olmayan Gauss olmayan radar hedef takibi gibi belirli sorunlara uygulanabilir.

Kaynakça

[1] Nobahari, H., Sharifi, A., 2012, A novel heuristic filter based on ant colony optimization for non-linear systems state estimation, Computational Intelligence and Intelligent Systems: 6th International Symposium, ISICA 2012, Wuhan, China, October 27-28.

[2] Brayson, J., Ho, Y., 1969, Applied Optimal Control, Blaisdell Publishing Company, Waltham.

[3] Siouris, J., 1995, An Engineering Approach to Optimal Control and Estimation Theory, Air Force Institute of Technology, New York.

[4] Ristic, B., Arulampalam, S., Gordon, N., 2004, Beyond the Kalman Filter, Artech House, London.

[5] Kalman, R. E., 1960, A new approach to linear filtering and prediction problems, Transaction of the ASME Journal Basic Engineering 82(Series D), 35–45.

[6] Jazwinski, A. H., 1970, Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, New York.

[7] Julier, S. J., Uhlmann, J. K., 1997, A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems, In: AeroSense 11th International Symposium Aerospace Defense Sensing, Simulation and Controls, pp. 182–193.

[8] Carpenter, J., Clifford, P., Fernhead, P., 1997, An improved particle filter for non-linear problems, IEE Proceedings, Radar Sonar and Navigation 146, 2–7.

[9] Cao, T., et al., 2020, Differential Evolution Optimized a Second-Order Divided Difference Particle Filter, J. Electr. Comput. Eng. 2020, 1-9.

[10] Arulampalam, M. S., Maskell, S., Gordon, N., Clapp, T., 2002, A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking, IEEE Transactions on Signal Processing 50(2), 174–188.

[11] Hou, Y., et al., 2022, A multi-objective discrete particle swarm optimization method for particle routing in distributed particle filters, Knowledge-Based Systems 240: 108068.

[12] Zhang, Q. B., Wang, P., Chen, Z. H., 2019, An improved particle filter for mobile robot localization based on particle swarm optimization, Expert Syst. Appl. 135, 181-193.

[13] Meng, Z., Mei, J., Yu, C., 2022, Firefly optimized particle filter algorithm based on adaptive differential evolution, J. Phys. Conf. Ser. Vol. 2187. No. 1. IOP Publishing.

[14] Higuchi, T., 1997, Monte Carlo filter using the genetic algorithm operators, J. Stat. Comput. Simul. 59(1), 1–23.

[15] Park, S., Hwang, J. P., Kim, E., Kang, H., 2009, A new evolutionary particle filter for the prevention of sample impoverishment, IEEE Transection on Evolutionary Computation 13(4), 801–809.

[16] Turgun, F. S., Zorlu, H., 2023, Parçacık Filtresinin Optimizasyonu için Genetik Algoritma Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım, Bozok Journal of Engineering and Architecture, 2(1), 24-33.

[17] Troma, P., Szepesvari, C., 2001, LS-N-IPS: An improvement of particle filters by means of local search, In: Proc. Non-Linear Control Systems (NOLCOS 2001), St. Petersburg, Russia.

[18] Zhong, J., Fung, Y., Dai, M., 2010, A biologically inspired improvement strategy for particle filter: Ant Colony Optimization Assisted Particle Filter, Int. J. Control Autom. Syst. 8(3), 519–526.

[19] Hao, Z., Zhang, X., Yu, P., Li, H., 2010, Video object tracing based on particle filter with ant colony optimization, IEEE, 232–236.

[20] Tong, G., Fang, Z., Xu, X., 2006, A particle swarm optimized particle filter for nonlinear system state estimation, In: IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 438–442.

[21] Yang, J., et al., 2021, Particle filter algorithm optimized by genetic algorithm combined with particle swarm optimization, Procedia Comput. Sci. 187, 206-211.

[22] Gordon, N. J., Salmond, D. J., Smith, A. F. M., 1993, Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, IEEE Proceedings-F, vol. 140, no. 2, pp. 107-113.

[23] Zhang, T., et al., 2023, Remaining useful life prediction for rolling bearings with a novel entropy-based health indicator and improved particle filter algorithm, IEEE Access 11, 3062-3079.

[24] Kung, H., He, Z., 2018, Improved particle filter based on fruit fly optimization and its application in target tracking, Journal of Hunan University (Natural Sciences), 45(10), 130-138.

[25] Kennedy, J., Eberhart, R., 1995, Particle swarm optimization, In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, IV: pp. 1941-1948.

[26] Eberhart, R. C., Shi, Y., 2001, Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms, In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 27–30 May, pp. 94–100.

[27] Park, J. B., 2010, An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems, IEEE Transactions on Power Systems, 25(1), 156-166.

[28] Tong, G., Fang, Z., Xu, X., 2006, A particle swarm optimized particle filter for nonlinear system state estimation, 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, IEEE.

[29] Bozkurt, F.S. 2023. Doğrusal olmayan parçacık filtresinin esnek hesaplama yöntemleri ile optimizasyonu. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74 s, Kayseri.

[30] Karaboğa, D., Kaya, E., 2017, Training ANFIS by using the artificial bee colony algorithm, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 25(3), 1669-1679.

[31] Karaboga, D., 2005, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Vol. 200. Technical report-tr06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.

[32] Aslan, S., Arslan, S., 2022, A modified artificial bee colony algorithm for classification optimisation, International Journal of Bio-Inspired Computation, 20(1), 11-22.

[33] Karaboga, D., Basturk, B., 2008, On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, Appl. Soft Comput., 8, 687–697.

[34] Karaboga, D., Basturk, B., 2007, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm, J. Global Optim., vol. 39, no. 3, pp. 459-471.

[35] Özbay, E., 2023, An active deep learning method for diabetic retinopathy detection in segmented fundus images using artificial bee colony algorithm, Artif Intell Rev 56, 3291–3318.

[36] Zhang, C., Li, L., 2014, Hybrid differential evolution particle filter for nonlinear filtering, The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), 1133-1139.

[37] Pozna, C., et al., 2022, Hybrid particle filter–particle swarm optimization algorithm and application to fuzzy controlled servo systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 30.10, 4286-4297.

[38] Hou, Y., et al., 2022, A multi-objective discrete particle swarm optimization method for particle routing in distributed particle filters, Knowledge-Based Systems 240: 108068.

[39] Jingquan Zhang, Dian Wang, Peng Li, Shiyu Liu, Han Yu, Yuxin Xu, Ming Teng, Application of an improved particle filter for random seismic noise suppression, Journal of Geophysics and Engineering, Volume 18, Issue 6, December 2021, Pages 943–953, https://doi.org/10.1093/jge/gxab064

[40] Liu, B. 2017, March. Robust particle filter by dynamic averaging of multiple noise models. In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 4034-4038). IEEE.

[41] Hodson, T. O., 2022, Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, Geosci. Model Dev., 15(14), 5481-5487.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Jeotermal Enerji ve Kalina Çevrim Tabanlı Entegre Sistemde Yeşil Hidrojen ve Amonyak, Tatlı Su ve Sıcak Su Üretiminin İncelenmesi

Sadık Ata[*1]

[*1]KTO Karatay Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, KONYA

(Alınış / Received: 26.01.2025, Kabul / Accepted: 16.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Yeşil hidrojen,
Yeşil amonyak,
Karbon kazanımı,
Jeotermal enerji,
Kalina çevrimi,
Ekonomik analiz

Öz: Bu çalışmada jeotermal enerji ve Kalina çevrim tabanlı multi-üretim sisteminin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel performansı analiz edilmiştir. Kalina, sıcak su üretim ünitesi, proton değişim membran elektrolizör, amonyak reaktörü ve ters ozmoz ünitesinden oluşan entegre sistem ele alınmıştır. Jeotermal enerjinin güneş ve rüzgar enerjisine kıyasla hava koşullarından bağımsız kesintisiz bir enerji kaynağı olmasının avantajıyla hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimleri incelenmiştir. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin sistem performansı üstündeki etkisi tespit edilmiştir. Ekonomik ve çevresel analizde sırasıyla dinamik geri ödeme süresi, net bugünkü değer, kurtarılan karbon dioksit ve karbon kazanımı incelenmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığının 160 ^{o}C'den 180 ^{o}C'ye yükselmesiyle saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretiminin sırasıyla 3,598 kg, 13,98 kg, 30,9 m^3 arttığı ve geri ödeme süresinin buna bağlı olarak %9,38 azaldığı tespit edilmiştir. Fakat sisteme sağlanan ekserji girişindeki artışın daha fazla oranda olması nedeniyle ekserji veriminin %6,79 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Investigation of Green Hydrogen and Ammonia, Fresh Water and Hot Water Production in an Integrated System Based on Geothermal Energy and Kalina Cycle

Keywords
Green hydrogen,
Green ammonia,
Carbon gain,
Geothermal energy,
Kalina cycle,
Economic analysis

Abstract: In this study, the energy, exergy, economic and environmental performance of geothermal energy and Kalina cycle based multi-production system is analysed. The integrated system consisting of Kalina, hot water production unit, proton exchange membrane electrolyser, ammonia reactor and reverse osmosis unit is considered. Hydrogen, ammonia, fresh water and hot water productions were analysed with the advantage of geothermal energy being an uninterrupted energy source independent of weather conditions compared to solar and wind energy. The effects of geothermal source inlet temperature, geothermal source outlet temperature, Kalina turbine inlet pressure, Kalina cold water inlet temperature, geothermal source mass flow rate and Kalina turbine isentropic efficiency on the system performance are determined. Dynamic payback period, net present value, saved carbon dioxide and carbon gain are analysed in economic and environmental analysis respectively. It was determined that the hourly production hydrogen, ammonia and freshwater increased by 3.598 kg, 13.98 kg and 30.9 m^3, respectively, and the payback period decreased by 9.38% with the increase in the geothermal source inlet temperature from 160 ^{o}C to 180 ^{o}C. However, it was determined that the exergy efficiency decreased by 6.79% due to the increase in the exergy input to the system at a higher rate.

*İlgili Yazar, email: sadik.ata@karatay.edu.tr

1. Giriş

Enerji üretimi için fosil yakıtların kullanılması önemli miktarda karbon dioksit (CO_2) emisyonuna ve bununla birlikte iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır [1]. Sürdürülebilir kalkınma ve net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda fosil yakıt bağımlılığının azaltılması kaçınılmazdır [2]. Fosil yakıtlardan uzaklaşılmasının odaklanıldığı 2023 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında (COP28) 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kapasitesinin üç katına çıkarılması ve yenilenebilir enerji üretiminin en az 11.000 GW'a yükselmesi ele alınmıştır [3]. Yenilenebilir enerjilerin arasında güneşe ve rüzgara bağlı olan kesintili kaynakların aksine, jeotermal enerji dış meteorolojik koşullardan bağımsız olmasıyla öne çıkmaktadır [4]. Jeotermal enerjinin 2008 yılında dünyanın birincil enerji arzının sadece %0,1'ini oluşturmasına rağmen 2050 yılına kadar dünyanın enerji ihtiyacının %3-5'ini karşılaması beklenmektedir [5]. Dünya genelinde birçok bölgede yer altı jeotermal kaynakları olmakla birlikte enerji teknolojisindeki gelişmeler ile düşük sıcaklıkta elektrik üretimine uygun sistemler artmaktadır. Bunun için termodinamik çevrimlerden yararlanılmaktadır [6].

Düşük sıcaklıklı kaynaklardan elektrik üretiminde en yaygın olan yöntemler Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve Kalina çevrimidir. Kalina çevrimlerinin yüksek başlangıç maliyetlerine karşın ORÇ'ye kıyasla daha düşük işletme ve bakım maliyetlerinin olduğu ve ORÇ'den daha fazla net güç elde edildiği belirtilmiş ve Kalina çevrimlerinin jeotermal uygulamaları için daha uygun olduğu vurgulanmıştır [7-8]. ORÇ'nin çalışma prensibi, pompanın yüksek basınçlı organik akışkanı evaporatöre göndermesi, evaporatörde sudan daha düşük kaynama noktasına sahip akışkanın buharlaşması, elektrik üretimi için türbinde genişlemesi ve son olarak basıncı ve sıcaklığı azalan akışkanın kondenserde yoğuşması şeklinde çalışmaktadır [9]. Kalina çevriminde temel fark çalışma akışkanı olarak amonyak/su karışımı kullanmasıdır. Evaporatörde tamamen buharlaşmayan karışımın sıvı ve buhar fazlarını ayırmak için separatör kullanılır. Ayrıca çevrim verimi reküperatörler kullanılarak iyileştirilir [10]. ORÇ'den farklı olarak Kalina çevriminin çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımını kullanması ve çözelti konsantrasyonunun ısı kaynağına göre ayarlanabilmesiyle daha verimli çalışmakta [11] ve değişen kaynama ve yoğuşma sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle daha az ekserji yıkımı gerçekleşmektedir [12].

Bu çalışmada bu avantajlarından dolayı jeotermal enerji tabanlı Kalina çevrimi incelenmiştir. Kalina çevriminde üretilen elektriğin farklı üretim hatlarında kullanılması ele alınmıştır. Kalina çevrimiyle proton değişim membran (PDM) elektrolizör ve yeşil amonyak üretim hattının entegre edilmesiyle hidrojen ve amonyak üretimi analiz edilmiştir.

Düşük moleküler ağırlığa sahip olan hidrojen yüksek veriminden dolayı en uygun enerji taşıyıcılarından biridir. Ayrıca metandan yaklaşık sekiz kat daha hafiftir. Piroliz, termoliz, elektroliz ve hidrokarbon reformasyonu gibi yöntemlerle üretilmektedir. Hidrojen üretiminde kaynak olarak yenilenebilir enerjinin kullanıldığı durumlarda üretilen hidrojen yeşil hidrojen adını alır, bu işlem karbon-nötr olduğu için CO_2 emisyonlarının azaltılması noktasında önemlidir [13-15]. PDM, alkali ve katı oksit elektrolizör arasından PDM yüksek voltaj verimliliği, yüksek akım yoğunluğunda çalışabilmesi ve yüksek saflıkta hidrojen üretebilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır [16]. Bu çalışmada ayrıca PDM elektrolizörüyle üretilen hidrojenin nitrojen ile birleşmesiyle amonyak üretimi ele alınmıştır.

Gübre, plastik, ilaç ve kimya endüstrileri olmak üzere birçok sektörde önemli rol oynayan amonyağın yılda yaklaşık 150 MT olarak üretildiği belirtilmiştir [17]. Amonyak, dünya çapında yüksek basınç ve sıcaklık altında Haber-Bosch prosesi olarak bilinen yöntem ile üretilmektedir. Bu yöntemde buhar metan reformasyonu ile üretilen hidrojenden kaynaklı olarak ciddi seviyede CO_2 açığa çıkmasına neden olmaktadır. Fakat, amonyak üretiminde kullanılan hidrojen buhar metan reformasyonu ile değil de suyun elektrolizi yöntemiyle yenilenebilir enerji ile üretilirse çevreye olumsuz bir katkısı olmaz ve bu süreç yeşil amonyak üretimi olarak adlandırılmaktadır [18-20].

Bu çalışmada sürdürülebilir bir gelecek noktasında incelenen bir diğer üretim tatlı su üretimidir. İklim değişikliğiyle birlikte yağışların azalması ve hızlı nüfus artışı su kıtlığı noktasında ciddi bir soruna yol açmıştır. Yeryüzündeki suyun yaklaşık %97'sinin ortalama 35.000 ppm tuzluluk oranına sahip okyanuslarda ve denizlerde bulunduğu, 500 ppm'den daha az tuzluluk oranına sahip tatlı su oranının ise %3 olduğu belirtilmiştir. Bu tatlı su sıkıntısında çözüm ise deniz suyunun tuzdan arındırılmasıdır. Bunun için kullanılan uygun yöntemlerden biri ters ozmoz işlemidir [21]. Bu çalışmada da jeotermal enerji kaynaklı Kalina çevriminin ters ozmoz ünitesi ile entegrasyonu ele alınarak tatlı su üretimi incelenmiştir. Tüm bu üretim hatları dikkate alınarak son yıllarda yapılan önemli çalışmalar ve ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Hai vd. [22] jeotermal tabanlı flaş ve Kalina, absorpsiyonlu soğutma, termoelektrik jeneratör, proton değişim membran elektrolizörü ve ters ozmoz entegre sistemini incelemişler ve iki-amaçlı optimizasyon çalışması

yapmışlardır. Maksimum ekserji verimi ve minimum geri ödeme süresi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. %35,58 ekserji verimi ve 0,418 yıl geri ödeme süresi değerine ulaşmışlardır. Yuksel vd. [23] jeotermal, Organik Rankine Çevrimi, hidrojen ve amonyak üretim tesisi, arıtma, absorpsiyonlu soğutma, kurutma tesisi ve sıcak su üretim sisteminden oluşan entegre sistem üzerinde parametrik çalışma yapmışlardır. Tüm sistem için %54,73 ekserji verime ulaşılmıştır. Sistem performansını en önemli etkileyen parametrelerden birinin jeotermal sıcaklığı olduğu belirtilmiştir. Sun vd. [24] solar-jeotermal enerji tabanlı multi-üretim sisteminde ekserji verimi ve ürünlerin toplam birim maliyet amaç fonksiyonları doğrultusunda optimizasyon çalışması yapmışlardır. Optimum şartlar altında ekserji verimi ve birim maliyet sırasıyla %31,71 ve 1,75 $/GJ olarak tespit edilmiştir.

Malik vd. [25] Kalina, Kalina-termoelektrik jeneratör ve Kalina-termoelektrik jeneratör- proton değişim membran yakıt hücresi sistemlerinin performansını karşılaştırmışlardır. Net güç ve elektrik maliyeti bazlı optimizasyon çalışması yapmışlardır. Termoelektrik jeneratör ve proton değişim membran yakıt hücresi ile olan entegre sistemle net gücün arttığını belirtmişlerdir. Bu durum için ekserji verimi %39,14 olarak tespit edilmiştir. Alirahmi vd. [26] jeotermal tabanlı Organik Rankine Çevrimi-PDM Elektrolizör ve absorpsiyonlu soğutmadan oluşan multi-üretim sistemiyle hidrojen, soğutma ve güç üretimini incelemişlerdir. Jeotermal akışkan sıcaklığı, debisi, türbin giriş sıcaklığı ve türbin veriminin sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon ile %37,85 ekserji verimi ve 15,09 $/h maliyet oranına ulaşılmıştır. Akkurt [27], çok düşük sıcaklıklı jeotermal enerji tabanlı Organik Rankine Çevriminin termodinamik analizi üzerine çalışma yapmıştır. En yüksek ekserji yıkımının ısı değiştiricilerinde gerçekleştiğini belirtmiştir. Koç ve Yağlı [28], Kalina çevrimi üzerine enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Sistem bileşenleri içinde en düşük ekserji veriminin buharlaştırıcıya ait olduğunu belirtmişlerdir. Kalina sistemi için %26,97 ekserji verimine ulaşmışlardır.

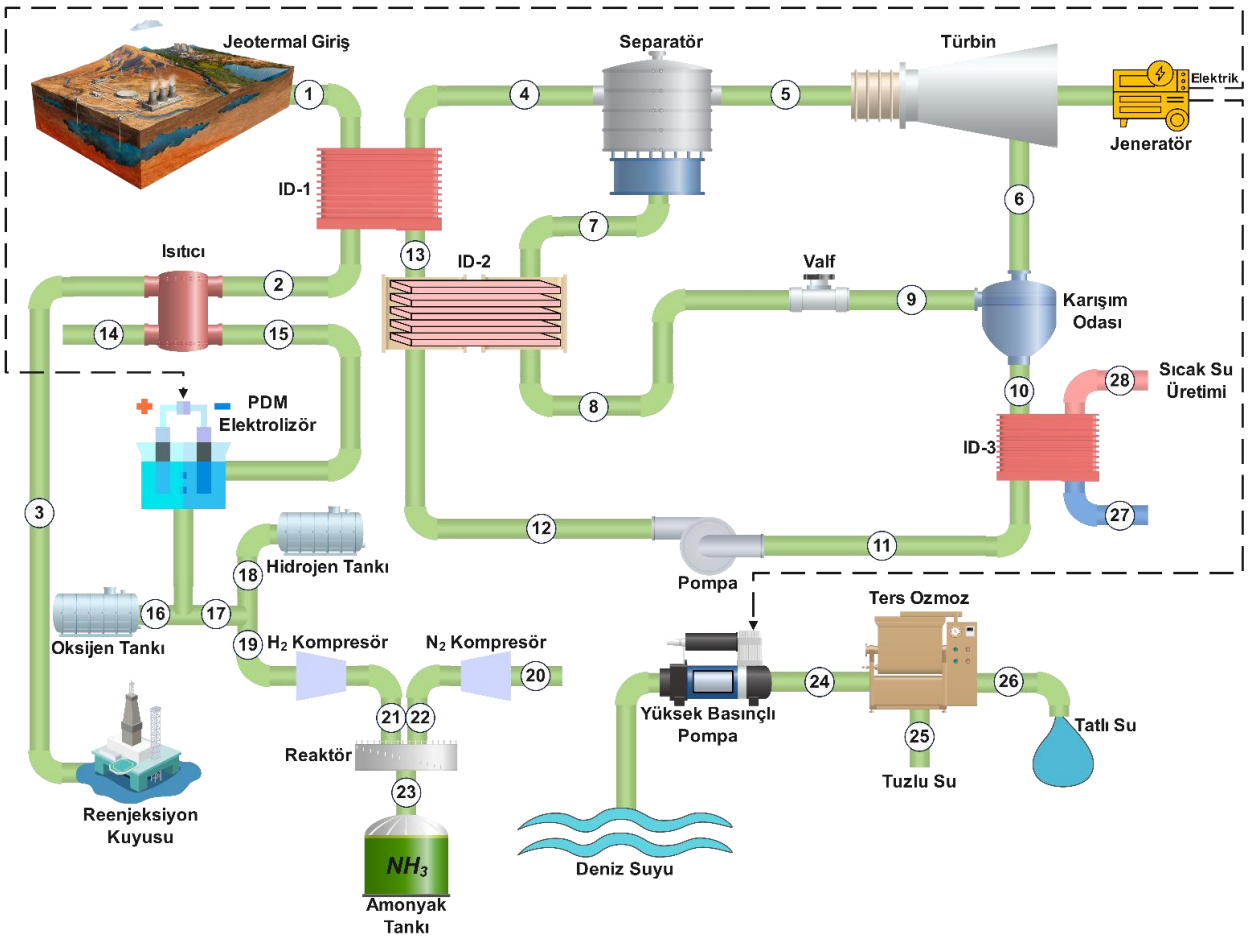
Kara ve Kaşka [29], jeotermal enerji kaynaklı Kalina çevrimi üzerine çalışma yapmışlardır. Türbin giriş basıncı, türbin verimi, kondenser çıkış sıcaklığı ve pompa verim değişiminin Kalina çevriminin termo-ekonomik performansına etkisini incelemişlerdir. Şen ve Yılmaz [30], jeotermal ve güneş enerjisi tabanlı kojenerasyon sisteminin termodinamik analizini yapmışlardır. Jeotermal sıcaklık ve güneş radyasyon değişiminin elektrik ve hidrojen üretimine etkisini belirlemişlerdir. Entegre sistem için %46 ekserji verimine ulaşmışlardır. Güleryüz ve Özen [31], jeotermal kaynaklı Organik Rankine Çevriminin eksergo-ekonomik analizi üzerine çalışma yapmışlardır. En yüksek ekserji yıkımının evaporatörde gerçekleştiğini ve toplam ürün maliyetinin 3,662 $/GJ olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürde bulunan amonyak üretiminin enerji ve ekserji analizinin olduğu çalışmalara ek olarak bu çalışmada ekonomik ve çevresel analiz de yapılmıştır. Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sistemi ele alınmıştır. Burada üretilen gücün proton değişim membran elektrolizörüne ve ters ozmoz ünitesine aktarılmasıyla yeşil hidrojen ve tatlı su üretimi incelenmiştir. Elektrolizörde üretilen hidrojenin bir bölümü depolanırken bir bölümü de amonyak üretim hattında kullanılmıştır. Burada amonyak reaktöründe hidrojen ve nitrojenin birleşmesiyle yeşil amonyak üretimi incelenmiştir. Ayrıca Kalina ünitesinde karışma odası çıkışındaki ısı değiştirici sıcak su üretim amacıyla kullanılmıştır. Böylece hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su olmak üzere dört farklı çıktısı olan multi-üretim sisteminin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel performansı analiz edilmiştir. Engineering Equation Solver (EES) ile oluşturulan termodinamik modelin literatürdeki çalışmalar baz alınarak doğrulanmasının ardından jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin etkisi incelenmiştir.

Bu çalışma özellikle geleneksel yöntemlerle üretiminde ciddi seviyede karbon dioksit salınımına sebep olan hidrojen ve amonyağın, yenilenebilir enerjinin entegre sistemde kullanılmasıyla üretilmesi sonucu kurtarılan karbon dioksit ve buna bağlı olarak kazanılan karbon tutarının incelenmesiyle öne çıkmaktadır. Bu işlemin daha anlamlı olması için sistemin dinamik geri ödeme süresi ve net bugünkü değerinin tespit edilmesiyle ekonomik performansı incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada jeotermal enerji ve Kalina çevrimi tabanlı kombine sistemde PDM Elektrolizör, amonyak ve ters ozmoz ünitelerinin eklenmesiyle yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimi incelenmiştir. Multi-üretim sisteminin şematik diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Isı değiştiriciler (ID) ID-1, ID-2, ID-3 olarak belirtilmiştir. H_2, N_2 ve NH_3 sembolleri sırasıyla hidrojen, nitrojen ve amonyağı temsil etmektedir.



Şekil 1. Jeotermal enerji ve Kalina çevrimi tabanlı multi-üretim sistemin çalışma prensibi

Isı kaynağı olarak orta sıcaklıklı jeotermal enerji santrali ele alınmıştır. 160 ^{o}C-180 ^{o}C arasında sıcaklığı bulunan (Durum-1) jeotermal ısı kaynağının ısı değiştiricisi-1 (ID-1) ile bir kısım enerjisini Kalina çevrimine aktarmasıyla süreç başlamaktadır. Akışkan olarak amonyak-su karışımını kullanan Kalina çevriminde separatörde (Durum-4) buhar ve sıvı fazına ayrılma işlemi gerçekleşir. Separatörden Kalina türbinine giden hatta (Durum-5) türbinde güç üretimi sağlanırken türbin çıkışındaki akışkan (Durum-6) ile separatör hattından gelen akışkan (Durum-9) genleşme valfi sonrası karışım odasında (Durum-10) karışır. Daha sonra ısı değiştirici-3 (ID-3) ve pompa hattını takip ederek döngü devam eder. Isı değiştirici-2 (ID-2)'de evaporatördeki (ID-1) ısı yükünü azaltarak verimi iyileştirmede önemli bir katkısı bulunmaktadır.

Multi-üretim sisteminde ID-3 sıcak su üretim ünitesi işlevini görmektedir. ID-3'e diğer taraftan giren soğuk suyun (Durum-27) ısıtılmasıyla sıcak su üretimi (Durum-28) yapılmıştır. Kalina çevriminde üretilen gücün yarısı PDM elektrolizörü-amonyak ünitesine yarısı ise ters ozmoz ünitesine gönderilmiştir. PDM elektrolizörü için gereken 80 ^{o}C'lik su ID-1 çıkışında (Durum-2) bulunan ısıtıcı ile sağlanmıştır. Bu ısıtıcı ile Durum-14'te 25 ^{o}C sıcaklıkta bulunan su 80 ^{o}C'ye (Durum-15) ısıtılır. Bu su PDM elektrolizörü ünitesinde hidrojen (Durum-17) ve oksijene (Durum-16) ayrışmıştır. Hidrojenin bir bölümü depolanırken (Durum-18) bir bölümü de (Durum-19) amonyak üretiminde kullanılmıştır. İki ayrı kompresörde sıkıştırılan hidrojen (Durum-21) ve nitrojen (Durum-22) amonyak reaktörüne girmekte ve bunun sonucunda yeşil amonyak üretimi (Durum-23) gerçekleşmiştir. Multi-üretim sisteminde ayrıca deniz suyunun tuzdan arındırılması için ters ozmoz ünitesi bulunmaktadır. Yüksek basınç gerektirdiği için enerji tüketimi fazla olan bu ünitenin gücünün Kalina çevriminden sağlanmasıyla tatlı su üretimi (Durum-26) gerçekleşmiştir. Çalışmada ele alınan tasarım parametreleri alt sistemler özelinde Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminin tasarım parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Jeotermal Ünitesi [32]		
Jeotermal Kaynak Giriş Sıcaklığı	°C	160-180
Jeotermal Kaynak Çıkış Sıcaklığı	°C	100-120
Jeotermal Kaynak Debisi	kg/s	70-100
Kalina ve Sıcak Su Üretim Ünitesi [33]		
NH_3-H_2O çözelti konsantrasyonu	-	0,6
Türbin giriş basıncı	bar	25-35
Pompa izantropik verimi	%	90
Türbin izantropik verimi	%	70-90
Isı değiştirici-pinch point sıcaklık farkları	°C	15
Isı Değiştirici-3 Sıcak Su Ünitesi Giriş Sıcaklığı	°C	25-35
Isı Değiştirici-3 Sıcak Su Ünitesi Çıkış Sıcaklığı	°C	60
-PDM Elektrolizör-Amonyak Reaktör Ünitesi [34-35]		
PDM Elektrolizör Su Isıtıcı-Su Giriş Sıcaklığı	°C	25
Elektrolizör sıcaklığı	°C	80
Amonyak reaktör giriş sıcaklığı	°C	250
Amonyak reaktör giriş basıncı	bar	100
Ters Ozmoz Ünitesi [36]		
Besleme Su Sıcaklığı	°C	25
Besleme Su Basıncı	bar	67
Deniz suyu tuzluluğu	ppm	45000
Geri Kazanım Saf Su Oranı	-	0,3
Tuzluluk reddi oranı	-	0,994

Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminin analizi için EES yazılımı kullanılmıştır. Referans sıcaklık ve basıncı sırasıyla 25 °C ve 101,3 kPa olarak alınmıştır. Kararlı şartlar altında, ısı değiştiricilerinde basınç kayıplarının ihmal edildiği, sistem bileşenlerinin adyabatik olduğu ve potansiyel-kinetik enerji değişimlerinin ihmal edildiği kabulleri altında çalışılmıştır. Denklem 1-3'te sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge bağıntısı verilmiştir [37-38].

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \tag{1}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * (h_ç - h_g) \tag{2}$$

$$\dot{E}_Q + \sum \dot{m}_g \varphi_g = \sum \dot{m}_ç \varphi_ç + \dot{E}_w + \dot{E}_y \tag{3}$$

Bu denklemde $\dot{E}_Q$ ve $\dot{E}_w$ sırasıyla ısı ve iş ekserjisini, $\dot{E}_y$ ekserji yıkımı, φ_g ve $\varphi_ç$ giren ve çıkan spesifik ekserjiyi temsil etmektedir. Isı ve iş ekserjisi ile spesifik ekserji bağıntıları Denklem 4-6'da belirtilmiştir.

$$\dot{E}_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i \tag{4}$$

$$\dot{E}_w = \dot{W}_i \tag{5}$$

$$\varphi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \tag{6}$$

Tablo 2'de kombine sistemde her bir bileşenin ekserji dengesi ve ekipman satın alma maliyet denklemleri belirtilmiştir.

Tablo 2. Jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde her bir bileşen için ekserji dengesi ve satın alma maliyeti

Sistem		
Kalina ve Sıcak Su Üretim Ünitesi [25,33,39]	**Ekserji Dengesi**	**Satın Alma Maliyeti (M)**
Isı Değiştirici-1 (ID-1)	$\dot{E}_1 + \dot{E}_{13} = \dot{E}_2 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{y,ID-1}$	$M_{ID-1} = 2681(A_{ID-1})^{0.59}$
Separatör (sep)	$\dot{E}_4 = \dot{E}_5 + \dot{E}_7 + \dot{E}_{y,sep}$	$M_{sep} = 114{,}5(\dot{m}_4)^{0.67}$
Türbin (t)	$\dot{E}_5 = \dot{E}_6 + \dot{W}_t + \dot{E}_{y,t}$	$M_t = 4750(\dot{W}_t)^{0.75}$
Karışım Odası (k)	$\dot{E}_6 + \dot{E}_9 = \dot{E}_{10} + \dot{E}_{y,k}$	$M_k = 114{,}5(\dot{m}_{10})^{0.67}$
Isı Değiştirici-2 (ID-2)	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_7 = \dot{E}_{13} + \dot{E}_8 + \dot{E}_{y,ID-2}$	$M_{ID-2} = 2681(A_{ID-2})^{0.59}$
Vana	$\dot{E}_8 = \dot{E}_9 + \dot{E}_{y,vana}$	$M_{vana} = 114{,}5\dot{m}_{akış}$
Pompa (p)	$\dot{E}_{11} + \dot{W}_{k-p} = \dot{E}_{12} + \dot{E}_{y,p}$	$M_P = 3500(\dot{W}_P)^{0.41}$
Isı Değiştirici-3 (ID-3) Sıcak Su Üretim	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_{27} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{28} + \dot{E}_{y,ID-3}$	$M_{ID-3} = 130\left(\frac{A_{ID-3}}{0{,}093}\right)^{0.78}$
PDM Elektrolizör - Amonyak Reaktör Ünitesi [40-43]		
PDM Elektrolizör Su Isıtıcı	$\dot{E}_2 + \dot{E}_{14} = \dot{E}_3 + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{y,PEME,SI}$	$M_{PEME,SI} = 130\left(\frac{A_{PEME,SI}}{0{,}093}\right)^{0.78}$
PDM Elektrolizör	$\dot{E}_{15} + \dot{W}_{PEME} = \dot{E}_{16} + \dot{E}_{17} + \dot{E}_{y,PEME}$ $\dot{n}_{H_2} = \frac{\dot{W}_{PEME}}{2VF}$ v: çalışma voltajı F: Faraday sabiti (96485 C/mol)	$M_{PEME} = 1000\dot{W}_{PEME}$
Hidrojen kompresör (HK)	$\dot{E}_{19} + \dot{W}_{HC} = \dot{E}_{21} + \dot{E}_{d,HC}$	$M_{HK} = 71{,}1\dot{m}_{H_2}\left(\frac{1}{0.92-\eta_{is,HK}}\right)\left(\frac{P_{21}}{P_{19}}\right) ln\left(\frac{P_{21}}{P_{19}}\right)$
Nitrojen kompresör (NK)	$\dot{E}_{20} + \dot{W}_{NC} = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{d,NC}$	$M_{NK} = 1{,}33\ x\ 71{,}1\dot{m}_{N_2}\left(\frac{1}{0{,}92-\eta_{is,NK}}\right)\left(\frac{P_{22}}{P_{20}}\right) ln\left(\frac{P_{22}}{P_{20}}\right)$
Amonyak reaktör (AR)	$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{22} = \dot{E}_{23} + \dot{E}_{d,reactor}$	$M_{AR} = 610\dot{W}_{AR}$
Ters Ozmoz (TO) Ünitesi [22]	$\dot{E}_{24} + \dot{W}_{ybp} = \dot{E}_{25} + \dot{E}_{26} + \dot{E}_{y,TO}$ $\dot{W}_{ybp} = \frac{1000\ x\ \dot{V}_{bs}\ x\ \Delta P}{3600\ x\ \rho_{bs}\ x\ \eta_{HPP}}$ $Geri\ Kazanım\ Oranı = \frac{\dot{V}_{tatlı\ su}}{\dot{V}_{bs}}$ bs: besleme suyu ybp: yüksek basınçlı pompa	$M_{TO} = 52\dot{V}_{bs}(P_{bs} - P_0) + 996\ x\ \dot{m}_{bs}{}^{0.8} + M_k n_e n_v + M_{pv} n_v$ $M_k = 1200\ \$;\ M_{pv} = 7000\ \$$

Multi-üretim sisteminde hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su olmak üzere dört farklı çıktı ele alınmaktadır. Buna göre kombine sistemin ekserji verimi Denklem 7'de belirtilmiştir.

$$\eta_{ekserji} = \left(\dot{E}_{hidrojen} + \dot{E}_{amonyak} + \dot{E}_{tatlı\ su} + \dot{E}_{sıcak\ su}\right) / \dot{E}_{jeotermal,giren} \quad (7)$$

Sistemin genel verimliliği ve verimsiz noktaların tespiti noktasında enerji analizi yetersiz kalmaktadır. Sistemin ekserji verimi hem verimsiz noktaların belirlenmesi ve maliyet etkinliğinin analizi için hem de farklı sistemlerin performanslarının kıyaslanmasında önemli bir kavramdır [44-46]. Ekserji verimi ayrıca, sistemin net işini (toplam üretim miktarını) sisteme sağlanan ekserjiyle kıyasladığı için performans kıyaslamalarında sıkça kullanılmaktadır. Üretim değerleri artış göstermesine rağmen sisteme sağlanan ekserjinin daha fazla oranda artması nedeniyle ekserji veriminde azalma görülebilir. Bu çalışmada kombine sistem ekserji verimiyle birlikte sistemin fizibilitesinin tespiti açısından kapsamlı bir ekonomik analiz yapılmıştır.

Multi-üretim sisteminin termo-ekonomik analizi için kabul edilen ekonomik parametreler şu şekildedir. Yıllık çalışma saati 7446 saat, ömrü 20 yıl, faiz oranı %15 ve bakım faktörü de 1,06 olarak alınmıştır [42]. Hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak suyun birim fiyatları da sırasıyla 4 $/kg [47], 1,5 €/kg [48], 1,8 $/m^3 [49] ve 3,6 $/ton [50] olarak alınmıştır.

Jeotermal enerji-Kalina çevrimi tabanlı multi-üretim sisteminde yıllık net tasarruf ve buna bağlı olarak belirlenen net bugünkü değer ve dinamik geri ödeme süre bağıntıları sırasıyla Denklem 8-10'da verilmiştir [51].

$$Yıllık\ net\ tasarruf\ (YNT) = Yıllık\ toplam\ gelir\ (YTG) - M_{bakım} \quad (8)$$

$$Net\ Bugünkü\ Değer\ (NBD) = \sum_{1}^{n=20} \frac{YNT}{(1+i)^n} - M_{toplam} \quad (9)$$

$$Dinamik\ Geri\ Ödeme\ Süresi = \frac{ln\frac{YNT}{YNT - i*M_{toplam}}}{\ln(1+i)} \quad (10)$$

Çevresel performans kapsamında multi-üretim sisteminde üretilen yeşil hidrojen ve yeşil amonyak değerlerinden dolayı kazanılan karbon tutarı incelenmiştir.

- Doğalgaz kaynaklı hidrojen üretim yöntemi olan buhar-metan reformasyonunda 1 kg hidrojen için yaklaşık 10 kg CO_2 [52] açığa çıkardığı bilinmektedir. Sebep olduğu çevresel etki nedeniyle suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada PDM Elektrolizör ile üretilen yeşil hidrojenin buhar-metan reformasyonu ile kıyaslanmasıyla kurtarılan CO_2 belirlenmiştir.
- Ayrıca üretilen hidrojenin bir bölümü depolanırken bir bölümü de amonyak üretiminde kullanılmıştır. Geleneksel amonyak üretim yöntemlerinde 1 kg amonyak yaklaşık 2,2 kg CO_2 [53] salınımına sebep olmaktadır. Bu çalışmada ise yeşil hidrojenin amonyak üretiminde kullanılmasıyla çevresel olumsuz etkisi sıfır olan bir süreç incelenmiştir.
- 1 ton CO_2'nin 40 $'a [54] karşılık geldiği göz önüne alınarak hidrojen ve amonyak tarafından sağlanan toplam karbon kazanımı tespit edilmiştir.

3. Bulgular

Bu bölümde jeotermal enerji ve Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde parametrik analize geçilmeden önce EES ile oluşturulan kombine sistem için doğrulama çalışması yapılmıştır. Tablo 3'te Kalina çevrimi için referans alınan çalışmanın [33] sıcaklık, basınç, entalpi ve amonyak konsantrasyon verileri belirtilmiştir. Tabloda belirtilen durumlar Kalina çevriminin Şekil 1'de belirtilen durumlarını temsil etmektedir. Tablo incelendiğinde hata payının kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Kalina çevrimi dışında jeotermal enerji koşulları için Koc vd. [32], PDM Elektrolizör için Loroi vd. [55], amonyak üretim ünitesinde Siddiqui ve Dinçer [56] ve ters ozmoz ünitesi için Nafey ve Sharaf [36]'in çalışması model doğrulama aşamasında kullanılmıştır. Alt sistemler için de yeterli uygunluk seviyesine ulaşılmasının ardından tüm sistem için EES modelinin kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

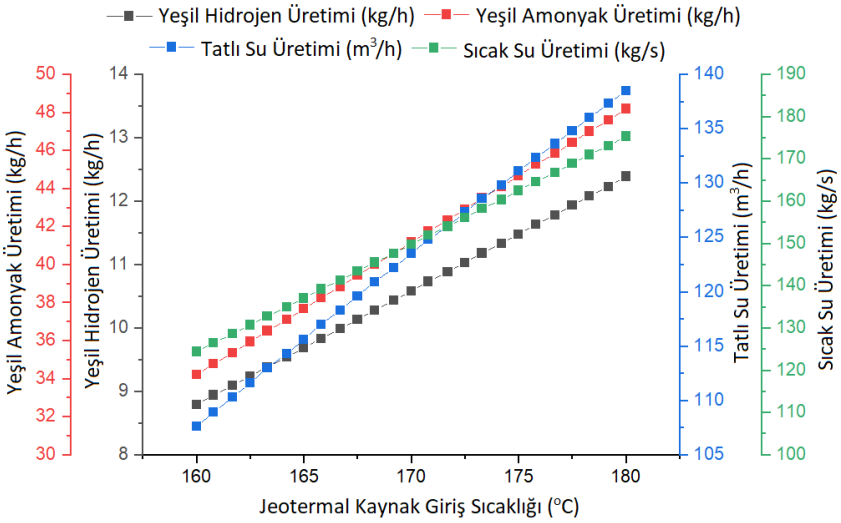
Tablo 3. Model doğrulanması-Kalina çevrimi

Durum	T (°C)		P (bar)		h (kJ/kg)		X (-)	
(Şekil-1 noktaları)	Referans [33]	Bu çalışma	Referans [33]	Bu çalışma	Referans [33]	Bu çalışma	Referans [33]	Bu çalışma
4 (Separatör Girişi)	151,53	151	30	30	1086,36	1082	0,6	0,6
5 (Türbin Girişi)	151,53	151	30	30	1694,17	1690	0,872	0,8743
6 (Türbin Çıkışı)	103,28	101,9	9,26	9,1	1512,74	1506	0,872	0,8743
11 (Pompa girişi)	46,77	46	9,26	9,1	-15,48	-19	0,6	0,6

Model doğrulanmasının ardından jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin sistemin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu parametrelerin değişmesiyle ilk olarak sistemin çıktısı olan dört farklı üretim (hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su) incelenmiştir. Ardından sistemin fizibilitesi ve çevreye katkısı bakımından dinamik geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımı kombine sistemin ekserji verimiyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

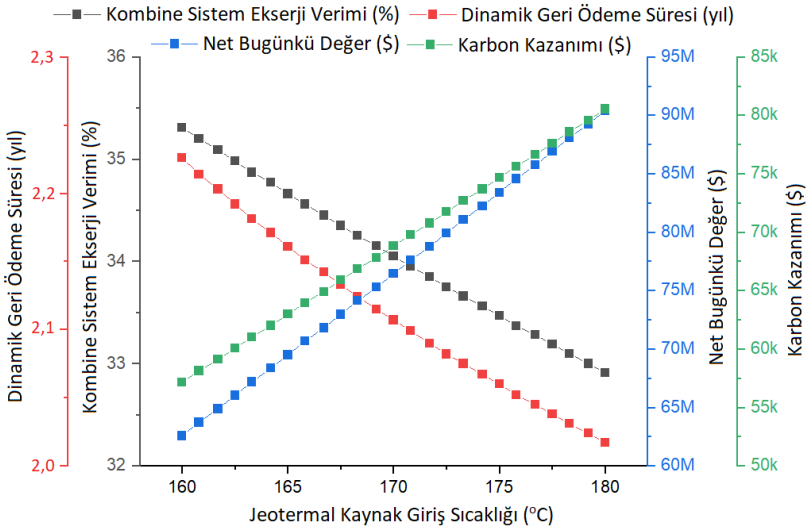
Şekil 2'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak giriş sıcaklığı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığı arttıkça sabit kaynak debisi altında sisteme giren ısının arttığı, buna bağlı olarak sabit Kalina sıcaklık ve basıncı altında Kalina sistem debisinin arttığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı Kalina türbininden elde edilen güç artmıştır. Debi artışından dolayı gereken pompa gücü artsa da jeotermal kaynak sıcaklığının 160 °C'den 180 °C'ye yükselmesiyle net gücün %40,92 arttığı belirlenmiştir. PDM Elektrolizör ve RO ünitesi gücünü Kalina'dan aldığı için hidrojen, amonyak ve tatlı su üretiminde artış görülmüştür. Jeotermal sıcaklıktaki 20 °C artış saatlik hidrojen, amonyak ve

tatlı su üretimini sırasıyla 3,598 kg, 13,98 kg, 30,9 m^3 artırmıştır. Kalina sistem debisindeki artış Kalina sıcak su üretiminin sabit giriş-çıkış sıcaklıkları altında artmasını sağlamıştır.



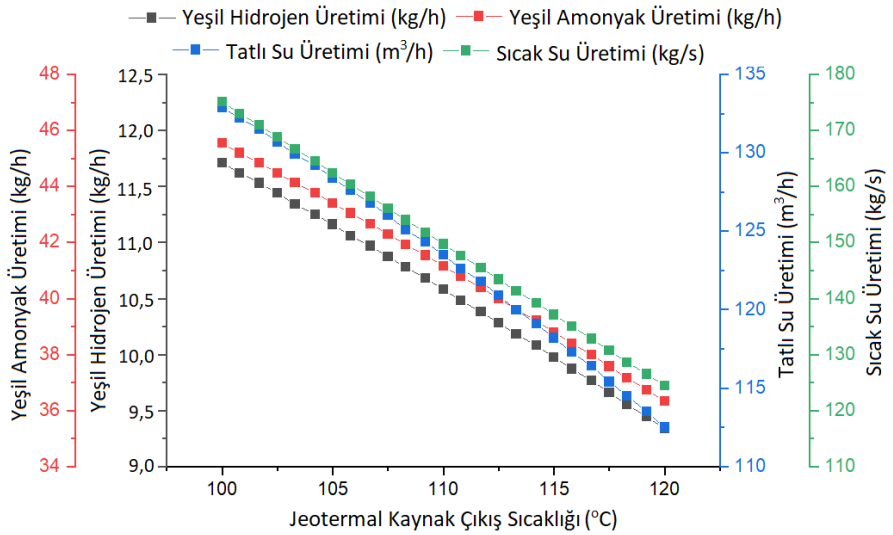
Şekil 2. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 3'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak giriş sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça sabit kaynak debisi altında sisteme sağlanan ekserji girişinde artış gerçekleşmiştir. Kombine sistem çıktısı olan üretim değerlerinde artış gerçekleşse de ekserji girişindeki artış oranı (%49,7) daha fazla olarak tespit edilmiştir. Bundan dolayı kaynak sıcaklığındaki 20 °C'lik artış sonucu sistemin ekserji verimi %6,79 oranında azalmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça toplam maliyet artsa da üretim değerlerindeki artıştan dolayı geri ödeme süresinin azaldığı ve net bugünkü değerinin de arttığı görülmüştür. Yeşil hidrojen ve amonyak üretim değerlerindeki artıştan dolayı karbon kazanımının da 23.367 $ arttığı tespit edilmiştir.



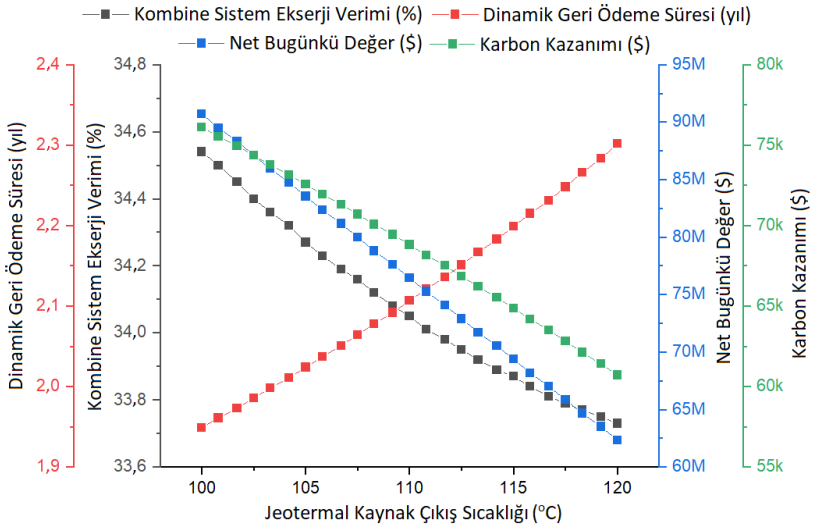
Şekil 3. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 4'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının 100 °C'den 120 °C'ye artışı sabit debi ve kaynak giriş sıcaklığı altında sisteme sağlanan ısı girdisinin 6758 kW kadar azalmasına sebep olmuştur. Bundan dolayı Kalina debisinin azaldığı, tüm üretim değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kaynak çıkış sıcaklığındaki 20 °C'lik artışın yeşil hidrojen ve amonyak üretimini %20, tatlı su ve sıcak su üretimini sırasıyla %15,3 ve %28,9 oranında azalttığı tespit edilmiştir.



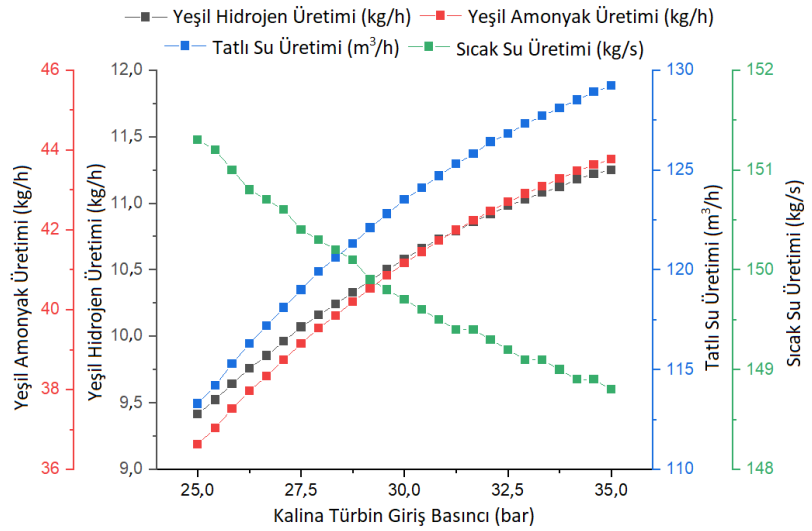
Şekil 4. Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 5'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Kaynak çıkış sıcaklığı arttıkça üretim değerlerindeki azalış oranının sisteme sağlanan ekserjinin azalış oranından daha yüksek olması sebebiyle ekserji verimi azalmıştır. Sabit kaynak giriş sıcaklığı ve debisi altında kaynak çıkış sıcaklığının 100 °C'den 120 °C'ye artmasıyla ekserji verimi %2,34 oranında azalmıştır. Üretim değerlerindeki azalmadan dolayı sistemin toplam maliyeti azalmıştır. Fakat buna rağmen sistemin geri ödeme süresinde artış tespit edilmiştir. Bunun nedeni üretim değerlerindeki ciddi oranda azalmadan dolayı elde edilen yıllık gelirin %27,3 oranında azalmasıdır. Bunun sonucunda dinamik geri ödeme süresinde %18,32 oranında artış ve net bugünkü değerde %31,2 azalış tespit edilmiştir. Hidrojen ve amonyak üretimindeki düşüşten dolayı karbon kazanımı 15,4 k$ kadar azalmıştır.



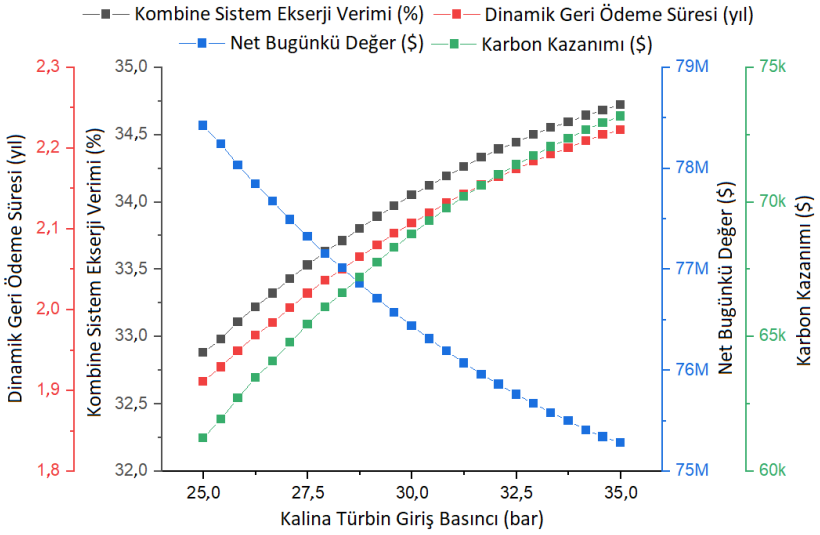
Şekil 5. Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 6'da jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin giriş basıncı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Kalina türbin giriş basıncının artmasıyla türbin girişi entalpinin değeri azalmış, fakat türbinde oluşan entalpi farkı artış göstermiştir. Ayrıca sabit jeotermal giriş-çıkış koşulları altında separatör girişindeki basıncın da artmasıyla Kalina ısı değiştiricisi-1'deki entalpi farkının azalmış ve bunun sonucunda Kalina debisi artmıştır. Kalina türbin giriş basıncının 25'ten 35 bar'a yükselmesiyle güç üretimi artmış, üretilen gücün PDM Elektrolizör ve RO ünitesine aktarılmasıyla saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimlerinde sırasıyla 1,833 kg, 7,14 kg ve 15,9 m^3 artış tespit edilmiştir. Fakat Kalina türbin çıkışı entalpinin azalması ısı değiştirici-3 giriş-çıkışında entalpi farkının azalmasına neden olmuştur. Bundan dolayı Kalina debisinin artmasına rağmen ısı değiştirici-3 yükünün azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sonucunda sabit su giriş-çıkış sıcaklıkları altında sıcak su üretimini azalmıştır.



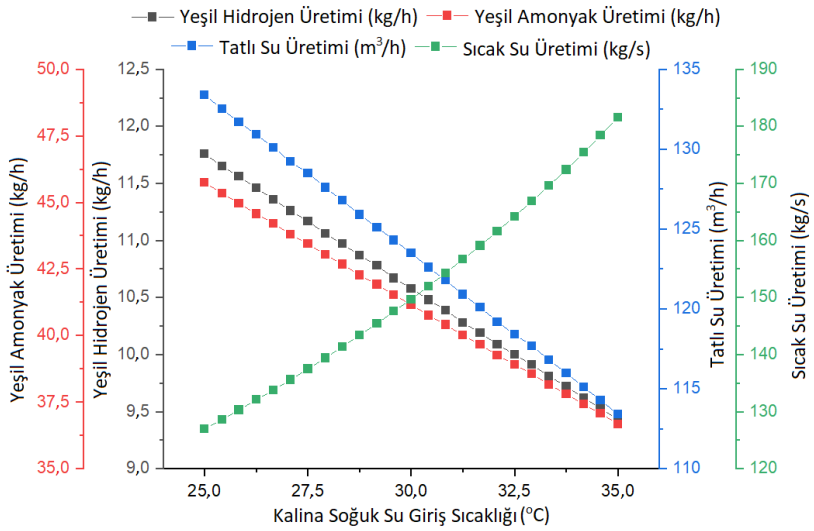
Şekil 6. Kalina türbin giriş basıncının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 7'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin giriş basıncı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Sisteme sağlanan ekserjinin sabit olması ve sıcak su üretimi hariç diğer üretim değerlerindeki artıştan dolayı 10 barlık basınç artışı sonucu ekserji veriminin %5,59 arttığı tespit edilmiştir. Üretimin artmasıyla yıllık gelir artmış, fakat toplam maliyetin yıllık gelirden daha fazla oranda artmasından dolayı geri ödeme süresi %16,27 oranında artmıştır. Net bugünkü değer de buna bağlı olarak 3,95 M$ azalmıştır. Hidrojen ve amonyak üretim değerlerindeki artış karbon kazanımının %19,4 oranında artmasını sağlamıştır.



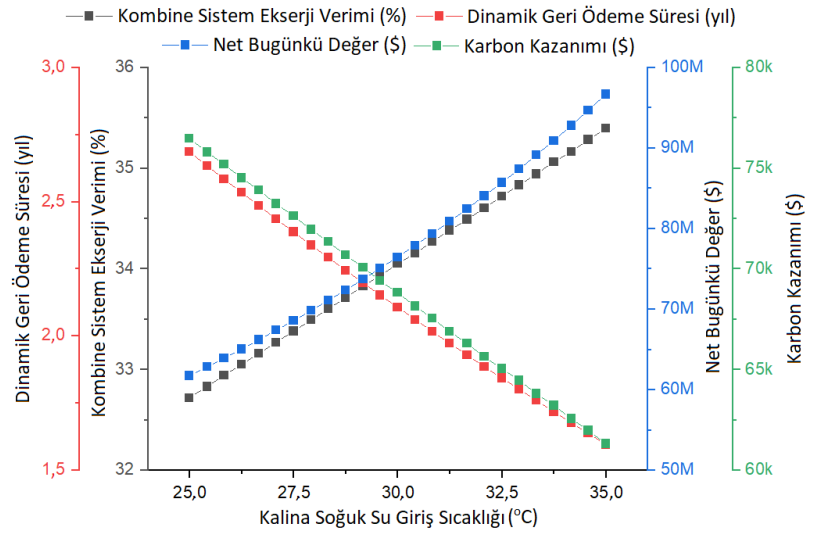
Şekil 7. Kalina türbin giriş basıncının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 8'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina soğuk su giriş sıcaklığı değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Kalina su giriş sıcaklığı arttıkça sabit pinch point sıcaklığı altında pompa giriş sıcaklığı artmış, bu da pompa giriş entalpisinin artmasını sağlamıştır. Isı değiştirici-3 Kalina hattının giriş-çıkışında entalpi farkının artması sonucu ısı yükü artmıştır. Bunun sonucunda sabit su çıkış sıcaklığı altında soğuk suyun giriş sıcaklığının artmasıyla sıcak su üretimi artmıştır. Soğuk suyun 25 ^{o}C'den 35 ^{o}C'ye yükselmesiyle sıcak su üretimi %42,9 oranında artmıştır. Pompa giriş sıcaklığındaki artışla sistemin minimum basıncında artış görülmüş, buna bağlı olarak türbin çıkışı entalpi artmış, sabit türbin giriş koşulları ve Kalina debisi altında türbinde üretilen güç azalmıştır. Bu da PDM Elektrolizör ve RO ünitelerindeki üretimi etkilemiştir. Buna bağlı olarak saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimlerinde sırasıyla 2,33 kg, 9,1 kg ve 20 m^3 azalış tespit edilmiştir.



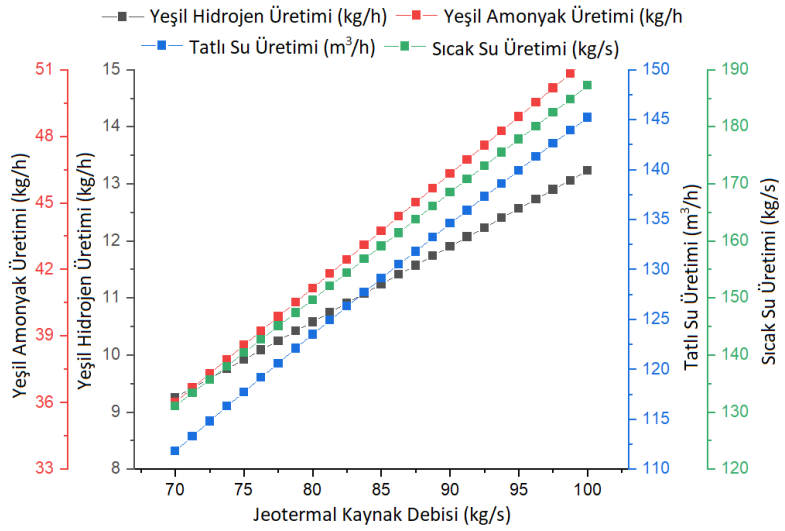
Şekil 8. Kalina soğuk su giriş sıcaklığının yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 9'da jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina soğuk su giriş sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi azalmasına rağmen sıcak su üretimindeki ciddi oranda artıştan dolayı kombine sistemin ekserji veriminde ve yıllık gelirde artış tespit edilmiştir. Soğuk suyun 25 °C'den 35 °C'ye yükselmesiyle ekserji verimi %8,16 artmıştır. Üretimdeki düşüşten dolayı toplam maliyetin de azalmasıyla dinamik geri ödeme süresi %40,5 azalmış, net bugünkü değer de %56,5 oranında artmıştır. Hidrojen ve amonyak üretimindeki düşüşten dolayı karbon kazanımı yaklaşık 15k$ kadar azalmıştır.



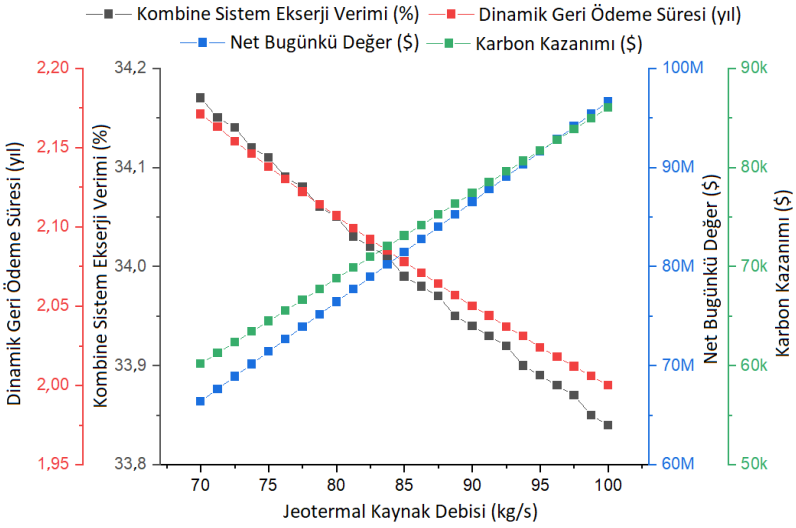
Şekil 9. Kalina soğuk su giriş sıcaklığının ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 10'da jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak debisi değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Kaynak debisinin artmasıyla sisteme giren ısı artmış, sabit Kalina giriş-çıkış sıcaklık ve basıncı altında Kalina debisinin artmasını sağlamıştır. Kalina debisinin 70 kg/s'den 100 kg/s değerine yükselmesiyle Kalina debisi 8,36 kg/s kadar artmıştır. Bunun sonucunda Kalina türbin ve pompa gücü sırasıyla 692 ve 25 kW artış göstermiştir. Kalina net gücündeki artıştan dolayı saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi sırasıyla 3,97 kg, 15,43 kg ve 33,4 m^3 artmıştır. Isı değiştirici-3 yükünün artmasından dolayı sıcak su üretimi de %42,9 oranında artmıştır.



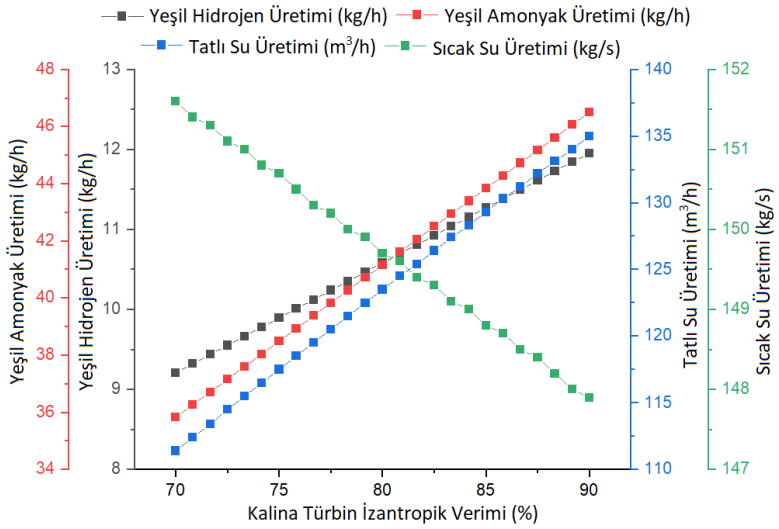
Şekil 10. Jeotermal kaynak debisinin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 11'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde jeotermal kaynak debisi değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Kaynak debisi arttıkça tüm üretim değerleri artmasına rağmen kombine sistemin ekserji veriminde küçük bir oranda azalma tespit edilmiştir. Bu, sisteme sağlanan ekserjinin artışının üretim artışını geçmesinden kaynaklanmıştır. Üretim değerlerindeki artışla yıllık gelir ve toplam maliyet artmıştır, yıllık gelir artış oranı (%42,17) toplam maliyet artış oranından (%31,9) daha fazla olması nedeniyle dinamik geri ödeme süresi azalmış, net bugünkü değer de artmıştır. Kaynak debisinin 70 kg/s'den 100 kg/s değerine artmasıyla geri ödeme süresi %7,87 oranında azalırken net bugünkü değer de %45,6 oranında artmıştır. Çevresel açıdan ise hidrojen ve amonyak üretimindeki artıştan dolayı karbon kazanımının da arttığı görülmektedir.



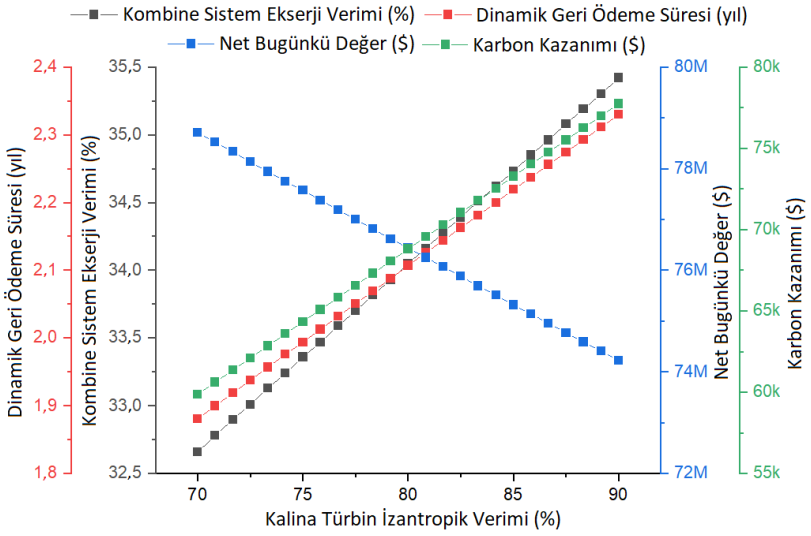
Şekil 11. Jeotermal kaynak debisinin ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

Şekil 12'de jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin izantropik verim değişiminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi belirtilmiştir. Sabit jeotermal debisi ve giriş-çıkış koşulları ile sabit Kalina türbin giriş koşulları altında türbin izantropik veriminin artması türbin çıkışı entalpi değerinin azaltır. Bu da türbindeki entalpi düşüşünün artmasını sağlar. Sabit Kalina debisi altında türbinden daha fazla güç elde edilmesini sağlar. Bundan dolayı PDM Elektrolizör ve RO ünitelerine daha fazla güç transfer edilerek hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi artmıştır. Kalina türbin veriminin %70'ten %90'a artmasıyla saatlik hidrojen, amonyak ve tatlı su üretimi sırasıyla 2,74 kg, 10,68 kg ve 23,6 m^3 artmıştır. Fakat bununla birlikte türbin çıkışı entalpinin azalması ısı değiştirici-3 girişinde de entalpinin azalmasına neden olmuş, bundan dolayı ısı değiştirici yükü azalmıştır. Bunun sonucunda ısı değiştirici-3'te sıcak su üretiminin %2,44 oranında azalmıştır.



Şekil 12. Kalina türbin izantropik veriminin yeşil hidrojen, yeşil amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimine etkisi

Şekil 13'te jeotermal-Kalina tabanlı multi-üretim sisteminde Kalina türbin izantropik verim değişiminin sistemin ekserji, ekonomik ve çevresel performansına katkısı incelenmiştir. Sıcak su üretimindeki azalmaya rağmen diğer üretim değerlerindeki artıştan dolayı kombine sistemin ekserji verimi artmıştır. Kalina türbin veriminin %70'ten %90'a artmasıyla ekserji verimi %8,45 oranında artmıştır. Sıcak su üretimi hariç üretim değerlerindeki artışla birlikte yıllık gelir de artmış fakat toplam maliyet daha yüksek oranda arttığı için sistemin geri ödeme süresi %23,87 artmış, net bugünkü değer de %5,71 oranında azalmıştır. Türbin izantropik verim artışı çevresel açıdan karbon kazanımın hidrojen ve amonyak üretimine bağlı olarak 17,8 k$ kadar artmıştır.



Şekil 13. Kalina türbin izantropik veriminin ekserji verimi, geri ödeme süresi, net bugünkü değer ve karbon kazanımına üretimine etkisi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada jeotermal enerji ve Kalina çevrim tabanlı multi-üretim sistemi incelenmiştir. Kalina çevrimi, sıcak su üretim ünitesi, proton değişim membran elektrolizör, amonyak reaktörü, ters ozmoz ünitesinin termodinamik modeli oluşturulmuştur. Kalina çevriminde üretilen gücün elektrolizör ve ters ozmoz hattına bağlanmasıyla hidrojen, amonyak, tatlı su ve sıcak su üretimi analiz edilmiştir. Jeotermal enerjinin güneş ve rüzgar enerjisine kıyasla hava koşullarından bağımsız kesintisiz bir enerji kaynağı olmasının avantajı kullanılmıştır. Jeotermal kaynak giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak çıkış sıcaklığı, Kalina türbin giriş basıncı, Kalina soğuk su giriş sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi ve Kalina türbin izantropik veriminin multi-üretim sistemi üzerindeki etkisi enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel yönden analiz edilmiştir. Sistemin fizibilitesinin görülmesi amacıyla dinamik geri ödeme süresi ve net bugünkü değeri incelenmiştir. Çalışmada öne çıkan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Jeotermal kaynak giriş sıcaklığındaki artış hem üretim miktarlarını artırırken hem de dinamik geri ödeme süresini azaltmıştır. Toplam maliyetin de artmasına rağmen yıllık net tasarrufun artması geri ödeme

süresinin azalmasını sağlamıştır. Fakat giriş sıcaklığındaki artışla sisteme sağlanan ekserji girişinin üretimden daha fazla artması kombine sistemin ekserji veriminin azalmasına neden olmuştur.

- Jeotermal kaynak giriş sıcaklığının 160 °C'den 180 °C'ye artması sonucu geri ödeme süresi %9,38 azalırken aynı zamanda ekserji veriminin de %6,79 azaldığı tespit edilmiştir.
- Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının artması üretimi olumsuz etkilerken geri ödeme süresini de artmasına neden olmuştur. Toplam maliyetin de ciddi oranda düşmesine rağmen üretim hatlarındaki azalmadan dolayı sistemin geri ödeme süresi artmıştır.
- Jeotermal kaynak çıkış sıcaklığının 100 °C'den 120 °C'ye artması ile yeşil hidrojen ve amonyak üretiminin sırasıyla saatte 2,374 kg ve 9,22 kg azaldığı, buna bağlı olarak da kazanılan karbon tutarının %20,2 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Kalina türbin giriş basıncının artması sıcak su üretimi hariç diğer üretim değerlerinin artmasını sağlamıştır. Kalina türbin çıkışı entalpinin azalması sonucu Kalina ısı değiştirici-3-sıcak su üretim hattının ısı yükünün az bir oranda azalmasına neden olmuştur. Kalina türbin giriş basıncının artması ekserji verimini artırırken toplam maliyet artışından dolayı sistemin ekonomik performansını azalttığı görülmüştür.
- Kalina türbin giriş basıncının 25 bar'dan 35 bar'a artması ekserji verimini %5,59 artırırken geri ödeme süresinin de %16,27 oranında artmasına neden olmuştur.
- Kalina soğuk su giriş sıcaklığındaki artış sabit pinch point sıcaklığı altında pompa giriş sıcaklığını artırmış, bunun sonucunda sistemin minimum basıncında artış görülmüştür. Bu da sabit türbin giriş koşulları altında türbinde üretilen gücün azalmasına neden olmuştur. Elektrolizör ve ters ozmoz ünitelerine aktarılan gücün azalması bu üretim hatlarını olumsuz etkilemiştir. Fakat öte yandan Kalina ısı değiştirici-3-sıcak su üretim hattının yükünün artması sıcak su üretiminin önemli oranda artmasını sağlamıştır.
- Kalina soğuk su giriş sıcaklığının 25 °C'den 35 °C'ye yükselmesiyle diğer üretim hatlarındaki azalmaya rağmen sıcak su üretimindeki artışla birlikte sistemin ekserji verimi %8,16 artmış, geri ödeme süresi de %40,5 azalmıştır.
- Jeotermal kaynak debisindeki artış üretim değerlerini artırırken aynı zamanda toplam maliyetin de artmasına neden olur. Fakat, yıllık net tasarruf miktarının daha fazla olması geri ödeme süresinin azalmasını sağlamıştır. Bunun birlikte kombine sistemin ekserji verimindeki küçük azalma sisteme sağlanan ekserji miktarının üretimi geçmesinden kaynaklanmıştır.
- Kalina türbin izantropik veriminin artması Kalina türbininde daha fazla gücün elde edilmesi, bununla birlikte elektroliz-amonyak reaktör ve ters ozmoz ünitelerinde daha fazla üretimin yapılmasını sağlamıştır. Ancak, türbin çıkışı entalpinin azalması ısı değiştirici-3 sıcak su üretim hattının ısı yükünün azalmasına neden olmuştur. Tüm üretim hatları ele alınıp toplam maliyetle kıyaslandığında yıllık net tasarruf miktarında istenilen artışın elde edilememesi sonucu Kalina türbin izantropik veriminin artması ile sistemin geri ödeme süresi artmıştır.
- Kalina türbin izantropik veriminin %70'ten %90'a artması sistemin ekserji verimi %8,45 artırırken aynı zamanda geri ödeme süresinin de 0,445 yıl uzamasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde multi-üretim sistemlerinin performanslarıyla ilgili çıkarım yapılması noktasında enerji ve ekserji analizinin yanı sıra ekonomik ve çevresel analizlerinin yapılması gerektiği görülmektedir. Ekonomik analizde paranın zaman değerini dikkate almayan basit geri ödeme süresi yerine dinamik geri ödeme süresinin kullanılmasıyla daha anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu değerin net bugünkü değerle birlikte yorumlanmasıyla kombine sistemin ekonomik performansı ortaya konmuştur. Ayrıca net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda tamamen yenilebilir enerjiden üretilen yeşil hidrojen ve yeşil amonyağın geleneksel yöntemlerle üretilmelerine kıyasla kurtardığı CO_2 ve buna bağlı olarak kazanılan karbon tutarı incelenmiştir.

Kaynakça

[1] Bergougui, B. 2024. Moving toward environmental mitigation in Algeria: Asymmetric impact of fossil fuel energy, renewable energy and technological innovation on CO2 emissions. Energy Strategy Reviews, 51, 101281.

[2] Bashir, M.F., Shahbaz, M., Ma, B., Alam, K. 2024. Evaluating the roles of energy innovation, fossil fuel costs and environmental compliance towards energy transition in advanced industrial economies. J Environ Manage, 351, 119709.

[3] Rahman, A., Murad, S.M.W., Mohsin, A.K.M., Wang, X. 2024. Does renewable energy proactively contribute to mitigating carbon emissions in major fossil fuels consuming countries? J Clean Prod, 452, 142113.

[4] Idroes, G.M., Afjal, M., Khan, M., Haseeb, M., Hardi, I., Noviandy, T.R., et al. 2024. Exploring the role of geothermal energy consumption in achieving carbon neutrality and environmental sustainability. Heliyon, 10, e40709.

[5] Goswami, S., Rai, A.K. 2024. An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustanability. Renew Energy, 233, 121118.

[6] Guler, O.F., Sen, O., Yilmaz, C., Kanoglu, M. 2022. Performance evaluation of a geothermal and solar-based multigeneration system and comparison with alternative case studies: Energy, exergy, and exergoeconomic aspects. Renew Energy, 200, 1517–32.

[7] Ebrahimi, A., Ghorbani, B., Ziabasharhagh, M. 2022. Exergy and economic analyses of an innovative integrated system for cogeneration of treated biogas and liquid carbon dioxide using absorption–compression refrigeration system and ORC/Kalina power cycles through geothermal energy. Process Safety and Environmental Protection,158, 257–81.

[8] Akimoto, R., Yamaki, T., Nakaiwa, M., Matsuda, K. 2021. Applicability study of micro Kalina cycle for regional low grade geothermal heat in Japan. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101506.

[9] Kolasinski, P. 2019. Application of the multi-vane expanders in orc systems - A review on the experimental and modeling research activities. Energies (Basel), 12, 2975.

[10] Chew, J.M., Reddy, C.C.S., Rangaiah, G.P. 2014. Improving energy efficiency of dividing-wall columns using heat pumps, Organic Rankine Cycle and Kalina Cycle. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 76, 45–59.

[11] Wang, Z., Zhou, H., Yuan, Q., Wang, Q., Shao, H., Dai, Z., et al. 2023. Optimization design and analysis of a novel total flow and Kalina cycle coupled system driven on low-medium temperature geothermal source with two-phase mixture. Appl Therm Eng, 221, 119807.

[12] Yari, M., Mehr, A.S., Zare, V., Mahmoudi, S.M.S., Rosen, M.A. 2015. Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. Energy, 83, 712–22.

[13] Dong, Z.Y., Yang, J., Yu, L., Daiyan, R., Amal, R. 2022. A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. Int J Hydrogen Energy, 47, 728–34.

[14] Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., Pullen, K., Ali Abdelkareem, M., Olabi, A.G. 2021. A review of geothermal energy-driven hydrogen production systems. Thermal Science and Engineering Progress, 22, 100854.

[15] Shah, M., Prajapati, M., Yadav, K., Sircar, A. 2022. A review of the geothermal integrated hydrogen production system as a sustainable way of solving potential fuel shortages. J Clean Prod, 380, 135001.

[16] Mohebali Nejadian, M., Ahmadi, P., Houshfar, E. 2023. Comparative optimization study of three novel integrated hydrogen production systems with SOEC, PEM, and alkaline electrolyzer. Fuel, 336, 126835.

[17] Juangsa, F.B., Irhamna, A.R., Aziz, M. 2021. Production of ammonia as potential hydrogen carrier: Review on thermochemical and electrochemical processes. Int J Hydrogen Energy, 46, 14455–77.

[18] Cha, J., Park, Y., Brigljević, B., Lee, B., Lim, D., Lee, T., et al. 2021. An efficient process for sustainable and scalable hydrogen production from green ammonia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152, 111562.

[19] Ozturk, M., Dincer, I. 2021. An integrated system for ammonia production from renewable hydrogen: A case study. Int J Hydrogen Energy, 46, 5918–25.

[20] Kojima, Y., Yamaguchi, M. 2022. Ammonia as a hydrogen energy carrier. Int J Hydrogen Energy, 47, 22832–9.

[21] Ramazanian, S., Aliehyaei, M., Salimi, M., Najafizadeh, M.M. 2023. Theoretical and experimental investigation of reverse osmosis (RO) desalination solar system using the solar panel, battery, and water turbine for high-pressure recovery of output brine. Solar Energy, 262, 111852.

[22] Hai, T., El-Shafay, A.S., Alizadeh, A., Singh Chauhan, B., Fahad Almojil, S., Ibrahim Almohana, A., et al. 2023. Combination of a geothermal-driven double-flash cycle and a Kalina cycle to devise a polygeneration system: Environmental assessment and optimization. Appl Therm Eng, 228, 120437.

[23] Yuksel, Y.E, Ozturk, M., Dincer, I. 2021. Evaluation of a new geothermal based multigenerational plant with primary outputs of hydrogen and ammonia. Int J Hydrogen Energy, 46, 16344–59.

[24] Sun, W., Feng, L., Abed, A.M., Sharma, A., Arsalanloo, A. 2022. Thermoeconomic assessment of a renewable hybrid RO/PEM electrolyzer integrated with Kalina cycle and solar dryer unit using response surface methodology (RSM). Energy, 260, 124947.

[25] Malik, M.Z., Musharavati, F., Khanmohammadi, S., Pakseresht, A.H., Khanmohammadi, S., Nguyen, D.D. 2020. Design and comparative exergy and exergo-economic analyses of a novel integrated Kalina cycle improved with fuel cell and thermoelectric module. Energy Convers Manag, 220, 113081.

[26] Alirahmi, S.M., Assareh, E., Pourghassab, N.N., Delpisheh, M., Barelli, L., Baldinelli, A. 2022. Green hydrogen & electricity production via geothermal-driven multi-generation system: Thermodynamic modeling and optimization. Fuel, 308, 122049.

[27] Akkurt, F. 2020. Düşük Sıcaklıkta Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevrimi Sisteminin Enerji Ve Ekserji Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2), 729-742.

[28] Koç, Y., Yağlı, H. 2020. Isı-Güç Kombine Sistemlerinde Kullanılan Kalina Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi. Politeknik Dergisi, 23(1), 181-188.

[29] Kara, O., Kaşka, Ö. 2023. Bir Kalina Çevriminin Termodinamik ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 13(3), 1153-1168.

[30] Sen, O., Yılmaz, C. 2022. Jeotermal ve güneş destekli güç üretimi ve ısıtma sisteminin termodinamik analizi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37(3), 1625-1638.

[31] Hançer Güleryüz, E., Özen, D. N. 2024. Jeotermal Temelli bir Organik Rankine Çevriminin Eksergo-ekonomik Analizi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 312-335.

[32] Koc, M., Yuksel, Y.E., Ozturk, M. 2022. Thermodynamic and exergo-economic assessments of a new geothermally driven multigeneration plant. Int J Hydrogen Energy, 47, 19463–80.

[33] Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Jabari Moghadam, A., Abu-Hamdeh, N.H., Lasemi, M.A., Arabkoohsar, A., et al. 2021. Design and multi-criteria optimisation of a trigeneration district energy system based on gas turbine, Kalina, and ejector cycles: Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation. Energy Convers Manag, 227, 113581.

[34] Yuksel, Y.E., Ozturk, M., Dincer, I. 2021. Development and assessment of a novel geothermal power-based multigenerational system with hydrogen and ammonia production options. Energy Convers Manag, 243, 114365.

[35] Salari, A., Hakkaki-Fard, A. 2022. Thermodynamic analysis of a photovoltaic thermal system coupled with an organic Rankine cycle and a proton exchange membrane electrolysis cell. Int J Hydrogen Energy, 47:17894–913.

[36] Nafey, A.S., Sharaf, M.A. 2010. Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: Energy, exergy, and cost evaluations. Renew Energy, 35, 2571–80.

[37] Çengel, Y.A., Boles, M.A. 2008. Thermodynamics: An engineering approach 6th Editon (SI Units). New York.: The McGraw-Hill Companies Inc.

[38] Dinçer, I., Rosen, M.A. 2007. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Amsterdam, Netherland: Elsevier.

[39] Fallah, M., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M., Akbarpour Ghiasi, R. 2016. Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system. Energy Convers Manag, 108, 190–201.

[40] Yilmaz, F., Ozturk, M. 2022. Thermodynamic and economic investigation of an innovative multigeneration plant integrated with the solar collector and combustion chamber. Int J Hydrogen Energy, 47, 31786–805.

[41] Yuksel, Y.E., Ozturk, M., Dincer, I. 2021. Development of a novel combined energy plant for multigeneration with hydrogen and ammonia production. Int J Hydrogen Energy, 46, 28980–94.

[42] Hai, T., Chaturvedi, R., Almujibah, H., Marjan, R.K., Van Thuong, T., Soliman, N., et al. 2024. Integrating geothermal energy and desalination unit into a poly-generation configuration: Comprehensive study and optimization. Desalination, 586, 117873.

[43] Gao, J., Wang, Z., Li, X., Zhou, X. 2024. Investigation of a novel scheme utilizing solar and geothermal energies, generating power and ammonia: Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses and cuckoo search optimization. Energy, 298, 131344.

[44] Tsatsaronis, G. 1999. Strengths and limitations of exergy analysis. In: Bejan, A., Mamut, E. (Eds.), Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems. Springer Netherlands, Dordrecht, 93–100.

[45] Gilbert, A., Mesmer, B. 2016. Uses of Exergy in Systems Engineering, in: Proc. 2016 Conference on Systems Engineering Research.

[46] Dipippo R, Marcille DF. 1984. Exergy analysis of geothermal power plants. Geothermal Resources Council Trans. 8, 47–52.

[47] Shakibi, H., Faal, M.Y., Assareh, E., Agarwal, N., Yari, M., Latifi, S.A., et al. 2023. Design and multi-objective optimization of a multi-generation system based on PEM electrolyzer, RO unit, absorption cooling system, and ORC utilizing machine learning approaches; a case study of Australia. Energy, 278, 127796.

[48] González-Arias, J., Nawaz, M.A., Vidal-Barrero, F., Reina, T.R. 2024. A profitability study for catalytic ammonia production from renewable landfill biogas: Charting a route for the next generation of green ammonia. Fuel, 360, 130584.

[49] Javaherian, A., Ghasemzadeh, N., Javanshir, N., Yari, M., Vajdi, M., Nami, H. 2023. Techno-environmental assessment and machine learning-based optimization of a novel dual-source multi-generation energy system. Process Safety and Environmental Protection, 176, 537–59.

[50] Zhu, Y., Li, W., Li, J., Li, H., Wang, Y., Li, S. 2020. Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO2 capture. Energy Convers Manag, 204, 112310.

[51] Zhu, Y., Zhang, C., Yan, M., Liu, Z., Li, W., Li, H., et al. 2024. Biomass-fired combined heat, cool and power system incorporating organic Rankine cycle and single-effect lithium bromide absorption refrigeration integrated with CO2 capture: Thermo-economic analysis. Energy, 304, 132096.

[52] Al Ghafri, S.Z., Revell, C., Di Lorenzo, M., Xiao, G., Buckley, C.E., May, E.F, et al. 2023. Techno-economic and environmental assessment of LNG export for hydrogen production. Int J Hydrogen Energy, 48, 8343–69.

[53] Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I.A.G., Styring, P. 2021. Sustainable Ammonia Production Processes. Front Energy Res, 9, 580808.

[54] Nasser, M., Hassan, H. 2023. Techno-enviro-economic analysis of hydrogen production via low and high temperature electrolyzers powered by PV/Wind turbines/Waste heat. Energy Convers Manag, 278, 116693.

[55] Ioroi, T., Yasuda, K., Siroma, Z., Fujiwara, N., Miyazaki, Y. 2002. Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells. J Power Sources, 112 (2):583–7.

[56] Siddiqui, O., Dincer, I. 2019. Design and analysis of a novel solar-wind based integrated energy system utilizing ammonia for energy storage. Energy Convers Manag, 195, 866–84.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Cost Effectiveness Analysis of Spare Parts Optimization for Fighter A/C

Birce Boga*[1], Özer Demir[1], Nilgün Kutay[1], Tanju Doğan[1], Aylin Gönen Erol[1], Yasin Sabri Günalp[1], Metehan Aydoğan[1], Hüseyin Bayramlar[1], Sertan Yerli[1]

*[1] TUSAŞ, ANKARA

(Alınış / Received: 27.01.2025, Kabul / Accepted: 13.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Availability,
Simulation Modelling,
Operational scenarios,
Spare part,
Stock,
Maintenance

Abstract: The aim is to analyze the alternative spare part stock level solutions for different operational scenarios and operational tempos for a generic Fighter jet product for different customers. It is aimed to use evidence-based decision-making methods for cost effective life cycle cost starting from design to the end of life for the life cycle sustainability case study. There are different methods for life cycle cost analysis and authors decided to use OPUS decision tools suite for this case study. Various Mean Time Between Failure (MTBF) and Mean Time To Repair (MTTR) values were estimated and how strategic decisions should be made for changing situations were discussed with case studies. OPUS10 cost effectiveness analysis based on different Campaign Scenario alternatives. It has been shown that different cost-effective solutions for life cycle cost starting from design during life cycle can be achieved for stock levels and warehouse levels for different cases. The study was prepared for a generic fighter jet product and is original in terms of providing support to the decision makers for making strategic decisions for the supportability system. Strategic decisions include; stock-levels, depot levels, transportation, supply and maintenance plan.

Savaş Uçağı için Yedek Parça Optimizasyonunun Maliyet Etkinliği Analizi

Anahtar Kelimeler
Kullanıma Hazır Olma,
Simülasyon Modelleme,
Operasyonel senaryo,
Yedek parça,
Stok,
Bakım

Öz: Amaç, bir savaş uçağının farklı müşteriler için farklı operasyonel senaryoları ve operasyonel tempolarına yönelik jenerik savaş uçağı ürünleri için alternatif yedek parça stok seviyesi çözümlerini analiz etmektir. Tasarım sürecinden, sürdürülebilir yaşam döngüsü sonuna kadar maliyet etkin karar, kanıta dayalı karar verme yöntemlerinin kullanılması amaçlanmaktadır. Yaşam döngüsü maliyeti analizi için farklı yöntemler bulunmaktadır ve bu vaka çalışması için OPUS karar araçları paketi kullanılarak çeşitli Ortalama Arıza Yapma Sıklığı (MTBF) ve Ortalama Tamir Zamanı (MTTR) değerleri tahmin edilmiş ve değişen durumlara göre stratejik kararların nasıl alınması gerektiği tartışılmıştır. OPUS10 maliyet etkinliği analizi Farklı Kampanya Senaryo alternatifleri temel alınarak yapılmıştır. Tasarımdan yaşam döngüsüne kadar maliyet etkin çözümlerin stok seviyeleri ve farklı durumlar için depo seviyeleri açısından elde edilebileceği gösterilmiştir. Çalışma jenerik bir savaş uçağı projesi ürünleri için hazırlanmış olup, desteklenebilirlik sistemi için stratejik kararların alınmasına destek sağlaması açısından özgün niteliktedir. Stratejik kararlar; stok seviyeleri, depo seviyeleri, ulaşım, tedarik ve bakım planını içermektedir.

*İlgili Yazar, email: birceboga@yahoo.com

1. Introduction

Optimization and efficiency are integral concepts that often intersect and complement each other in various domains, including economics, engineering, business, and environmental science. Optimization refers to the

process of making something as effective or functional as possible, while efficiency focuses on achieving maximum productivity with minimum wasted effort or expense. This essay explores the relationship between optimization and efficiency, examining how these concepts interplay to enhance performance, reduce costs, and promote sustainable practices across different sectors.

Optimization and efficiency are crucial in the modern world, where resource constraints and competitive pressures necessitate the effective utilization of available assets. Optimization involves finding the best possible solution among a set of feasible alternatives, often using mathematical models and algorithms. Efficiency, on the other hand, emphasizes the prudent use of resources to achieve desired outcomes. Understanding the relationship between these two concepts is vital for improving operational processes, enhancing productivity, and fostering innovation.

Optimization can be defined as the process of making a system, design, or decision as effective as possible within given constraints. It involves selecting the best option from a range of possibilities to achieve the highest level of performance. Optimization techniques include linear programming, integer programming, and dynamic programming, among others. Efficiency is the ability to accomplish a task with the maximum opertaional benefit and with minimum expenditure of resources, including time, money, and labor. It is about maximizing output while minimizing input, ensuring that resources are used in the most effective way possible. Efficiency can be measured through various metrics, such as productivity ratios, cost-benefit analysis, and performance indicators.

Optimization and efficiency are inherently connected, as optimization seeks to enhance efficiency by identifying the most effective use of resources. In many cases, optimization is a means to achieve efficiency. For example, in manufacturing, optimizing the production process can lead to greater efficiency by reducing waste, lowering costs, and increasing output.

The OPUS10 software used in this study provides comprehensive decision support for optimizing spare parts inventory and maintenance operations in the aviation industry. By leveraging its advanced analytical capabilities, airlines can make informed strategic decisions that enhance efficiency, reduce costs, and ensure high aircraft availability. The integration of OPUS10 into the maintenance management process offers significant advantages in terms of cost savings, operational reliability, and overall performance.

2. Methodology

In engineering, optimization is used to design systems and structures that perform efficiently under specific conditions. For example, optimizing the design of an aircraft can result in reduced fuel consumption, lower operating costs, and improved performance. Engineers use optimization algorithms to determine the best materials, dimensions, and configurations for achieving maximum efficiency.

Strategic decisions are supported by OPUS10 software in aircraft maintenance studies. OPUS10 is a powerful logistics support analysis software used for optimizing spare parts inventory and support systems. In the context of the aircraft maintenance case study, OPUS10 can facilitate several strategic decisions to enhance operational efficiency and minimize costs [1].

OPUS10 helps in formulating effective stock replenishment policies, including reorder points and quantities. It can simulate different scenarios to determine the most cost-effective replenishment strategy. By ensuring timely replenishment of stock, preventing shortages and overstock situations. Additionally, optimizes inventory turnover, improving cash flow management.

The software enables the definition and monitoring of Service Level Agreements (SLAs) for spare parts availability and maintenance response times. It provides insights into performance metrics and helps in setting realistic and achievable targets. So, it improves reliability and predictability of maintenance operations and enhances customer satisfaction by meeting agreed service levels.

OPUS10 can conduct comprehensive cost-benefit analyses for different inventory strategies. It evaluates the trade-offs between various factors, such as holding costs, ordering costs, and stockout costs. Informs strategic decisions with a clear understanding of financial implications. Helps in identifying the most cost-effective strategies for inventory management.

Life cycle consists of concept, procurement, production, operations support and decommissioning stages. The purpose of analytic Life Cycle Management (LCM) is to ensure and maintain a capability over time by providing analysis methods, models, tools, and strategies.

2.1. Literature review

OPUS10 helps determine the optimal stock levels for spare parts at each maintenance level by analysing historical usage data, failure rates, and lead times. The software uses advanced algorithms to balance the costs of holding inventory against the risks of stockouts. This ensures critical parts are available when needed, reducing aircraft downtime. Also minimizes excess inventory, leading to cost savings in storage and capital investment.
Businesses often use optimization techniques to improve efficiency in their operations. Business management systems can lead to significant reductions in project life cycle costs, improve delivery times, and enhance customer satisfaction. By optimizing supply chains, inventory levels, transportation routes, and supplier relationships, companies can achieve higher efficiency and better overall performance. [2]

The OPUS10 software can assist in deciding the best Depot Location and Allocation for maintenance levels by evaluating various factors such as proximity to flight routes, frequency of maintenance needs, and logistics costs. Strategic placement of depots can reduce transportation costs and lead times for parts delivery. So the number of aircrafts with "Awaiting Part Status" will decrease and Availability Ration will increase. Optimal allocation enhances overall efficiency in the maintenance process by ensuring parts are readily accessible. [3]

A process for extrapolating the Sherbrook Vari-metric optimization model for minimizing backorders to co-optimize parts, manpower, test and support equipment, simultaneously. [4]

Stukes et al. (2021) utilized software tools from the Opus Suite® by Systecon®, specifically OPUS10 and SIMLOX. OPUS10 handles steady-state multi-indenture/multi-echelon (MI/ME) optimization, while SIMLOX conducts discrete-event Monte Carlo simulations. The Opus Data model underpins an analytical method aimed at solving the cost and readiness objective function, which is stochastically validated using a Monte Carlo simulation engine integrated within the Opus Data model. The novel concept of treating manpower and support equipment as backorderable entities that can be optimized is further discussed in this paper. The Opus Data model serves as the basis for an analytical approach to resolve the objective function of cost and readiness and is stochastically verified via a Monte-carlo simulation engine integrated within the Opus Data model. [5]

According to Systecongroup.com (2024), industry leaders globally utilize the Opus Suite throughout all stages of the system life cycle to simulate, assess, and comprehend the effects of key decisions on technical system design and its maintenance and support solutions on costs and performance. [6]

2.2. Approach

In this study OPUS10 is used to integrate predictive maintenance systems and to align inventory management with predictive insights. This ensures that parts are available just in time for anticipated maintenance needs. Reduces unplanned maintenance and enhances aircraft availability. Optimizes the timing of parts replacement, extending the life of components.

The failure rate may be expressed in terms of failures per hours, percent failures per 1000 hours, or failures per million hours. A failure is defined as an instance when the system is not operating within a specified set of parameters. Assuming an exponential distribution, the system mean life the mean time between failure (MTBF) is:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \qquad [7]$$

(λ : Failure Rate)

The software assists in conducting lifecycle cost analyses for spare parts and maintenance strategies. It evaluates the total cost of ownership, considering acquisition, operation, maintenance, and disposal costs. Supports long-term strategic planning and budgeting. Helps in selecting maintenance strategies that minimize lifecycle costs.

OPUS10 software is used for a comprehensive decision support for optimizing spare parts inventory and maintenance operations in generic fighter jet product. The capabilities and processes of analysis used to calculate system availability process has the following steps:

- Data Collection and Preparation: In this phase, data related to the system's performance is collected and prepared for analysis. This data may include failure history, maintenance records, and usage statistics.

- System Modelling: Using the collected data, a model representing the system's operation and the interactions of its components is created. This model is used to simulate the real-world behaviour of the system.
- Determination of Simulation Parameters: Parameters and scenarios to be used in the simulation process are determined. These parameters are used to evaluate how the system performs under different operating conditions.
- Analysis and Reporting of Results: The simulation results are analysed, and reports related to system availability are generated. These reports provide decision-makers with information about the current state of the system and potential areas for improvement.
- Optimization and "What If" Scenarios: Based on the simulation results, optimization studies are conducted to increase system availability. Additionally, different scenarios (e.g., adding new components, changing maintenance strategies) are analysed to assess their impact on system performance.
- Inputs, activities and outputs of the process are summarized in the following Figure-1.

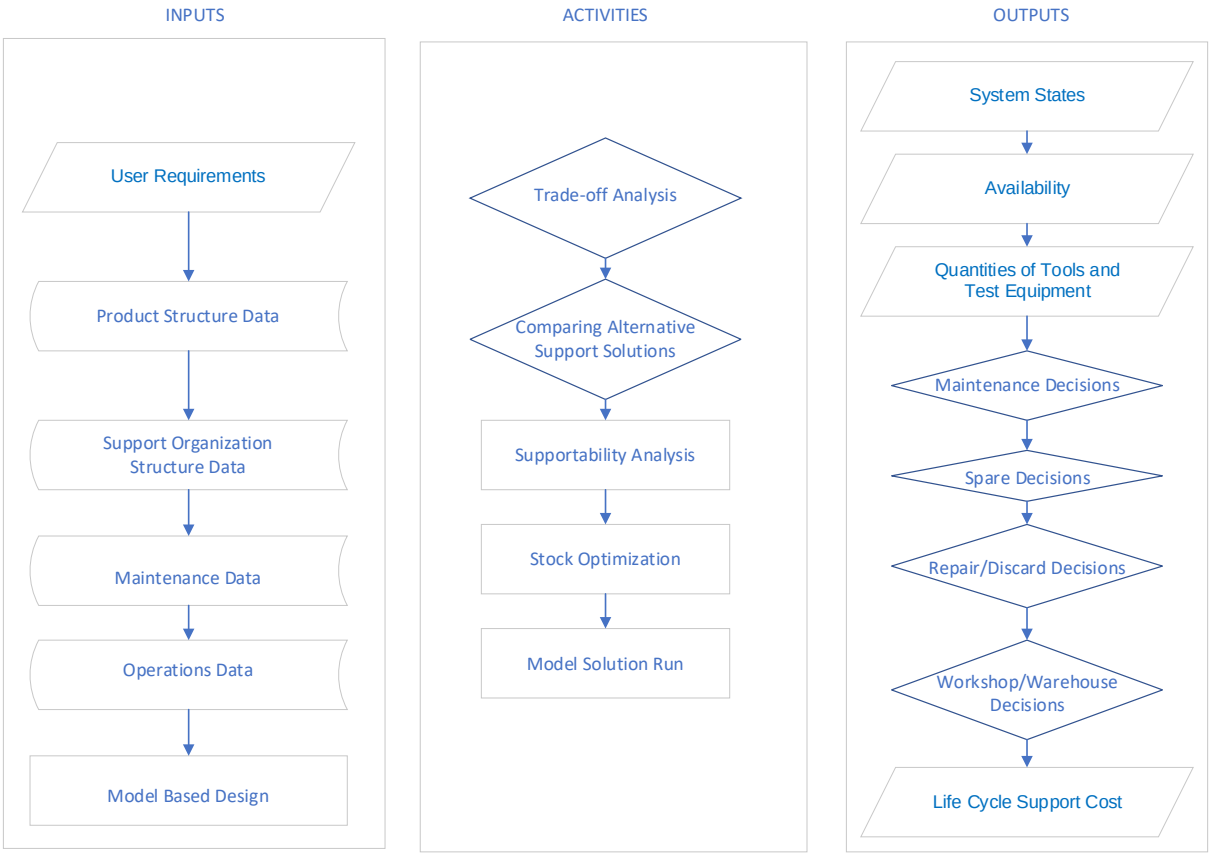


Figure 1. Analysis Process

These processes are critical for maximizing the efficiency and operational availability of the system.

Main steps in data collection and analysis are gathering historical data on maintenance schedules, part usage rates, lead times, and failure rates for each aircraft model and then analysing demand patterns for spare parts to identify high-usage items and critical components. Four main types of data used in supportability modelling analysis for generic fighter jet products are; product structure data, support organization structure data, maintenance data, and operations data.

In inventory classification stage authors categorized engine spare parts based on criticality and usage frequency using an ABC analysis to be able to idenfty the most cost-effective strategies for inventory management.
In this classification A items are; high-value parts with critical usage (e.g., engines, avionics), B items are; moderate-value parts with regular usage (e.g., landing gear components), and C items are low-value parts with occasional usage (e.g., cabin fittings).

3. Analyses and Results

The optimization model developed using linear programming to determine optimal stock levels for each part at each depot considers factors such as:

- Part demand and variability,
- Lead times for replenishment,
- Holding costs and stockout costs,
- Logistics service level operational availability targets (e.g.,90% availability).

Information has been provided regarding the analysis data and calculation methods obtained using OPUS Suite software for the engine producer-company.

The Availability analysis studies started with the identification of the main product (Aircraft) to which the engine system is connected. Then, a detailed description of the product variant was defined.

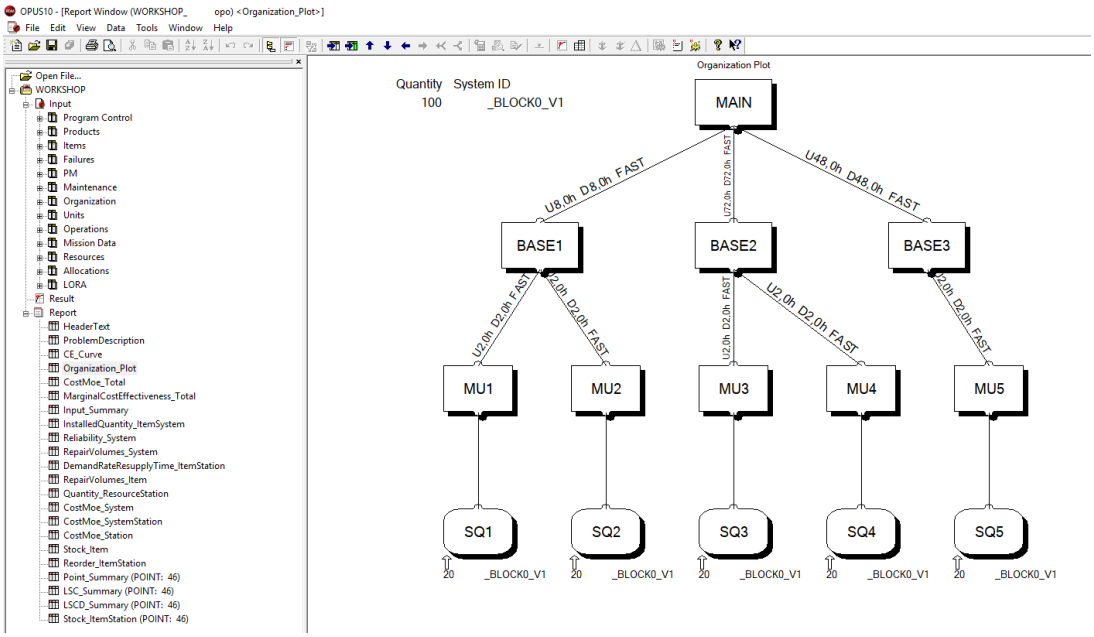
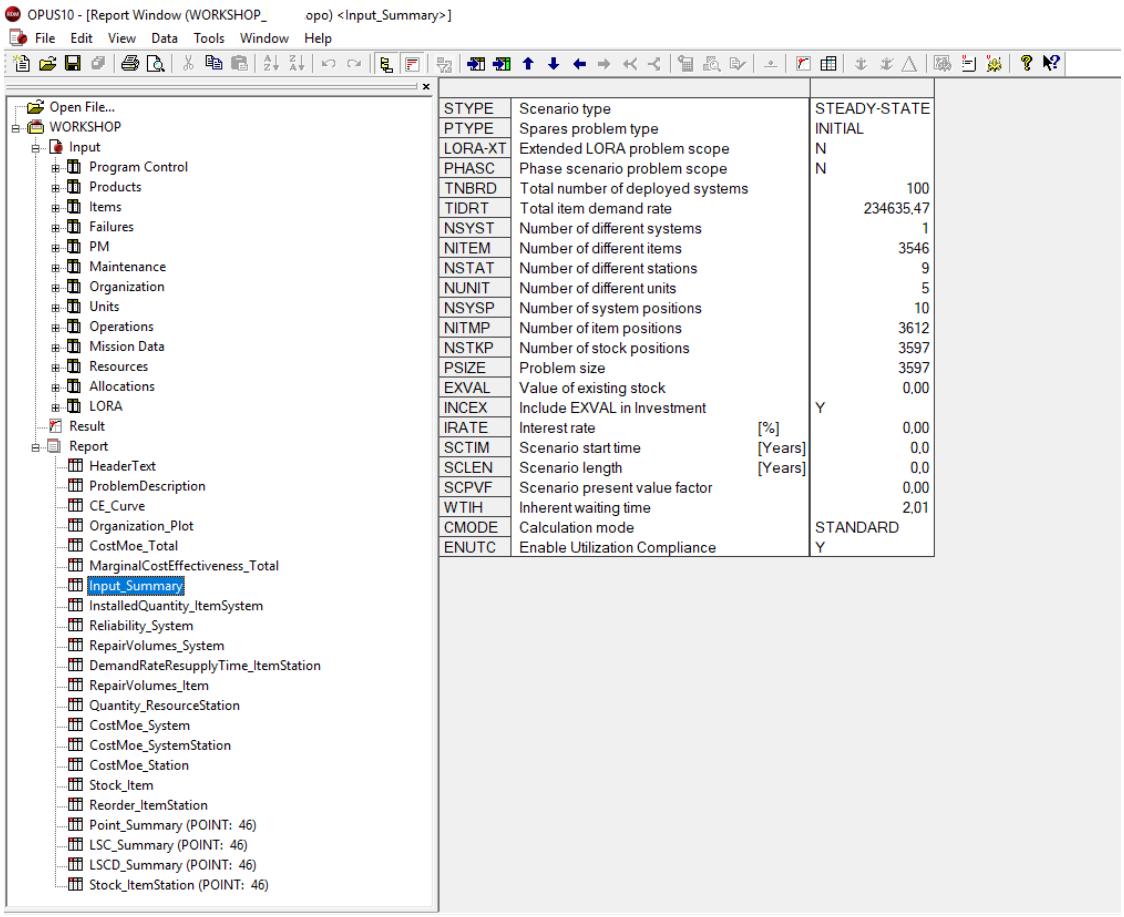


Figure 2. Depot level for a generic fighter jet

First, the number of material items for the engine was determined. The maintenance configuration for the identified 3545 items was created, and catalogue data (NSN, P/N, Price) were reviewed from PUBLOG records. Current price data could not be obtained for 237 items. Subsequently, commercial firms were contacted, and price information was obtained for 2 surplus items. For the remaining 235 items, catalogue data were examined, and the average prices of equivalent items were taken to complete the price data.

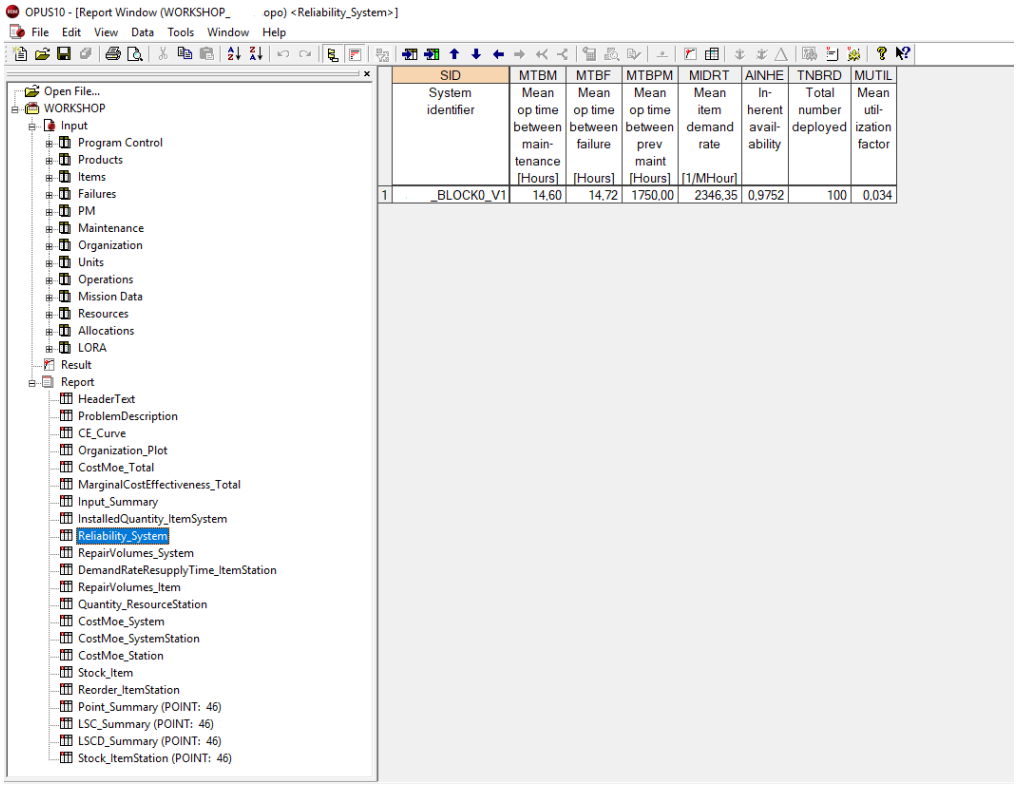


STYPE	Scenario type		STEADY-STATE
PTYPE	Spares problem type		INITIAL
LORA-XT	Extended LORA problem scope		N
PHASC	Phase scenario problem scope		N
TNBRD	Total number of deployed systems		100
TIDRT	Total item demand rate		234635,47
NSYST	Number of different systems		1
NITEM	Number of different items		3546
NSTAT	Number of different stations		9
NUNIT	Number of different units		5
NSYSP	Number of system positions		10
NITMP	Number of item positions		3612
NSTKP	Number of stock positions		3597
PSIZE	Problem size		3597
EXVAL	Value of existing stock		0,00
INCEX	Include EXVAL in Investment		Y
IRATE	Interest rate	[%]	0,00
SCTIM	Scenario start time	[Years]	0,0
SCLEN	Scenario length	[Years]	0,0
SCPVF	Scenario present value factor		0,00
WTIH	Inherent waiting time		2,01
CMODE	Calculation mode		STANDARD
ENUTC	Enable Utilization Compliance		Y

Figure 3. Scenario details for a generic fighter jet

Engine producer provided Inherent Failure Rates (IFRs) for 1491 of the 3545 items in the engine system. Additionally, IFRs for 121 items used in different regions of the engine and having the same P/N but without provided IFRs were determined by taking the arithmetic averages of the IFRs of items with the same P/N given by engine producer. The IFRs for the remaining 1906 items were determined using the "Equal Apportionment Technique" [8].

The repairability/consumability statuses of all items were determined from catalogue data and included in the configuration. Additionally, the LRU and SRU statuses and repair levels of the items were identified from the manufacturer and field data and loaded into the system. Removal and installation times for repairable items were determined by analysing field data.



	SID System identifier	MTBM Mean op time between main-tenance [Hours]	MTBF Mean op time between failure [Hours]	MTBPM Mean op time between prev maint [Hours]	MIDRT Mean item demand rate [1/MHour]	AINHE In-herent avail-ability	TNBRD Total number deployed	MUTIL Mean util-ization factor
1	_BLOCK0_V1	14.60	14.72	1750,00	2346,35	0.9752	100	0.034

Figure 4. Reliability system for a generic fighter jet

Synthetic data were created by calculating the average time for items whose removal and installation times could not be determined. Moreover, repair times for repairable items were coordinated with relevant centres, and repair cycles (Turnaround time) were defined as 45/60/90 days.

Simulations are run to test the model under various scenarios, including demand fluctuations and supply chain disruptions. Sensitivity analysis is conducted to understand the impact of changes in key parameters (e.g., lead time variability, service level targets) on stock levels and costs. By following this roadmap, authors systematically determined the optimum stock levels for jet engine components, ensuring the required operational availability while minimizing costs.

According to the model results the required 0,90 availability threshold is achieved at 31786572 USD estimated life cycle cost point. The optimum point can be seen at the following “Figure. 5 Availability vs cost for a generic fighter engine”.

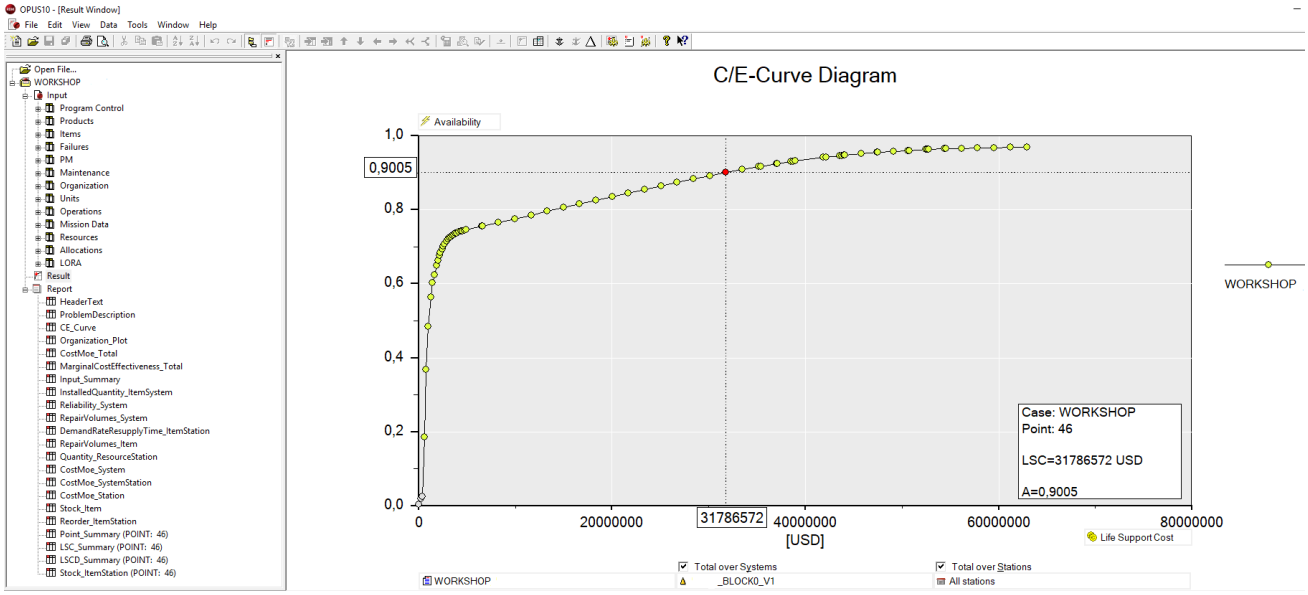
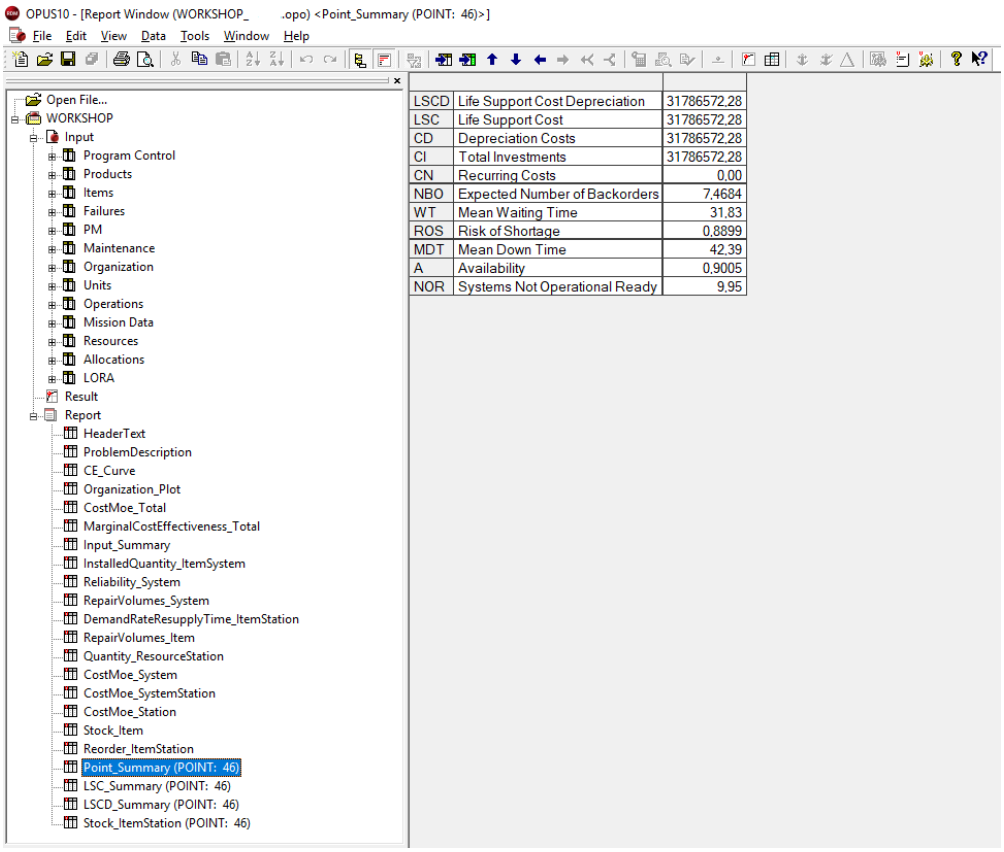


Figure 5. Availability vs cost for a generic fighter engine



LSCD	Life Support Cost Depreciation	31786572,28
LSC	Life Support Cost	31786572,28
CD	Depreciation Costs	31786572,28
CI	Total Investments	31786572,28
CN	Recurring Costs	0,00
NBO	Expected Number of Backorders	7,4684
WT	Mean Waiting Time	31,83
ROS	Risk of Shortage	0,8899
MDT	Mean Down Time	42,39
A	Availability	0,9005
NOR	Systems Not Operational Ready	9,95

Figure 6. Point summary for the optimum alternative

The optimization model recommends different stock levels for each depot based on the demand patterns and criticality of parts. Implementing the optimized stock levels results in significant cost savings, primarily from reduced holding costs and minimized stockouts. The airline achieves an estimated 15% reduction in overall inventory costs while maintaining high service levels. Aircraft availability improves due to the timely availability of critical spare parts. The optimized inventory system reduces the average downtime per aircraft by 10%, enhancing operational efficiency.

4. Discussion, Conclusion and Future Recommendations

Optimization and efficiency are interdependent concepts that play a critical role in improving performance and resource utilization across various domains. By leveraging optimization techniques, organizations can enhance efficiency, reduce costs, and promote sustainable practices. However, achieving optimal efficiency requires a balanced approach that considers the broader implications of optimization efforts. As the global landscape continues to evolve, the relationship between optimization and efficiency will remain vital for addressing complex challenges and driving progress in diverse fields.

Optimizing depot levels and stock levels for aircraft maintenance is essential for maintaining high operational efficiency and reducing costs in the aviation industry. By leveraging historical data, advanced analytics, and optimization models, the airline successfully balances the availability of spare parts with inventory costs. The case study demonstrates the importance of a strategic approach to inventory management, ensuring that aircraft are ready for operation with minimal downtime and optimized resource utilization.

Calculating the costs that will arise from the design phase to the end of the life cycle of any product will guide the selection of the most cost-effective (cost vs generic fighter jet aircraft operational availability) alternative. It is important to analyse and optimize costs by considering the entire life cycle.

In this study, an engine case study was examined and it was concluded that the optimization of a complex system can be achieved through a system of systems analysis. When analyses are evaluated and combined on the complex system from a holistic perspective, the optimal result is obtained. This optimization includes stock-levels, depot levels, transportation, supply and maintenance plan, leading us to the optimal cost outcome.

While optimization and efficiency are closely related, achieving both can present challenges. Optimization often involves complex mathematical modelling and data analysis, requiring specialized knowledge and skills. Additionally, the pursuit of efficiency must be balanced with other considerations, such as quality, safety, and sustainability. In some cases, optimizing for efficiency in one area may lead to inefficiencies in another optimizing production processes to reduce costs may result in lower product quality or increased environmental impact. Therefore, a holistic approach is necessary to ensure that optimization efforts lead to overall efficiency without compromising other important factors.

Continuous Monitoring and Adjustment is needed to regularly review and adjust stock levels based on changing demand patterns and operational needs. Implement real-time monitoring systems to track part usage and inventory levels dynamically. Integrate the inventory management system with predictive maintenance tools to forecast part failures and maintenance needs accurately. Use machine learning algorithms to enhance demand forecasting and optimize stock levels further. Strengthen collaboration with suppliers to ensure reliable and timely replenishment of spare parts. Explore vendor-managed inventory (VMI) programs to offload some inventory management responsibilities to suppliers, reducing holding costs.

Acknowledgment

The authors would like to express their gratitude to Turkish Aerospace, the author's company, for their valuable contributions and support in the realization of this study, as well as for the programs they provided, OPUS10, the relevant systems and the opportunities that facilitated the implementation of this work. The authors also extend their thanks to all their team members, who made this process possible with their innovative work environment and support for their professional development.

References

[1] Systecon Group. 2024. Life-Cycle Cost Analysis. https://www.systecongroup.com/us/knowledgecenter/life-cycle-cost-analysis (Accessed on 15 July 2024).

[2] Kawazoe C., McDougle K., Miro J.and Skinner T., 2018. A RAMS Life Support Model Through Design Optimization. IEEE RAMS. (2018).

[3] Moubray A., Bedard P., Miro J.and Stukes R., 2020. Transitioning a System Reliability/Sustainment Model into a Digital Twin. IEEE RAMS. (2020).

[4] Sherbrooke, C.C. (1986). VARI-METRIC: Improved Approxiimations for Multi-Idenfure, Multi-Echolen Availability Models. Operations Research, 34(2), 311-319.

[5] Sherbrooke C. 2004. Optimal Inventory Modeling of Systems. (2004).

[6] Stukes R., Miro J., Coleman R., and Mendoza V., 2021. Transforming Logistics Networks with Location of Repair Analysis. IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS),5-21. (2021).

[7] MIL-217 Military Handbook, 1991. Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense, Washington DC.

[8] Integrated Logistics Support Handbook Jones, J.V.,9780071491037, 2010, McGraw Hill LLC.

[9] MIL-338B Military Handbook, 2021, Electronic Reliability Design Handbook, Department of Defense Handbook.

[10] Vlad, I. M., Butcaru, A. C., Bădulescu, L., Fîntîneru, G., & Certan, I. 2022. Review on the tools used in the life cycle cost analysis. 807-816. (2022).

[11] Werme M., Eriksson T.and Righard T. 2017. Maintenance concept optimization: A new approach to LORA. IEEE RAMS. (2017).

[12] McLinn, J.A, 2010. Practical Weibull Analysis Techniques, Fifth Edition.

[13] Aerospace and Defence Industries Association of Europe, and Aerospace Industries Assocaiation. ASD/AIA S3000L: International Specification for Logistic Support Analysis (LSA). Issue 2.0, 2020.

[14] Aerospace and Defence Industries Association of Europe, and Aerospace Industries Assocaiation. SX000i International Guide for the Use of the S-Series Integrated Logistics Support (ILS) Specifications. 2021.

[15] Bingöl, Gündüz. Simulation of Aircraft Sortie Generation under an Autonomic Logistic System. Master's thesis, Air Force Institute of Technology, 2016. Web. https://scholar.afit.edu/etd/498/.

[16] Matthews, D.L., & Stanley, L.L. 2022. Managing Logistics and Transportation in the Public Sector. (2nd ed.) Routledge, New York.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Karbon-Aramid/Epoksi Reçine Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe ve Darbe Sonrası Davranış Mekanizmaları Üzerine Sayısal ve Deneysel Çalışma

Umut ÇALIŞKAN*[1], İrem BAŞLI[2], Cihan BEZEN[2]

*[1]Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ
[1]Havacılık Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Erciyes Üniversitesi, KAYSERİ
[2]Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, KAYSERİ

(Alınış / Received: 28.01.2025, Kabul / Accepted: 20.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Karbon fiber kompozit,
Aramid,
Sonlu elemanlar metodu,
Düşük hızlı darbe

Öz: Bu çalışma, hibrit yapıya sahip karbon ve aramid fiber takviyeli kompozit malzemelerin dinamik yükler altındaki mekanik davranışlarını incelemektedir. 3 farklı vurucu hızında yapılan deneyler neticesinde temas kuvveti değişimleri, deformasyon durumları ve darbe sonrası hasar mekanizmaları araştırılmıştır. 200 gr/m^2 alansal yoğunluğa sahip fiber dokumalar vakum infüzyon yöntemi ile laboratuvar ortamında üretilmiş ve deneysel boyutlara getirilmiştir. Hibrit kompozitlerin üstün özellikleri, farklı fiber türlerinin birleşimi sayesinde elde edilmekte ve bu durum, mekanik dayanım ve hasar ilerlemesi gibi kritik performans kriterlerinde iyileşme sağlamaktadır. Araştırmada karbon-aramid kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı sayısal olarak da modellenerek araştırılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen kompozit yapıda Hashin ilerleyen hasar modeli kullanılmıştır.

Numerical and Experimental Study on Low Velocity Impact and Post Impact Behavior Mechanisms of Carbon-Aramide/Epoxy Resin Layered Composites

Keywords
Carbon fiber composite,
Aramid fiber
Finite element method,
Low-velocity impact

Abstract: This study investigates the mechanical behavior of hybrid carbon and aramid fiber reinforced composite materials under dynamic loads. At 3 different impact velocities, contact force variations, deformation states and post-impact damage mechanisms were investigated. Fiber fabrics with 200 g/m2 areal density were produced in the laboratory by vacuum infusion method and brought to experimental dimensions. The superior properties of hybrid composites are achieved through the combination of different fiber types, which leads to improvements in critical performance criteria such as mechanical strength and damage progression. In this study, the low-speed impact behavior of carbon-aramid composites was investigated by numerically modeling and compared with experimental results. Hashin progressive damage model was used in the composite structure modeled by finite element method.

*İlgili Yazar, email: ucaliskan@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Mühendislik kompozitlerindeki araştırma ve gelişmeler, geçtiğimiz on yıllara kıyasla daha yüksek bir hızda ilerlemektedir. Havacılık ve yüksek enerji uygulamaları için çeşitli yapısal uygulamalarda iyi özgül mukavemete sahip hafif malzemelere olan talep, karbon fiber bazlı kompoziti birincil tercih haline getirmektedir. İnsansız Hava Araçları (İHA), polimer kompozitleri farklı yapısal bileşenlerde, özellikle de gövde, gövde, rotor kanatlarında

yaygın olarak kullanmaktadır. Özellikle savunma ve enerji sektörlerinde kullanılan mikro/mini İHA'ların zorlu operasyonel koşulları, mükemmel darbe, özgül mukavemet ve özgül modül özelliklerine sahip kompozit malzemeler gerektirmektedir. Ancak karbon elyafın kırılgan yapısı, Karbon Elyaf Takviyeli kompozitin başarısız olmasına neden olmaktadır. Karbon fiber kompozitlerin düşük darbe ve ani arıza davranışının üstesinden gelmek için kompozitlerde özellik uyarlamanın çokça bildirilen avantajından yararlanılması tavsiye edilir. Hibridizasyon yaklaşımı, uygulama alanıyla ilgili özellik özelleştirmesinde polimer kompozitler için köklü bir tekniktir.

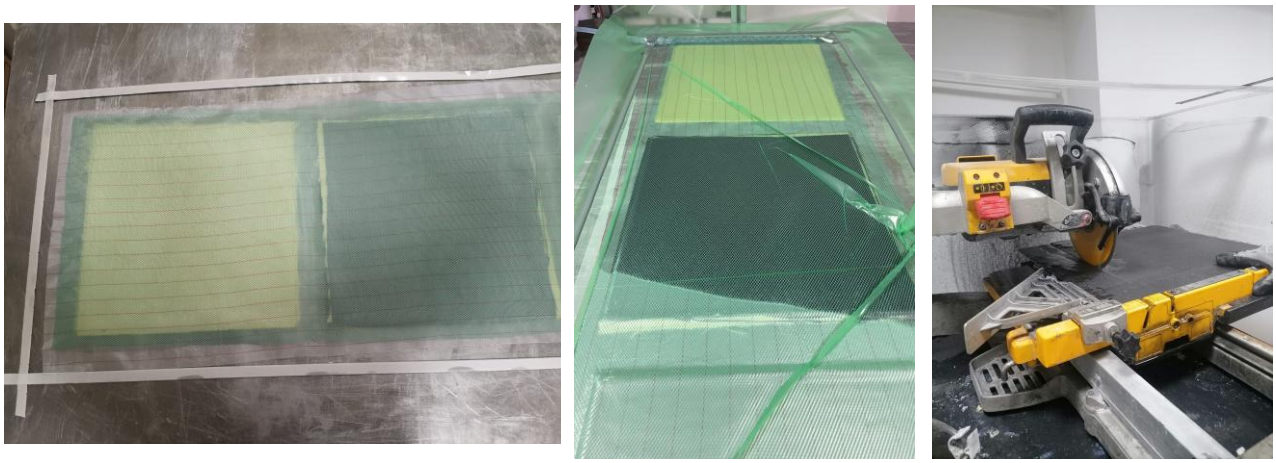
Kalaycı ve ark. [1], çalışmasında polibenzimidazol liflerinin üretimine, özelliklerine ve kullanım alanlarına yer vermiştir. Bu çalışmada aramid liflerinden de yararlanmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda, PBI lifleri ile aramid liflerinin karışım halinde kullanılması sonucu kumaş dayanımında artış sağlamakla birlikte fiyatında optimize edildiğine atıfta bulunmuşlardır. Crown ve ark. [2], uçuş giysileri için katmanlı kumaş arayışı çalışmaları yapmışlardır. 35 farklı kumaş sisteminin termal koruma performansını incelemişlerdir. İç yüzeyde kullanılan kumaş katmanına aramid de ilave etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en mükemmel uygulama aramid içeren uçuş kıyafeti olmuştur. Çalıgülü ve ark. [3], karbon, cam, aramid tabaka kompozitleri üzerinde balistik dayanımı gösternek adına mekanik testler yapmışlardır. Bu testler neticesinde, 3 noktalı basma testi sonucunda kırılma gerilimi 1,18 N/ mm^2 olarak bulunmuş, gerçek kırılma gerilimi 1,22 N/ mm^2 olarak bulunmuştur. Karbon-cam-aramid hibrit tabaka kompozit malzeme burkulma testi sonucunda 0,9 N/mm^2'de kırılma göstermiştir. Hibrit tabaka kompozit numuneye MP5 Otomatik Silah, Sig Sauer ve G3 Piyade Tüfeği kullanılarak atışlar yapılarak, MP5 Otomatik silah testinde başarı elde etmişlerdir. Onal ve ark. [4], karbon, cam, aramid fiberlerle çeşitli açılarda takviyelindirilen hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar oluşumları üzerine çalışmalar yapmışlardır ve cam elyaf yüzdesi yüksek numunenin düşük hızlı darbe testinde daha iyi sonuçlar aldığı görülmüştür. %77 ve üzeri cam elyaf takviyeli hibrit yapılarda aynı performans gözlenmiştir. Elyaf takviye artışı etki etmemiştir. Priyanka ve ark. [5], karbon ve aramid içeren düzlem dışı kompozit kumaşlarda mekanik performans üzerine çalışmalar yapmışlardır. Aramid destekli karbon hibrit yapıların aramid yapılara göre %30 daha fazla elastikiyet modülüne, %57 daha fazla basınç artışına dayandığını gözlemlemişlerdir. Shen ve ark. [6], grafen oksit ve aramid elyaf üzerine yaptıkları çalışmalarda, grafen oksitin aramid elyaf/epoksi kompozit eğilme mukavemeti üzerine araştırma yapmışlardır. Numune olarak oransal %0,1-0,7 ağırlık oranında grafen oksit ve aramid elyaf kullanmışlardır. Kompozitin eğilme mukavemeti saf epoksi reçineninkinden yaklaşık %40,86 daha yüksek düzeylere ulaşarak1054,7 MPa olarak ölçülmüştür. Xiao ve ark. [7], dört farklı yapıda hibrit kompoziti düşük hızlı darbe testine tabii tutarak mekanik özelliklerini incelemek adına bir çalışma yapmıştır. Hibrit tabakaları SC–15 epoksi reçine sistemli çapraz örgü karbon ve düz örgü cam elyaf kumaş kullanarak üretmiştir. Yapılan testler sonucunda, hibrit kompozitler daha rijit ve yük taşıma kabiliyeti daha yüksek çıkmıştır. Zhang ve ark. [8], karbon fiberler, aramid fiberler ve bunların katman içi hibritleri ile güçlendirilmiş kompozitlerin elastik davranışları ve kırılma davranışlarına yönelik testler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre boyuna uzanan elyaflarla desteklenen hibrit yapıların, enine uzuna elyaflarla desteklenen yapılara göre daya dayanıklı olduğunu göstermiştir. Katman içi aramid içeren hibrit kompozitlerin mukavemet dayanımı karbon ve aramid içeren kompozit yapılara oranla sırasıyla %138,4; %36,4 daha yüksek çıkmıştır. Yapılan testler sonucunda katman içi hibrit yapıların yüksek dayanım ve mukavemet için tercih edilebilirliğini göstermiştir. Oruç ve ark. [9], çalışmalarında, karbon aramid hibrit yapıların düşük hızlı darbe tepkisi ve interlaminer kesme mukavemeti üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmalarında iki tip sandviç yapısı üzerinden ilerlemişlerdir. Saf karbon ve saf aramid kompozitlerin hibrit yapılara göre daha az yük taşıyabildiğini ancak daha fazla enerji absorbe edebildiğini gözlemlemişlerdir. Yük ve enerji değerleri karşılaştırıldığında dış katmanı karbon olan karbon aramid hibrit yapıların, kalınlıkları 3,15 ve 3,25 mm olarak değişen numunelerinde en iyi sonuçlar alınmıştır. Dış katmanı aramid olan 2,95 mm kalınlığında numunede ise en iyi interlaminer kesme mukavemetini gözlemlemişlerdir.

Bu çalışma, hibrit karbon-aramid takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle bütüncül olarak ele alması açısından literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Özellikle, Hashin hasar kriteri ile katman bazlı hasar haritalamasının gerçekleştirilmesi ve bu haritaların tüm katmanlardan üst üste bindirilerek genel hasar yapısının değerlendirilmesi, literatürde nadir rastlanan bir yaklaşımdır. Ayrıca, farklı darbe enerjilerine karşı kompozit yapının tepkisinin hem ön hem de arka yüzeylerde detaylı olarak analiz edilmesi ve deneysel sonuçların sayısal modelle doğrulanması, çalışmanın özgünlüğünü artıran temel unsurlar arasında yer almaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Yöntem

Bu çalışmada, karbon (plain dokuma tipinde Tenax-E HTA 40 3k ipinden üretilmiş çift yönlü düz dokuma, yüzey yoğunluğu 200 g/m2) ve aramid (Kevlar Fiber Kumaş 400 gr/m2 -plain CT709 çift yönlü düz dokuma) dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Havacılık ve uzay sınıfı epoksi reçine Araldite LY1564 ve sertleştirici Aradur 3486 Huntsman şirketinden satın alınmış ve matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Kompozit laminatların imalatı için Vakum Destekli reçine infüzyonu (Vacuum-Assisted resin infusion, VARIM) kullanılmıştır. Şekil 1 üretim kurulumunu göstermektedir.



Şekil 1. Vakum Destekli reçine infüzyonu (Vacuum-Assisted resin infusion, VARIM) ve numunelerin uygun boyutlara getirilmesi

Numune kalınlıkları benzer olacak şekilde istifleme yapılmıştır ve katman sayıları belirlenmiştir. Hibrit yapı 4 katman aramid 4 katman karbon fiber, yekpare yapılar ise 6 katman aramid, 12 katman karbon fiber olacak şekilde oluşturulmuştur. 50x50 cm boyutlarında üretilen levhalar, 10x10 cm boyutlarında deneye uygun hale getirilmiştir.



Şekil 2. Düşük hızlı darbe test cihazı

2.2. Sayısal Yöntem

Şekil 3'de karbon/aramid fiber takviyeli tabakalı kompozit plakanın sayısal modelini gösteren 0/90 fiber oryantasyonuna sahip model verilmiştir. Vurucu küresel uç geometrisine sahiptir, çapı 20 mm ve kütlesi 7.2950 kg'dır. Deneysel testler ve analizler 12.5, 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri için gerçekleştirilmiştir. Analizler için sonlu eleman tiplerinin hesaplama başarımı önemlidir. Analizler kabuk (shell) elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelinde hasar ve bozunum modeli uygulanmış ve elastik sabitlerin bozunum katsayılarına karar verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar, temas kuvveti değişimi, kinetik enerji değişimi ve hasar tipleri bakımından irdelenmiştir. Tablo 1'de sayısal modelde kullanılan karbon ve aramid kompozitlerin mekanik ve hasar özellikleri verilmiştir.

2 boyutlu Hashin [10] hasar kriterleri genel formda şu şekilde ifade edilir:

Fiber çekme hasarı ($\widehat{\sigma_{11}} \geq 0$)

$$F_f^t = \left(\frac{\widehat{\sigma_{11}}}{X^T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\widehat{\tau_{12}}}{S^L}\right)^2 \quad (1)$$

Fiber basma hasarı($\widehat{\sigma_{11}} < 0$)

$$F_f^c = \left(\frac{\widehat{\sigma_{11}}}{X^C}\right)^2 \quad (2)$$

Matris çekme hasarı ($\widehat{\sigma_{22}} \geq 0$)

$$F_m^t = \left(\frac{\widehat{\sigma_{22}}}{Y^T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\widehat{\tau_{12}}}{S^L}\right)^2 \quad (3)$$

Matris basma hasarı($\widehat{\sigma_{22}} < 0$)

$$F_m^c = \left(\frac{\widehat{\sigma_{22}}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right]\frac{\widehat{\sigma_{22}}}{Y^C} + \left(\frac{\widehat{\tau_{12}}}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

$\widehat{\sigma_{11}}, \widehat{\sigma_{22}}, \widehat{\tau_{12}}$ efektif gerilme tensörleridir, $\hat{\sigma}$, hasar kriterini hesaplamada kullanılan gerilme bileşenidir ve şu ifade ile hesaplanır [11]:

$$\hat{\sigma} = M\sigma \quad (5)$$

σ gerçek gerilme bileşenidir ve hasar operatörü şu şekilde tariflenir:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

d_f, d_m, d_s fiber, matris ve kayma hasarını karakterize eden ve d_f^t , d_f^c, d_m^c hasar değişkenlerinden türetilen iç hasar değişkenleridir ve daha önce bahsedilen dört hasar kriterine şu şekilde karşılık gelmektedir [11]:

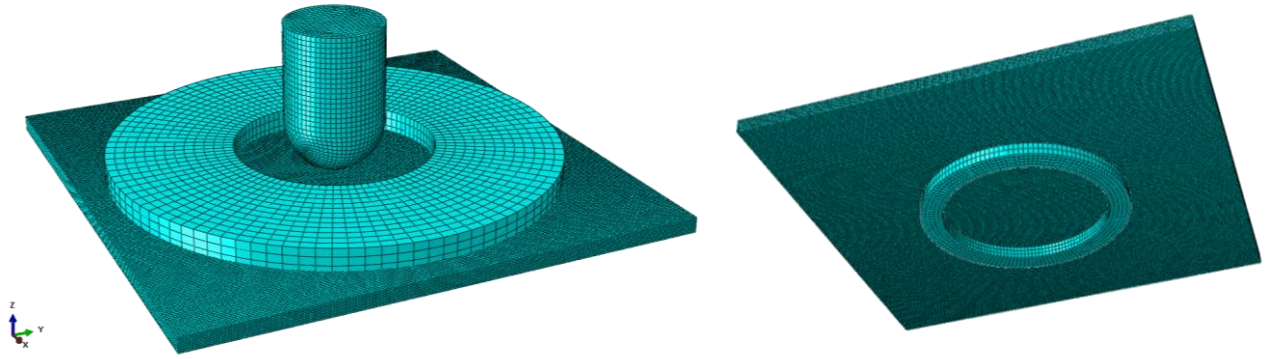
$$d_f = \begin{cases} d_f^t & if\ \widehat{\sigma_{11}} \geq 0 \\ d_f^c & if\ \widehat{\sigma_{11}} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & if\ \widehat{\sigma_{22}} \geq 0 \\ d_m^c & if\ \widehat{\sigma_{22}} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)\,(1 - d_m^c) \quad (9)$$

Tablo 1. Kompozit malzemelerin (Aramid fiber/epoksi ve Karbon fiber/epoksi) mekanik özellikleri [12,13]

Özellik	Karbon fiber/epoksi	Aramid fiber /epoksi
Boyuna elastisite modülü, E_{11}	150.9 (GPa)	67 (GPa)
Enine elastisite modülü, $E_{22} = E_{33}$	11.2 (GPa)	4.7 (GPa)
Düzlem içi kayma modülü, $G_{12} = G_{13}$	5.3 (GPa)	2.0 (GPa)
Düzlem dışı kayma modülü, G_{23}	1.4 (GPa)	1.586 (GPa)
Poison oranı, $\mu_{12} = \mu_{13}$	0.29	0.34
Poison oranı, μ_{23}	0.33	0.45
Boyuna çekme mukavemeti, X_T	1858.3 (MPa)	1420 (MPa)
Enine çekme mukavemeti, $Y_T = Z_T$	25.4 (MPa)	36 (MPa)
Boyuna basma mukavemeti, X_C	576.8 (MPa)	312 (MPa)
Enine basma mukavemeti, $Y_C = Z_C$	107.3 (MPa)	145 (MPa)
Düzlem içi kayma mukavemeti $S_{12} = S_{13}$	79.5 (MPa)	53 (MPa)
Interlaminar kayma mukavemeti, S_{23}	22.9 (MPa)	53 (MPa)



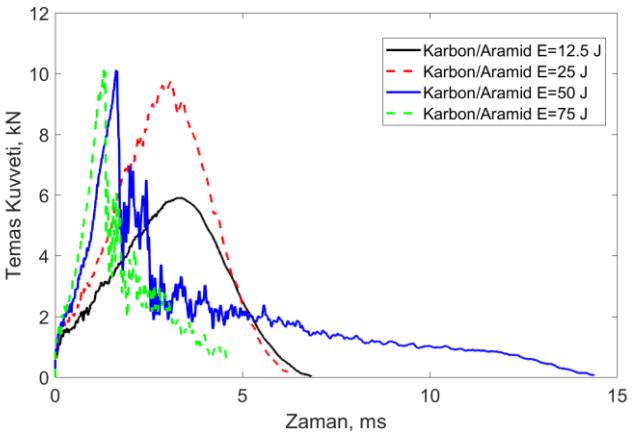
Şekil 3. Sonlu elemanlar modeli

3. Bulgular

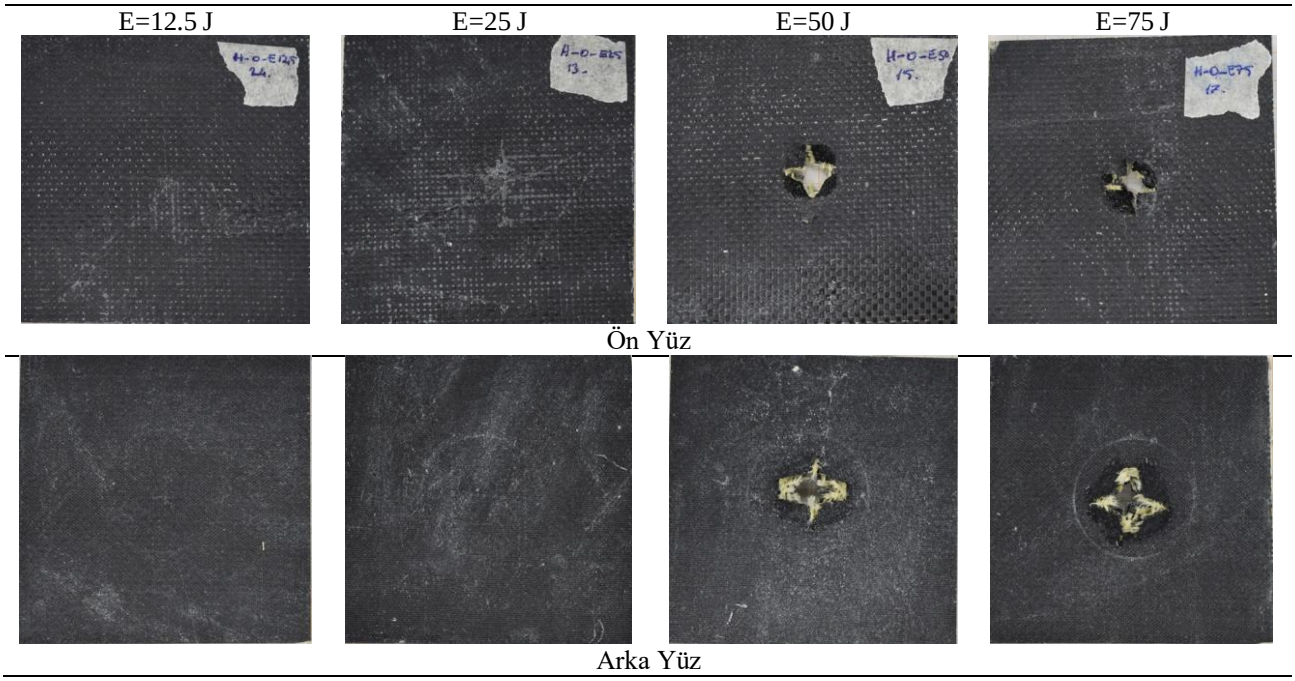
Bu bölümde, hibrit karbon/aramid takviyeli epoksi kompozit plakalara uygulanan düşük hızlı darbe testlerinden ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Farklı darbe enerjileri altında yapının temas kuvveti-zaman tepkisi, hasar yayılımı ve gerilme dağılımları detaylı şekilde değerlendirilmiş; deneysel veriler ile sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 4'te, karbon/aramid takviyeli hibrit kompozit yapıların farklı darbe enerjileri (12.5, 25, 50, 75 J) altında gösterdiği deneysel temas kuvveti-zaman tepkileri sunulmaktadır. Grafikte, artan darbe enerjisiyle birlikte tepe kuvveti, temas süresi ve hasar karakteristikleri arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir.

12.5 J darbe enerjisinde yaklaşık 6 kN en ybüyük temas kuvveti elde edilirken, darbe enerjisinin 25 J'ye kadar artmasıyla, yapı tepe noktasında yaklaşık 10 kN gibi yüksek bir kuvvet taşıyabilmiş ve daha rijit bir tepki sergilemiştir. Ancak 50 J ve 75 J enerjilerinde temas kuvvetinde ani düşüşler meydana gelmiş; bu durum, hasar oluşumu (delaminasyon, matris çatlağı ve fiber kırılması) ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle 75 J seviyesinde yapının hasarı daha erken başlamış ve enerji absorpsiyonu deformasyon ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4. Hibrit kompozit yapıların düşük hızlı darbe temas kuvveti-zaman grafiği

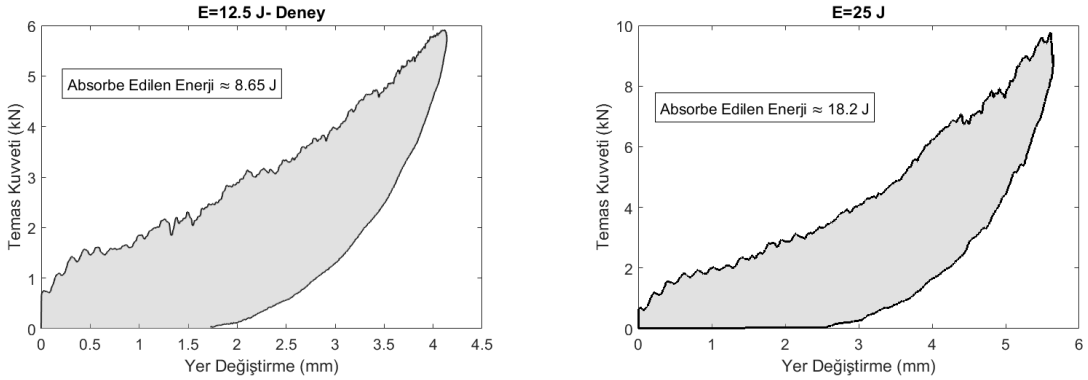


Şekil 5. Hibrit karbon/aramid epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe sonrası deformasyon görüntüleri

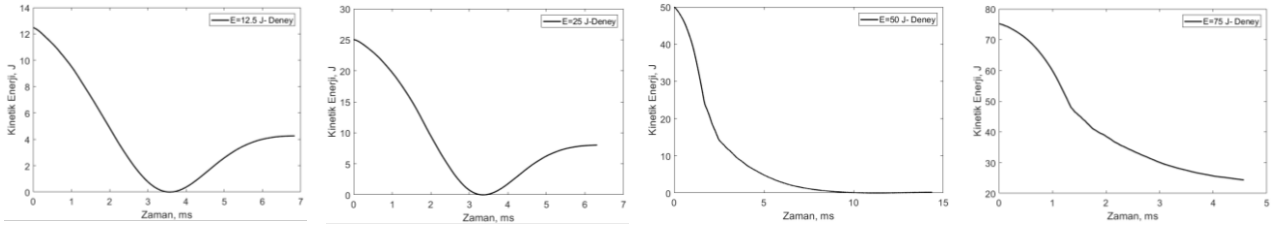
Buna ek olarak, düşük darbe enerjilerinde (12.5 J ve 25 J) temas süresi sınırlı kalmış (~5–6 ms), sistem kontrollü bir sönümleme göstermiştir. Buna karşılık, 50 J seviyelerinde temas süresi yaklaşık 15 ms'ye ulaşmış ve grafiklerde belirgin titreşim davranışları görülmüştür. Bu durum, darbe sonrası sistemde yeterli sönümleme gerçekleşmediğini ve iç yapının hasar ile yük taşımada etkinliğini kaybettiğini göstermektedir.

Artan darbe enerjisiyle birlikte kompozit yapının taşıdığı maksimum kuvvet seviyesinin dalgalandığı, hasar yayılımının ise daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, hibrit kompozit yapıların enerjiye bağlı mekanik performans değişimlerini ortaya koymakta ve sayısal modelle karşılaştırmalar için temel oluşturmaktadır.

Şekil 5'te, hibrit karbon/aramid epoksi kompozit plakaların farklı darbe enerjileri (12.5, 25, 50, 75 J) altında maruz kaldıkları düşük hızlı darbe sonrası ön ve arka yüzeylerindeki makroskobik deformasyonlar sunulmuştur. Görseller, darbe enerjisi arttıkça hasarın yayılımında ve şiddetinde gözle görülür bir artış olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. 12.5 J ve 25 J seviyelerinde, ön ve arka yüzeylerde ciddi bir delinme veya kırılma gözlemlenmemiş, yüzeysel deformasyonlar sınırlı kalmıştır. Bu durum, kompozit yapının bu seviyedeki enerjiyi fiber kırığı veya delaminasyon gibi mikro hasar mekanizmalarıyla absorbe ettiğini göstermektedir. Ancak 50 J ve 75 J enerjilerinde, özellikle arka yüzeylerde belirgin delaminasyon izleri, yerel fiber kopmaları ve katman ayrılmaları gözlenmiştir. Aramid fiberlerin yüksek tokluk özelliği sayesinde deformasyon enerjisinin bir kısmı absorbe edilse de, bu seviyelerde enerjinin büyüklüğü yapısal bütünlüğün korunmasını engellemiştir.



Şekil 6. 12.5 ve 25 J darbe enerjisi altındaki hibrit kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri ve absorbe edilen enerji değerleri

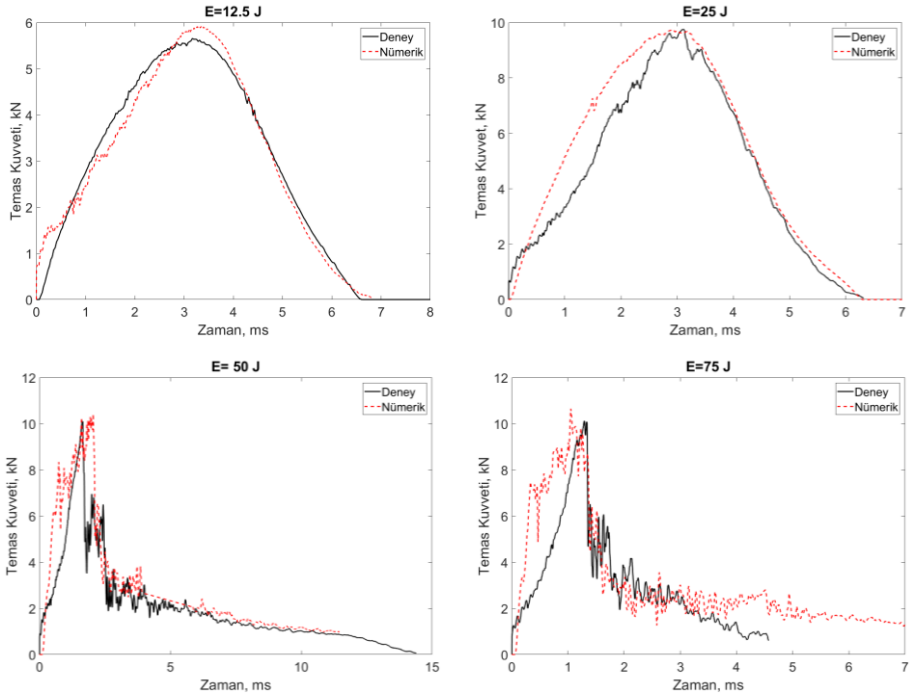


Şekil 7. Hibrit kompozit yapıların düşük hızlı darbe altındaki kinetik enrji-zaman grafikleri

Şekil 6'da, 12.5 J ve 25 J darbe enerjisi altındaki hibrit karbon/aramid kompozit plakaların temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri ve absorbe edilen enerji değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her iki darbe seviyesinde de, temas kuvveti uygulanan yer değiştirme ile birlikte artmakta ve maksimum kuvvete ulaştıktan sonra düşüş göstermektedir. 12.5 J enerjisinde maksimum temas kuvveti yaklaşık 6 kN seviyesinde gerçekleşirken, 25 J darbesinde bu değer yaklaşık 9.5 kN'ye ulaşmıştır. Bu artış, daha yüksek darbe enerjisi ile malzeme içinde daha yoğun bir deformasyonun meydana geldiğini göstermektedir. Elastik yer değiştirme değerleri de benzer şekilde artış göstermekte olup, 12.5 J darbesinde yaklaşık 4 mm olan maksimum yer değiştirme, 25 J darbesinde yaklaşık 5.7 mm'ye ulaşmıştır.

Enerji absorpsiyon analizine göre, 12.5 J darbe altında yaklaşık 8.65 J'lik bir enerji absorbe edilirken, 25 J darbe altında bu değer 18.2 J'ye yükselmiştir. Bu durum, daha yüksek darbe enerjilerinde yapının artan deformasyon kapasitesiyle birlikte daha fazla enerjiyi sönümleyebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, her iki durumda da darbe sonrası tam kırılma gerçekleşmemiş olup, bu enerji düzeylerinde yapı önemli ölçüde plastik deformasyon ve muhtemel mikroyapısal hasar mekanizmaları (matris çatlaması, fiber kırığı, delaminasyon vb.) geliştirerek darbe etkisini absorbe edebilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, hibrit takviyeli kompozit yapının darbe dayanımına katkı sunduğunu ve artan darbe enerjilerine karşı enerji absorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. 50 ve 75 J enerji seviyelerinde tam perforasyon ve numunelerde kırılma meydana geldiği için tüm enerji harcanmıştır.

Şekil 7'de, 12.5 J, 25 J, 50 J ve 75 J darbe enerjisi seviyelerinde hibrit karbon/aramid kompozit numunelerin darbe sırasında izlenen kinetik enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Her bir grafik, darbe anında numunenin enerjiyi nasıl sönümlediğini ve kalan kinetik enerjinin zamanla nasıl değiştiğini göstermektedir. Düşük enerjili darbeler (12.5 J ve 25 J) için eğrilerde, kinetik enerjinin belirli bir süre boyunca azaldıktan sonra tamamen sıfırlanmadığı, belirli bir miktarının geri yansıyarak sistemde kaldığı görülmektedir. Bu durum, numunenin tamamen delinmediği, yapısal bütünlüğünü kısmen koruduğu ve bir miktar enerjiyi geri ilettiğini göstermektedir. Özellikle 12.5 J darbesinde kinetik enerji yaklaşık 0 J seviyesine indikten sonra tekrar artış eğilimi göstermekte ve yaklaşık 4 J seviyesine kadar geri kazanım yaşanmaktadır. Bu durum, darbe anında enerjinin bir kısmının elastik deformasyon yoluyla geri yansıdığını ve yapının tamamen absorpsiyon gerçekleştirmediğini ifade eder. Benzer şekilde, 25 J darbesinde de yaklaşık 7–8 J civarında bir kinetik enerji geri kazanımı gözlemlenmiştir. Bu, düşük darbe enerjileri altında yapının absorbe edebileceği maksimum enerjiye ulaşılamadığını ve sistemin geri tepkisinin belirgin olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Hibrit karbon/aramid kompozit plakanın farklı darbe enerjilerinde (12.5, 25, 50, 75 J) deneysel ve sayısal temas kuvveti-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

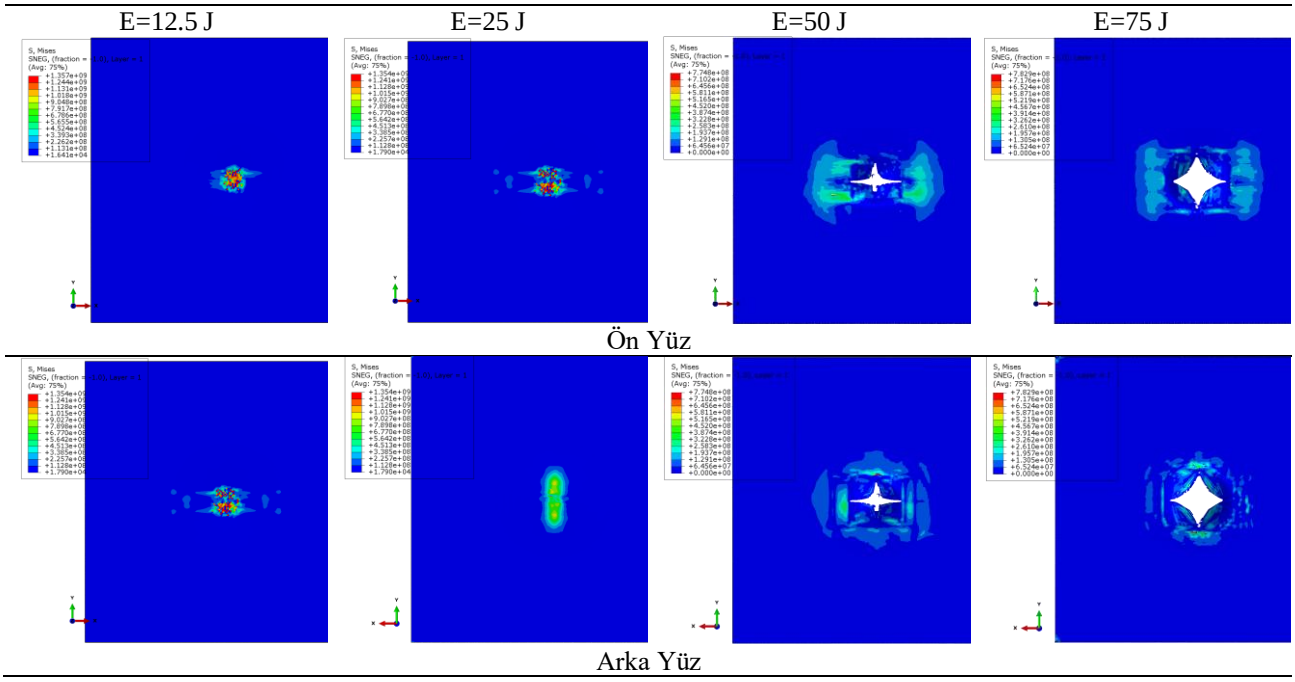
Yüksek darbe enerjilerinde (50 J ve 75 J) kinetik enerji eğrileri oldukça hızlı bir şekilde sıfıra yakın değerlere inmektedir ve herhangi bir geri yansıma izlenmemektedir. Bu durum, bu darbe seviyelerinde kompozit numunelerin tam hasar aldığı, büyük oranda enerji absorbe ettiği ve elastik geri tepkisinin ortadan kalktığı anlamına gelmektedir. Özellikle 50 J ve 75 J seviyelerinde kinetik enerji neredeyse tamamen sönümlenmiş ve sistemin tamamı enerjiyi yapısal deformasyon ve kırılma yoluyla absorbe etmiştir. Bu da yapıların kritik darbe eşiğini aştığını ve tamamen delindiğini göstermektedir.

Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde, hibrit kompozit yapıların darbe altındaki mekanik tepkileri ile enerji sönümleme davranışları arasında doğrudan bir ilişki olduğu görülmektedir. Şekil 6'da yer alan temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri, malzemenin darbe sırasında gösterdiği mekanik direnç ve deformasyon kapasitesini yansıtırken; Şekil 7'de sunulan kinetik enerji-zaman grafikleri, darbe anında uygulanan enerjinin ne ölçüde absorbe edildiğini ve yapının bu enerjiyi nasıl dağıttığını ortaya koymaktadır. Düşük enerjili darbelerde (12.5 J ve 25 J), Şekil 6'daki eğrilerin altında kalan alan sınırlı olup yapının büyük ölçüde elastik-plastik deformasyonla darbe enerjisini sönümlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, Şekil 7'de kinetik enerjinin tam olarak sıfırlanamayıp belirli oranda geri kazanılmasıyla da desteklenmektedir. Sönümlenen enerji miktarları birbirlerini doğrulamaktadır.

Şekil 8, hibrit karbon/aramid kompozit plakanın düşük hızlı darbe yüklemeleri altında (12.5, 25, 50 ve 75 J) deneysel ve sayısal olarak elde edilen temas kuvveti-zaman verilerinin karşılaştırmalı grafiklerini sunmaktadır. Grafikler, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sayısal modelin düşük darbe enerjilerinde fiziksel davranışları başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Özellikle 12.5 ve 25 J enerji seviyelerinde, deneysel ve sayısal eğriler yüksek bir örtüşme göstermekte olup; tepe kuvveti, temas süresi ve eğri formu açısından uyum tatmin edicidir. Bu durum, sayısal modelde kullanılan malzeme parametrelerinin ve hasar kriterlerinin bu enerji seviyelerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ancak 50 J ve 75 J seviyelerinde, sayısal model ile deneysel veriler arasında belirgin sapmalar gözlenmiştir. Özellikle tepe kuvvetinin hemen ardından sayısal modelin daha erken ve keskin bir kuvvet düşüşü tahmin ettiği, deneysel eğrinin ise daha uzun süreli salınım içerdiği dikkat çekmektedir.

Bu farklılıklar, yüksek darbe enerjilerinde kompozit yapıda meydana gelen karmaşık hasar mekanizmalarının (delaminasyon, matriks yırtılması, fiber kırılması) sayısal olarak tam anlamıyla modellenememesinden kaynaklanabilir.

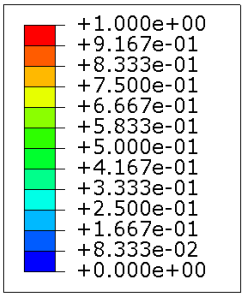


Şekil 9. Farklı darbe enerjilerinde (12.5, 25, 50, 75 J) hibrit karbon/aramid kompozit plakanın ön ve arka yüzlerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımları.

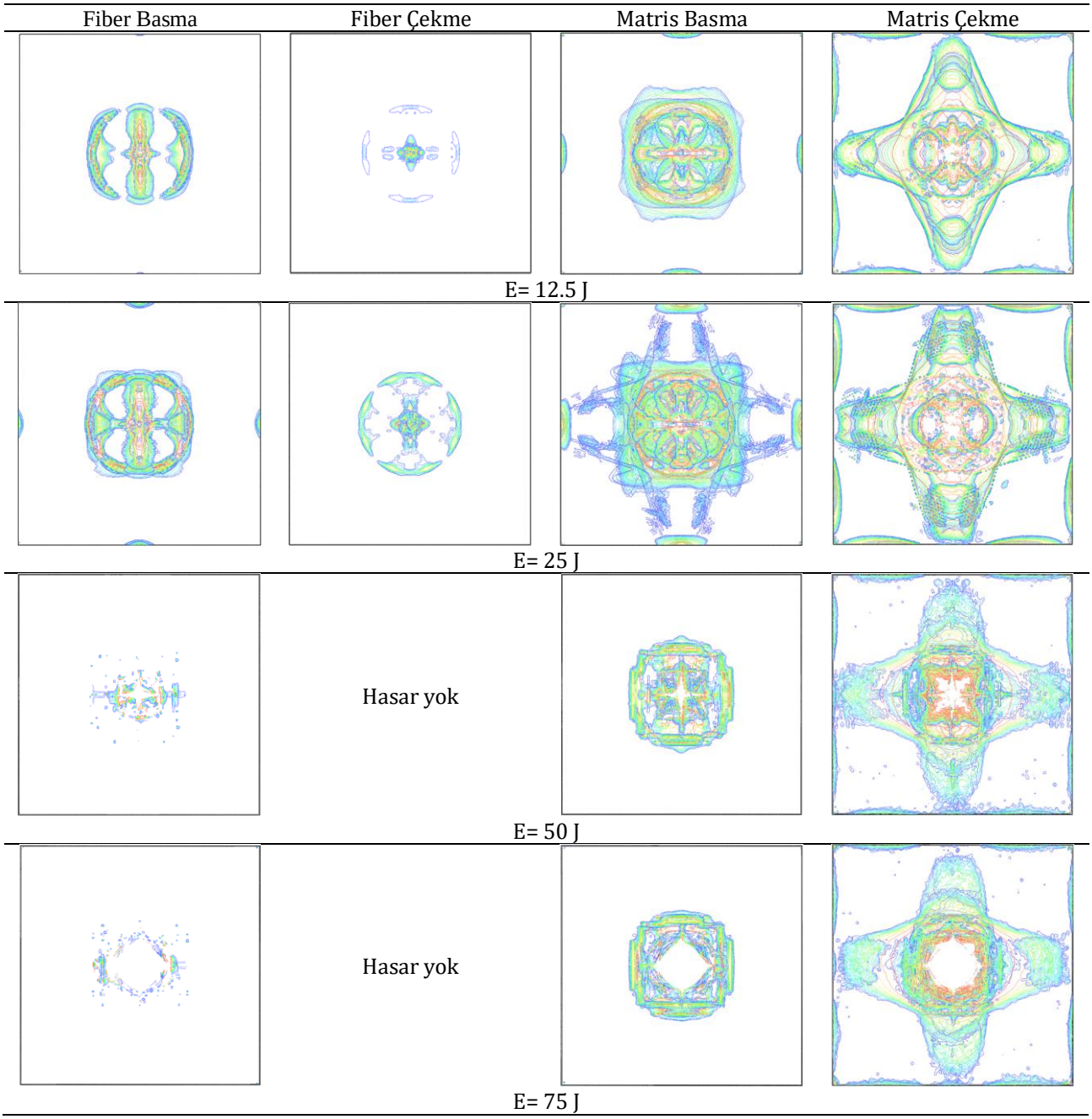
Ayrıca, temas yüzeyi, sürtünme etkileri ve katman ayrılmaları gibi parametrelerin doğruluğu yüksek enerjilerde daha kritik hale gelmektedir. Sayısal model düşük enerjili darbelerde yeterli doğruluğa sahipken, yüksek enerjili darbelerde fiziksel süreci tam olarak temsil edememektedir. Bu durum, ileri düzey hasar modellerinin (örneğin Cohesive Zone Model veya 3D Hashin) dahil edilmesiyle geliştirilebilir.

Şekil 9'de, hibrit karbon/aramid takviyeli kompozit plakanın farklı darbe enerjileri altında ön ve arka yüzeylerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımları sunulmaktadır. Gerilme seviyeleri, malzeme içerisindeki lokal yük yoğunlaşmalarını ve hasar potansiyel bölgelerini tanımlamak açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Düşük darbe enerjileri olan 12.5 J ve 25 J seviyelerinde, gerilme dağılımı dar bir alanda sınırlı kalmakta ve ön yüzeyde merkezde yoğunlaşan simetrik bir yayılım göstermektedir. Bu durumda oluşan deformasyon elastik sınırlar içerisinde kalmakta ve hasar gelişimi kısıtlıdır. Enerji seviyesi 50 J ve 75 J'ye çıkarıldığında, gerilme alanı genişlemekte ve özellikle arka yüzeylerde belirgin bir yayılım göstermektedir. Bu durum, darbenin arka katmanlara iletildiğini ve yapının enerji sönümleme kapasitesinin zorlandığını göstermektedir. Özellikle 75 J darbe enerjisinde, Von Mises gerilmesinin malzeme

merkezinden çevresine doğru yayıldığı, yüksek stres konsantrasyonlarının oluştuğu ve bunun da yerel delaminasyon ve fiber kırıkları ile ilişkilendirilebileceği görülmektedir. Ayrıca, ön ve arka yüzeylerdeki gerilme dağılımı asimetrik hale gelmiş ve bu durum yapısal bütünlüğün bozulduğuna işaret etmiştir. Sayısal modelde elde edilen bu gerilme konsantrasyonları, Şekil 5'te verilen deneysel deformasyon izleriyle büyük oranda örtüşmekte, bu da model doğrulamasını güçlendirmektedir. Şekil 10'da ise sayısal analizlerde kullanılan Hashin hasar modelinin farklı hasar türlerinin hesaplandığı hasar indeksini vermektedir. Bu sayede tüm hasar türlerindeki görseller için aynı değişim kullanılmıştır.



Şekil 10. Hashin hasar indeksi



Şekil 11. Farklı darbe enerjilerinde (12.5, 25, 50, 75 J) hibrit karbon/aramid kompozit plakada oluşan Hashin hasar kriterine göre fiber basma, fiber çekme, matris basma ve matris çekme hasar dağılımları.

Şekil 11'de, farklı darbe enerjilerinde (12.5 J, 25 J, 50 J, 75 J) hibrit karbon/aramid kompozit plakanın katmanlarında oluşan hasar türlerinin (fiber basma, fiber çekme, matris basma, matris çekme) Hashin hasar kriterlerine göre dağılımları sunulmaktadır. Bu analizde, her bir hasar türü için tüm katmanlardan elde edilen hasar çıktıları üst üste bindirilerek, yapının genel (3D) hasar davranışı temsil edilmiştir.

Düşük darbe enerjileri (12.5 ve 25 J) için özellikle matris çekme ve matris basma kaynaklı hasarlar ön planda yer almaktadır. Bu hasarların dairesel ve simetrik yayılım göstermesi, darbe enerjisinin çoğunlukla reçine fazında sönümlendiğini ve fiberlerin göreceli olarak yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 25 J darbe enerjisinde fiber basma ve çekme hasarlarında da artış gözlemlenmiş, yapının yük taşıma kapasitesinin sınırlarına yaklaşmaya başladığı anlaşılmıştır.

50 J ve 75 J enerji seviyelerinde, fiber çekme hasarının görülmemesi ve baskın olarak matris hasarlarının devam etmesi dikkat çekicidir. Bu durum, fiber yöneliminin darbe yönüne paralel olması halinde, çekme yerine basma etkilerinin hakim olduğunu ve dolayısıyla fiber çekme hasarının gelişmediğini düşündürmektedir.

Özellikle 75 J seviyesinde, matris çekme hasarının çok katmanlı ve yaygın biçimde dağılması, yapının bu bölgelerde rijitliğini kaybettiğini ve enerji sönümleme görevini büyük ölçüde matris yapının üstlendiğini göstermektedir.

Bu durumlara ek olarak, şekil boyunca gözlemlenen simetrik ve merkezden çevreye yayılan hasar biçimi, darbe yüklemesinin düzgün uygulandığını ve yapının elyaf oryantasyonu ile hasar şekli arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Katmanlar arası hasarların üst üste bindirilmesiyle elde edilen bu bütüncül yaklaşım, sayısal modelin detaylı hasar takibi açısından yeterliliğini ve doğrulayıcılığını desteklemektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, hibrit karbon/aramid takviyeli epoksi kompozit plakaların düşük hızlı darbe altındaki mekanik tepkisi deneysel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri ve sayısal simülasyonlar sonucunda; temas kuvveti-zaman eğrileri, deformasyon biçimleri, gerilme dağılımları ve hasar mekanizmaları detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler, düşük darbe enerjilerinde (12.5 J ve 25 J) kompozit yapının darbe yüklerini başarılı şekilde sönümleyebildiğini ve hasarın büyük oranda matriks içinde sınırlı kaldığını göstermiştir. 50 J ve 75 J enerjilerinde ise, özellikle arka yüzde delaminasyon ve yerel fiber kırılmaları gibi ilerleyici hasar mekanizmalarının aktif hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin sınırlarına ulaştığını ve aramid fiberlerin tok davranışına rağmen yapısal bütünlüğün bozulduğunu göstermektedir.

Sayısal modellemeler, düşük enerji seviyelerinde (12.5 J ve 25 J) deneysel sonuçlarla yüksek uyum sağlamış; tepe kuvveti, temas süresi ve eğri şekli açısından başarılı bir tahmin sağlamıştır. Ancak 50 J ve 75 J seviyelerinde model ile deneysel veriler arasında sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapmaların temelinde, hasar ilerlemesinin karmaşık doğası, ara yüzey etkileri ve katmanlar arası ayrılmaların modellenmesindeki sınırlılıklar yatmaktadır. Yine de, sayısal model tarafından elde edilen Von Mises gerilme dağılımları ve Hashin hasar haritaları, deneysel deformasyon izleri ile genel olarak örtüşmektedir.

Hashin hasar kriterine dayalı analizlerde, özellikle matris çekme ve basma kaynaklı hasarların darbe enerjisine bağlı olarak sistematik şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Fiber çekme hasarının sadece düşük enerjilerde görülmesi, fiber oryantasyonunun darbe doğrultusuna etkisini ortaya koymuştur. Ayrıca, tüm katmanlardan elde edilen hasar indekslerinin üst üste bindirilmesiyle oluşturulan bütüncül hasar haritaları, kompozit yapının global hasar davranışının anlaşılması açısından önemli katkılar sunmuştur.

Benzer şekilde, Atmaca vd. [14] çalışmasında da karbon/aramid hibrit kompozitlerde katman diziliminin darbe davranışı ve ILSS üzerinde belirleyici etkisi olduğu gösterilmiştir. Özellikle karbon merkezli yapıların yüksek yük taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyon performansı sunduğu, mevcut çalışmadaki sayısal analizlerle de doğrulanmıştır. Ancak, bu çalışmanın aksine, bizim çalışmamızda hasar dağılımı katman düzeyinde modellenmiş ve Hashin hasar kriteri ile mekanizmalar ayrıntılı olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, [A3C3]s gibi karbon merkezli yapılarda 8.14 kN tepe kuvveti ve 25.46 J enerji absorpsiyonu değerleri raporlanmışken, bu çalışmada benzer hibrit konfigürasyonda elde edilen sayısal verilerde tepe kuvveti 10 kN seviyelerine kadar ulaşmakta ve darbe enerjisi arttıkça hasar bölgesi daha net biçimde tanımlanabilmektedir. Bu da modelin hem yük taşıma davranışını hem de hasar yayılımını daha detaylı öngörebildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, karbon ve aramid fiberlerin birlikte kullanıldığı hibrit yapı, düşük ve orta seviyedeki darbe enerjilerinde oldukça başarılı bir performans göstermiştir. Yüksek darbe enerjilerinde ise matrisin enerji emme kapasitesi sınırlanmış ve hasar yayılımı hızlanmıştır. Bu durum, ileri seviye uygulamalar için katman dizilimlerinin ve malzeme kombinasyonlarının yeniden optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Sayısal modelleme açısından, mevcut modelin darbe başlangıcını ve düşük-orta seviye hasarları başarıyla temsil ettiği; ancak yüksek enerjili darbe sonrası kompleks hasar ilerlemelerinde geliştirilmiş hasar modellerine ihtiyaç duyduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

[1] Kalaycı, E., Avinç, O., Yavaş, A. 2014. Polibenzimidazol (PBI) lifleri. Tekstil ve Mühendis, 21(96), 52-67.

[2] Crown, E. M., Ackerman, M. Y., Dale, J. D., Tan, Y.-b. 1998. Design and evaluation of thermal protective flightsuits. Part II: instrumented mannequin evaluation. Clothing and Textiles Research Journal, 16(2), 79-87.

[3] Çalıgülü, U., Kejanlı, H., Durmuş, H. Investigation of ballistic performances of composite sheets with hybrid layer. New Horizons in Science (NWSA Academic Journals), YEE Pristine Turkish Culture Center, Kosovo, 129-140.

[4] Onal, L., Adanur, S. 2002. Effect of sequence on the mechanical properties of glass-carbon hybrid composites before and after impact. Journal of Industrial Textiles, 31(4), 255-271.

[5] Priyanka, P., Mali, S. H., Dixit, A. 2023. Karbon-kevlar intraply hybrid fabric polymer composites: mechanical performance. Iranian Polymer Journal, 32(5), 1-14.

[6] Wu, Y., Tang, B., Liu, K., Zeng, X., Lu, J., Zhang, T., Shen, X. 2019. Enhanced flexural properties of aramid fiber/epoxy composites by graphene oxide. Nanotechnology Reviews, 8, 1-9.

[7] Gillespie, J. W. Jr., Gama, B. A., Xiao, R. J. 2007. Progressive damage and delamination in plane weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading. Composite Structure, 78(2), 182-196.

[8] Zhang, Q., Cai, D., Zhang, N., Long, L., Zhou, G. 2024. Experimental and numerical study on the mechanical properties of carbon/aramid intralayer hybrid composites. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 43(11-12), 657-670.

[9] Oruç, R., Polat, Y., Ekici, B. 2021. Mechanical performance of carbon-aramid fiber reinforced laminated composites under impact and shear loading. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering, 22, 19-27.

[10] Hashin, Z., 1980. Failure criteria for unidirectional fiber composites, Journal of Applied Mechanics, 47(2):329–334.

[11] ABAQUS/Explicit (Version 6.14), User's manual, Finite Element Software. Available from http://www.simulia.Com

[12] Yang, L., Yan Y.,, Kuang, N. 2013. Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact, Polymer Testing, 32(7), 1163-1173.

[13] Liu, P.F., Liao, B.B., Jia, L.Y., Peng, X.Q. 2016. Finite element analysis of dynamic progressive failure of carbon fiber composite laminates under low velocity impact, Composite Structures, 149, 408-422.

[14] Atmaca, B.N., Oruç, R., Aşcı, G., Yiğit, K., Yüzer, S., Polat, Y., Ekici, B., 2021. Mechanical performance of carbon-aramid fiber-reinforced laminated composites under impact and shear loading. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering, 22, 19–27.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Metal İşleme Kaynaklı Yüksek Cr^{6+}, Cu^{2+}, Fe^{3+} Yüklü Atıksulardan Sülfidojenik Sabit Yataklı Biyofilmreaktörde Metal Gideriminin İncelenmesi

Senem TEKSOY BAŞARAN*[1], Fatma Seda KUTLAR[2], Erkan ŞAHİNKAYA[1]

*[1] İstanbul Medeniyet Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyomühendislik Bölümü, İSTANBUL
[2] İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı, İSTANBUL

(Alınış / Received: 03.02.2025, Kabul / Accepted: 22.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Sülfat İndirgeyen Bakteri, Aktif Karbon Yataklı Sülfidojenik Biyoreaktör, Ağır Metal Giderimi, Cr^{6+}, Cu

Öz: Bu çalışmada sülfat indirgeyen sabit aktif karbon yataklı bir biyofilmreaktörde (Sİ-AKYB), metal işleme sanayii klişecilik faaliyetlerinden kaynaklanan Cr^{6+}, Cu^{2+} ve Fe^{3+} yüklü atıksu simüle edilerek sistem kararlılığı ve metal giderim performansı araştırılmıştır. 140 gün süren deneysel çalışmada, hidrolik bekletme süresi (HBS) ve ağır metal yükü değişimlerinin biyoreaktör performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Cr^{6+} (100 mg/L'ye kadar) ve Cu^{2+} (300 mg/L'ye kadar) sülfat indirgeme verimi üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmamış, ancak Cu^{2+}'in 500 mg/L ve üzeri konsantrasyonları sülfat indirgeme performansında belirgin bir düşüşe yol açmıştır. HBS'nin 24 saatten 6 saate düşürülmesi, metal giderim verimini düşürmüştür. Fe^{3+} ilavesi başlangıçta olumlu bir etki göstermemekle birlikte, yüksek konsantrasyonlarda sülfür tüketimini artırarak Cr^{6+} ve Cu^{2+} gideriminde azalmaya yol açmıştır. Sonuç olarak, Sİ-AKYB, Cr^{6+} ve Cu^{2+} gibi ağır metallerin gideriminde etkili bir biyolojik arıtım sağlayabilmiştir. Bununla birlikte, optimum pH (≥6), sülfat/KOİ oranı ve HBS'nin dikkatli yönetilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu çalışma, biyolojik ağır metal giderimi için sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır.

Investigation of Metal Removal From High Concentration Cr^{6+}, Cu^{2+}, Fe^{3+} Laden Metal Finishing Wastewaters In A Sulfidogenic Activated Carbon Bed Bioreactor

Keywords
Sulfate Reducing Bacteria, Actiated Carbon Bed Sulfidogenic Bioreactor, Heavy Metal Removal, Cr^{6+}, Cu

Abstract: In this study, the stability and metal removal performance of a Sulfate-Reducing Fixed Active Carbon Bed Biofilmreactor (SR-FACBB) were investigated by simulating wastewater containing Cr^{6+}, Cu^{2+} and Fe^{3+} originating from the metal processing industry and photogravure activities. The effects of varying hydraulic retention time (HRT) and metal loading on reactor performance were evaluated over a 140-day experimental period. The results indicated that Cr^{6+} (up to 100 mg/L) and Cu^{2+} (up to 300 mg/L) did not significantly affect sulfate reduction performance; however, Cu^{2+} concentrations exceeding 500 mg/L caused a notable decrease in sulfate reduction efficiency. The sulfide produced in the process facilitated Cr^{6+} reduction to Cr^{3+} and Cu^{2+} precipitation as CuS. Reducing HRT from 24 hours to 6 hours negatively impacted metal removal efficiency. Fe^{3+} addition initially showed no adverse effects but, at higher concentrations, increased sulfide consumption, leading to reduced Cr^{6+} and Cu^{2+} removal efficiencies. In conclusion, SR-FACBB could achieve effective biological treatment in heavy metal removal. However, optimal pH control (≥6), sulfate/COD ratio, and HRT management are critical for maintaining system performance. This study provides a sustainable and eco-friendly alternative for biological heavy metal removal.

*İlgili Yazar, email: steksoybasaran@gmail.com

1. Giriş

Metal işleme endüstrisi, deri tabaklama, ahşap işleme, madencilik vb. endüstriler yüksek miktarda krom ve diğer ağır metalleri (Cu, Fe) içeren atıksu deşarjları ile sonuçlanan endüstriyel faaliyetler arasında yer almaktadır. Cr^{6+}'nın çevrede taşınımının daha kolay oluşu ve canlılar üzerinde kanserojen ve mutajen etkiye sahip oluşu (Venitt ve Levy, 1974) nedeniyle, öncelikle Cr^{+3} formuna indirgenerek nötral ve bazik koşullarda (pH > 6) çözünürlüğü çok daha düşük olan $Cr(OH)_3$ olarak uzaklaştırılır (Owlad vd., 2009).

Metal işleme endüstrisinde yüksek miktarda sülfürik asit tüketilmesine bağlı olarak atıksularda sülfat konsantrasyonları oldukça yüksektir (Bijmans vd., 2010). Metal yüzeylerden organik ve mineral yağları temizlemek için kullanılan organik solventler de organik madde yükü oluşturmaktadır.

Krom da dahil olmak üzere ağır metal içerikli asidik atıksuların ve metal işleme endüstrisi atıksularının arıtımında, kimyasal arıtma yöntemleri uygulama kolaylığı ve daha kısa bekletme süreleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu amaçla; genellikle Fe^{+2} ve sodyum metabisülfit (SMBS) ile krom indirgeme, yüksek pH'da metallerin çöktürülmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır (Sedlak ve Chan, 1997; Ramakrishnaiah ve Prathima, 2011). Kimyasal metal gideriminde yüksek miktarlarda kimyasal ihtiyacı ve kimyasal çamur oluşumu öne çıkan dezavantajlardır (Marchioretto vd., 2005). Bununla birlikte metal giderimine yönelik biyolojik arıtma yöntemlerine ilişkin başarılı ve ümit verici araştırma sonuçları literatürde yer almaya başlamış olup (Şahinkaya vd., 2007, Şahinkaya vd., 2009; Şahinkaya vd., 2011; Qian vd., 2016, Chang ve Kim, 2007), biyolojik arıtma sistemlerine olan ilgi artmaktadır.

Sülfat indirgeyen bakteriler (SİB) organik maddenin elektron vericisi olarak bulunduğu anaerobik ortamlarda sülfatı sülfüre indirgemektedir (Reaksiyon 1) (Kaksonen ve Puhakka, 2007). Metal işleme endüstrilerinde oluşan atıksular, sülfat konsantrasyonunun yüksek olması nedeniyle SİB biyoprosesi için uygun olup bu reaksiyon sırasında üretilen alkalinite ile düşük pH'ya sahip atıksuyun kimyasal ilavesiz (veya daha az kimyasalla) nötralizayonu mümkün olmaktadır.

$$CH_2O + SO_4^{-2} \rightarrow HS^- + HCO_3^- \quad (1)$$

Kullanılan karbon kaynağının etanol olması halinde, etanolün SİB'lerce asetata (Reaksiyon 2) veya CO_2'e kadar oksitlenmesi (Reaksiyon 3) mümkündür (DeSmul vd., 1997). Etanolün, asetata oksitlenmesi durumunda yani tam oksidasyonun (CO_2'e kadar oksidasyon) gerçekleşmemesi durumunda alkalinite üretilememektedir. Nötralizasyon için ihtiyaç duyulan alkalinitenin üretilmesi için asetatın ortamda birikmeksizin yükseltgenmesi gerekmektedir (Reaksiyon 5) (Liamleam ve Annachhatre, 2007). Bu nedenle verimli bir sülfidojenik proses için biyoreaktöre organik madde ve sülfat yüklemesinin dikkatlice seçilmesi gerektiği anlaşılmıştır (Sahinkaya et al., 2007a, 2007b).

$$SO_4^{-2} + 2C_2H_5OH \rightarrow 2CH_3COO^- + HS^- + H^+ + 2H_2O \quad (2)$$

$$CH_3COO^- + SO_4^{-2} \rightarrow 2HCO_3^- + HS^- \quad (3)$$

Reaksiyon 4 ve Reaksiyon 5'e göre 1 g sülfatın indirgenmesi için 0,67 g KOİ gerektiği ve teorik HS^- üretiminin 0.32 gHS^-/gSO_4 olduğu hesaplanabilir.

Literatürde biyolojik Cr^{6+} giderimi için iki temel yaklaşım görülmektedir. Bu yaklaşımların ilki; organik madde varlığında anaerobik ortamda, SİB tarafından sülfatın biyolojik olarak indirgenmesi ile oluşan sülfürün Cr^{6+}'yı Cr^{+3}'e indirgemesi ve oluşan Cr^{3+}'ün de $Cr(OH)_3$ olarak çöktürülmesi yoluyla (Reaksiyon 4 ve Reaksiyon 5) (Kim vd., 2001) gerçekleşmektedir.

$$2CrO_4^{2-} + 3H_2S + 4H^+ \rightarrow 2Cr(OH)_3\,(k) + 3S\,(k) + 2H_2O \quad (4)$$

$$8CrO_4^{2-} + 3H_2S + 10H^+ + 4H_2O \rightarrow 8Cr(OH)_3\,(k) + 3SO_4^{2-} \quad (5)$$

Buna göre, sülfürün sülfata oksitlenmesi durumunda g Cr^{6+} başına 0.24 g HS^-, sülfürün kükürte oksitlenmesi durumunda ise g Cr^{6+} başına 0.95 g HS- ihtiyacı olmaktadır.

Anaerobik ortamda biyolojik olarak üretilen sülfürün Cr^{6+}'yı Cr^{+3}'e indirgediği farklı biyoreaktörlerin test edildiği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Şahinkaya vd., 2012a; Şahinkaya vd., 2012b, Cırık vd., 2013; Qian vd., 2016). Bir diğer yaklaşım ise Cr^{6+}'yı elektron alıcısı olarak kullanan SİB grubuna ait *Desulfovibrio* benzeri bakterilerce ve kromat-indirgeyen bakterilerce (sitokromları vasıtası ile) Cr^{6+}'yı'nın doğrudan Cr^{+3}'e indirgenmesidir (Reaksiyon

6) (Arias ve Tebo, 2003). CrO_4^{2-}'nin SO_4^{-2}'ye benzer kimyasal yapılarına dikkat çekilerek benzer biyoaktiviteye sahip olabilecekleri düşünülmüştür.

$3CH_2O + 4CrO_4^{2-} + 7H_2O \rightarrow 4Cr(OH)_3\,(k) + 5OH^- + 3HCO_3^-$ (6)

SİB ile yürütülen biyoproseslerin en yaygın çalışıldığı atıksular, yüksek miktarlarda ağır metal (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Fe, As) varlığı ve düşük pH ile karakterize edilen asidik maden sızıntı suları olmuştur (Kaksonen vd., 2003). SİB ile anaerobik ortamda organik madde varlığında sülfür üretilmiş ve ağır metaller sülfür ile tepkimeye girerek çözünürlüğü çok sınırlı metal sülfür kompleksleri oluşturarak çözeltiden uzaklaştırılmıştır (Reaksiyon 7) (Kaksonen ve Puhakka, 2007).

$H_2S + M^{2+} \rightarrow MS(k) + 2H^+$ (7)

Burada M^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+}, veya Fe^{2+} gibi metalleri temsil etmektedir. Cu^{2+}'nın HS^- ile CuS olarak çöktürülmesi için stokiyometrik olarak 0,52 $mgHS^-/mgCu^{2+}$ kadar HS^- ihtiyacı olacağı hesaplanmıştır (Reaksiyon 8).

$Cu^{2+} + HS^- \rightarrow CuS + H^+$ (8)

Genel olarak Cr^{3+}'nın pH 5,5-11 arasında immobilize olduğu düşünülürken, hidrojen-tabanlı bir biyofilm membran reaktörde çözünmüş Cr^{6+}'nın giderimi çalışılırken, Cr^{3+}'nın pH 7 civarında çökmeye başladığı ve pH 7,5-9,0 arasında en yüksek seviyeye geldiği raporlanmıştır (Chung vd., 2006). CuS çöktürülmesi süreci pH'ya sıkı şekilde bağlıdır; pH 6–8 aralığında CuS tercih edilen çökelti olurken, pH > 8,5 seviyelerinde $Cu(OH)_2$ çökelmesi baskın hale gelmektedir (Young vd., 2003). CuS'nin son derece düşük çözünürlüğe ($K_{sp} \approx 10^{-36}$) sahip olması nedeniyle, yeterli HS^- varlığı ve pH'nın optimal aralıkta kontrol edilmesi koşuluyla etkili bir şekilde bakır giderimini sağlanabilir. pH'nın 4,0'ün altına inmesi ile CuS çözünürlüğü artmakta ve H_2S'in gaz fazına kaybedilmesi söz konusu olmaktadır.

Literatürde, farklı reaktör konfigürasyonlarında, gerçek ve sentetik asidik maden sızıntı suları ile yürütülen çalışmalarda oldukça yüksek ağır metal giderim verimleri raporlanmıştır (Kaksonen ve Puhakka, 2007; Şahinkaya vd., 2011; Şahinkaya vd., 2013; Altun vd., 2014). Ağır metallerin sülfür ile çöktürülmesi sonucu oluşan çamur hacimce, metal-hidroksit çamuruna kıyasla çok daha düşüktür. Ayrıca, metal-sülfür çamuru daha kolay susuzlaştırılabilir ve çok daha stabil bir çamurdur (Huisman et al., 2006). Metal-sülfür kompleksi ile çöktürme yaklaşımı ilave bir adımda metal geri-kazanımına da olanak sağlamaktadır (Şahinkaya vd., 2009).

Literatürde raporlanan çalışmalar yüksek miktarda sülfat, Cr^{6+}, Cu^{2+} gibi ağır metaller ve organik madde içeren metal işleme endüstrisi atıksularının sülfidojenik arıtım için oldukça uygun olduğunu işaret etmiştir. Örneğin Şahinkaya vd. (2012) elementer kükürt indirgeyen dolgu yataklı bir biyoreaktörde giriş Cr^{6+} konsantrasyonu 0-50 mg/L ve hidrolik bekletme süresi 0,36-1,0 gün olacak şekilde çalıştırdığı sistemde, her koşulda Cr^{6+} ve toplam Cr giderimlerinin, sırasıyla, %97 ve %85'in üzerinde kaldığını göstermiştir.

Cr^{6+}'nın 25 mg/L üzeri konsantrasyonlarda SİB üzerinde toksik etkisi gösterilmekle birlikte (Marsh vd., 2000), Yukarı akışlı çamur yataklı biyoreaktörde 50 mg/L'a kadar (Qian vd., 2016), sabit yataklı biyorektöre (Şahinkaya vd., 2012) ise 150 mg/L'ye kadar Cr^{6+} konsantrasyonlarında bile sülfidojenik aktivitenin devam ettiği gösterilmiştir. Ayrıca Cr^{6+}'ya bağlı inhibisyonun saf kültürlerde karışık kültürlere oranla daha etkin olabildiği raporlanmıştır (Lowe vd., 2003). Song vd. (1998) 130 mg/L Cr^{6+} konsantrasyonunun SİB aktivitesini yalnızca %15 kadar inhibe ettiğini raporlamıştır.

Loreto vd. (2021) anaerobik çamur (0.67 g COD/g SO_4^{2-} oranı) kullanarak 0-50 mg/L Cu^{2+} konsantrasyonlarını test ettikleri toksisite deneylerinde, 20 mg/L Cu^{2+} konsantrasyon değerinde sülfat gideriminin durduğunu, glikoz oksidasyonunun ise %95 azaldığını raporlamıştır. Garcia vd. (2001), İspanya'daki Pirit Kuşağı'nda bulunan bir piritik atık havuzunun dibinden izole edilen karışık SİB popülasyonu ile aynı depolama sahasında oluşan asidik maden drenajı (AMD) sularının arıtımı çalışmış ve SİB'lerin, ortam aşırı asidik olmadığı sürece (pH>4), 9.000 mg/L'ye kadar sülfatı ve 100 mg/L'ye kadar Cu^{2+}'yu etkili bir şekilde giderebildiklerini raporlamıştır. Albuquerque vd. (2013), 150 mg/L eşit konsantrasyonlarda Ni^{2+}, Zn^{2+} ve Cu^{2+} yüklenen yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik biyoreaktörde, sülfat indirgemenin etkilenmediğini ve metal giderim verimlerinin diğer metaller için %99,5 Cu^{2+} için de %99.8 olduğunu raporlamıştır.

Yüksek ağır metal yüklerini tolere etme konusunda sabit ve akışkan yataklı biyoreaktör konfigürasyonun diğer biyoreaktörlere kıyasla daha üstün olabildikleri literatürde gösterilmiştir (Şahinkaya vd., 2012, Özkaya vd., 2019). Sabit Yataklı Reaktörlerde, biyofilm, taşıyıcı ortam üzerinde gelişmekte, çöken MeS çamuru periyodik

çamur çekimi ile uzaklaştırılmaktadır. Akışkan Yataklı Reaktörlerde taşıyıcı ortam sürekli hareket halinde olup; çamur birikimi sınırlıdır. Yoğunluğu yüksek MeS partikülleri, taşıyıcı partiküllerden daha hızlı çökerek reaktörün alt kısımdan ayrılabilmektedir. Çamur, reaktör çıkışından önce yerleştirilen çöktürme tankı veya lamella ayırıcılarla toplanabilmekte; çıkış hattında yer alan ikincil çökelme veya filtrasyon sistemleriyle ayrılabilmektedir.

Sabit ve akışkan yataklı biyoreaktörler, yalnızca metal iyonlarının çözeltiden uzaklaştırılmasında değil, aynı zamanda oluşan metal-sülfür (MeS) çamurunun verimli şekilde ayrılmasında da avantaj sağlamaktadır. Bu reaktör konfigürasyonlarında oluşan MeS çökeltisi, yüksek yoğunluklu ve konsantre formda biriktiğinden, kolayca ayrılabilmekte ve daha düşük hacimde atık üretimi sağlanmaktadır. Ayrıca, çökelen metal sülfürlerin (örneğin CuS, ZnS) ekonomik değeri yüksek olduğundan, bu sistemler metal geri kazanımı açısından da sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Böylece hem çevresel yük azaltılmakta hem de değerli metallerin yeniden kullanımı mümkün hale gelmektedir (Kaksonen & Puhakka, 2007; Gadd, 2010).

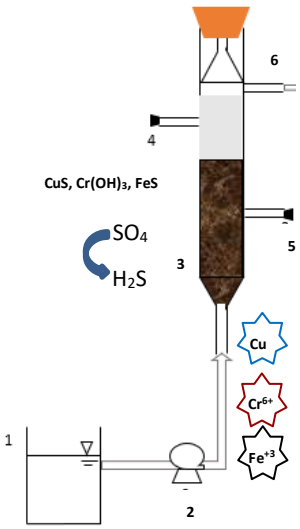
Bu bağlamda, bu çalışmada, SİB ile zenginleştirilmiş anaerobik koşullarda işletilen yukarı akışlı ve sabit aktif karbon yataklı bir biyoreaktörde farklı hidrolik bekletme sürelerinde (HBS) (24 – 6 saat), oldukça yüksek konsantrasyonlara varan Cr^{6+} (150 mg/L), Cu^{2+} (570 mg/L) ve Fe^{3+} (10-115 mg/L) yüklü atıksulardan metal giderimi ve nötralizasyon performansı incelenmiştir. Çalışmada kullanılan sentetik atıksudaki ağır metaller, metal konsantrasyonları ve pH değeri, İstanbul ilinde metal kaplama ve metal işleme sanayi kapsamında faaliyet gösteren bir klişecilik tesisinden alınan atıksu numunelerinde yapılan analizler dikkate alınarak ve olası en yüksek yükler de dahil sistemin dayanıklılığını test edebilmek üzere seçilmiştir.

Bu kapsamda, atıksuda bu kadar yüksek konsantrasyonlarda ve karışık halde bulunun ağır metallerin aktif karbon sabit yataklı sülfidojenik bir reaktörde giderimine yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın bu anlamda literatüre ve bu alandaki uygulamalara yeni bir boyut kazandırması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sülfat-İndirgeyen Sabit Aktif Karbon Yataklı Biyoreaktör (Sİ-AKYB)

Bu çalışmada, daha önce Teksoy Başaran ve diğ. (2021) tarafından Cr^{6+} (100 mg/L) giderimine yönelik test edilen laboratuvar ölçekli, yukarı-akışlı ve sabit granül aktif karbon (GAK) (1 mm) yataklı cam kolon biyoreaktör sistemi kullanılmıştır (Şekil 1). Cam kolon biyoreaktörde (Y: 50 cm, Ç: 6.6 cm) toplam su hacmi 750 mL olup, yatak hacmi yaklaşık 500 mL'dir. SİB'in biyofilm oluşturabilmesi için kullanılan GAK, ilk çalışmadaki işletme öncesinde üzerindeki safsızlık ve kalıntı metallerin giderimi için, önce saf su, sonra HCl çözeltisi (pH 2) ile yıkanmış ve saf su ile durulanmıştır. Bu çalışmada da aynı biyofilm adaptasyonu korunarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Metal ilaveli sentetik atıksular, besleme tankından reaktöre peristaltik besleme pompası (Seco, PR7) ile reaktörün tabanından verilmiş, arıtılmış çıkış suları üst porttan cazibe ile sistemden uzaklaşarak arıtılmış su tankında toplanmıştır. HBS besleme pompasının debisi ile ayarlanmıştır.



Şekil 1. Lab ölçekli Sülfat-İndirgeyen Sabit Aktif Karbon Yataklı Biyoreaktör (Sİ-AKYB) Sistemi (1. Atıksu besleme tankı, 2. Atıksu besleme pompası, 3. Sabit sülfat indirgeyen aktif karbon yataklı biyoreaktör, 4., 5. Numune alma portları, 6. Biyoreaktör çıkışı)

2.2. İşletme Koşulları ve Atıksu Kompozisyonları

Organik madde olarak 2.000 mg KOİ/L etanol içerikli sentetik atıksuya öncelikle sadece Cr^{6+} ilave edilerek reaktöre beslenmiş, daha sonra da sırası ile Cu ve Fe^{3+} ilave edilerek nihai kompozisyonda reaktöre beslenmiştir. Çalışmada dikkate alınan klişecilik tesisi atıksu karakterizasyonu Tablo 1'de sunulmuştur. Cr^{6+} ve Cu konsantrasyonları gerçek atıksudaki değerler de dikkate alınarak üst sınırlarda test edebilmek üzere seçilmiştir. Gerçek atıksuyun pH değeri 1,2 – 2,5 arasında olması nedeniyle Fe^{3+} konsantrasyonları oldukça yüksek ölçülmekle birlikte, biyolojik sisteme bu pH'da bir atıksu beslenemeyeceği için, gerçek atıksuyun pH'sı 4'e getirilerek Fe ölçümleri tekrar edilmiştir. Hazırlanan metalli sentetik besin çözeltisindeki Fe^{3+} konsantrasyonu da pH 4'de gözlenen seviyeye yakın tutularak ve ilave Fe^{3+} etkisini gözlemlemek üzere 35 - 110 mg/L arasında tutulmuştur.

Tablo 1. Klişecilik atıksuları: Ham atıksu ve pH 4'te ön-çöktürme uygulanmış atıksu

Parametre (mg/L)	**Ham atıksu**	**pH 4'te ön-çöktürülmüş atıksu**
Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı (T-KOİ)	3.000 – 3.500	2.750
Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı (Ç-KOİ)	2.000-2.500	2.000-2.500
pH	1,2-2,5	3,97-4
Sülfat	3.000-4.000	1.300-1.500
T-Cr	108	108
Cr^{6+}	103	103
T-Fe	500-1.500	6
Fe^{3+}	500-1.500	5
Fe^{2+}	10	0,3
T-Cu	870-1.000	870-1.000

Bu çalışmadan önce yürütülen bir çalışmada aynı biyofilm reaktörde sülfat ve etanol içeren sentetik atıksu ile SİB zenginleştirmesi yapılmış; ve 100 mg/L'ye kadar Cr^{6+} ilavesi ile 20°C'de ve 24 saatlik hidrolik bekletme süresinde 126 gün boyunca test edilmiştir. Hem Cr^{6+} ilave edilmeyen hem de 100 mg/L Cr^{6+} ilave edilen dönemlerde oldukça yüksek sülfidogenik performans elde edilmiştir. Başlangıçta sülfat indirgeme ve karbon oksidasyon verimleri sırasıyla %99 ve %93 olarak ölçülmüş, pH 4.0'da 100 mg/L Cr^{6+} ilavesi sonrası her iki performansta yalnızca %3'lük bir düşüş gözlemlenmiştir. İlk test döneminde alkalinite oluşumu, teorik olarak beklenen değerin %99'una ulaşmış ve çıkış pH'sı 6.7'den 8.2'ye yükselmiştir. Cr^{6+} eklenen dönemde ise ortalama alkalinite konsantrasyonu 2.316 mg$CaCO_3$/L olarak kaydedilmiş ve biyolojik olarak üretilen HS^-'in Cr^{6+} indirgemesi nedeniyle ek asit tüketimi ile pH 4.0'dan 8.2'ye yükselmiştir. Çıkış suyundaki Cr^{6+} konsantrasyonu 0.5 mg/L'nin altında kalmış (ortalama 0.13 mg/L), toplam krom konsantrasyonu ise ≤0.2 mg/L olarak belirlenmiştir.

Mevcut çalışmada ise aynı Sİ-AKYB'de Tablo 2'de sunulan farklı işletme koşulları ve atıksu kompozisyonları test edilmeye devam edilmiştir. Bu nedenle başarılı bir SİB adaptasyonu ve biyofilm oluşumu elde edildiği çıkarımı bir önceki çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak yapılmıştır. Mevcut çalışmada uygulanan işletme koşulları Tablo 2'de gösterilmiştir. Buna göre bir önceki çalışmada Cr^{6+} 100 mg/L ilavesi ile 2 ay kadar işletilen sisteme, kademeli olarak artan konsantrasyonlarda Cr^{6+} (100-150 mg/L), Cu^{+2} (150-570 mg/L) ve Fe^{+3} (35-100 mg/L) eklenerek sülfat indirgeme performansı ve metal giderim verimi izlenmiştir. Fe^{3+} ilaveli periyotlarda giriş atıksuyunda pH 3,5'a ayarlanmıştır. Sistem Cr^{+6} ve Cu^{2+} için sırasıyla için 600 mg/L.gün ve 2280 mg/L.gün'e varan yüklerde test edilmiştir. Yüksek metal konsantrasyonlarında işletilen sistemde ayrıca HBS'nin etkisi de 24 saatten kademeli olarak 6 saate kadar indirilerek incelenmiştir. Sistem toplamda 140 gün kadar işletilmiştir.

Tablo 2. Sİ-AKYB'de uygulanan işletme koşulları ve atıksu kompozisyonları

İşletme periyodu	**Günler**	**Gün sayısı**	**HBS (saat)**	**Sülfat (mg/L)**	**KOİ* (mg/L)**	**pH**	**Cr^{6+} (mg/L)**	**Cu^{2+} (mg/L)**	**Fe^{3+} (mg/L)**
I	1-6	6	24	2.500	2.000	4,0	100	150	
	7-14	8	24	2.500	2.000	4,0	100	300	
	15-46	31	24	2.500	2.000	4,0	100	520	
II	*47-70*	*23*	*24*	*2.000*	*2.000*	*7,0*			

III	71-72	2	24	2.000	2.000	3,5	50	170	35
	73-74	2	24	2.000	2.000	3,5	75	250	70
	75-99	25	24	5.000	5.000	3,5	150	570	110
IV	100-105	6	18	5.000	5.000	3,5	150	500	110
	106-126	21	12	5.000	5.000	3,5	100	500	110
	127-140	14	6	5.000	5.000	3,5	100	510	110

*KOİ: Kimyasal Oksijen İhtiyacı

Tüm deneysel çalışmalar ortalama 21.3 ^oC sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Giriş sülfat ve KOİ konsantrasyon oranları P-I dönemi hariç (P-I'de SO_4/KOİ oranı 1,25 uygulanmıştır) 1,0'de tutulacak şekilde HBS'nin 24 saat olduğu dönemlerde 2.000 mg/L, devamındaki HBS'nin düşürüldüğü ve metal yükünün artırıldığı dönemde de 5.000 mg/L olarak uygulanmıştır. Reaktör girişinde istenilen KOİ değerlerine ulaşmak amacıyla etanol sentetik atıksuya ilave edilmiştir. Sentetik atıksu, etanol (2.000-5.000 mg/L), yeast ekstratı (50 mg/L), $MgSO_4.7H_2O$ (2.562 mg/L), Na_2SO_4 (1.479 mg/L), KH_2PO_4 (56 mg/L) ve NH_4Cl (110 mg/L) bileşenlerinden hazırlanmıştır. İstenen ağır metal konsantrasyonlarını elde etmek üzere kullanılan metalli bileşikler $K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4.7H_2O$ ve $FeCl_3$'tür. Girişte istenen sülfat ve KOİ konsantrasyonu metal ilavesi de dikkate alınarak ayarlanmıştır.

2.3. Analitik Yöntemler

Deneysel çalışma boyunca KOİ konsantrasyonu ölçümleri Mikrosindirim/ Titrasyon yöntemi ile (APHA Yöntem No. 5222-D, 2005), Sülfat konsantrasyonu $BaCl_2$ ile bulanıklaştırma yöntemi ile (APHA Yöntem No. 4500-SO_4^{2-}, A2005), toplam sülfür (T-S) (H_2S, HS^-, S^{-2}) Cord-Ruwisch (1985) yöntemine göre spektofotometre ile ölçülmüştür. Metal ölçümlerinde, toplam Bakır ve toplam Krom AAS (Atomik Absorpsiyon Spektrometrisi), Toplam Demir ICP (Endüktif Eşleşmiş Plazma), Fe^{+2} fenantrolin ile renklendirme yöntemi (APHA Yöntem No. 3500-Fe B, 2005), Cr^{6+} difenil karbazid ile spektrofotometrik yöntem (EPA Yöntem No. 7196A, 1992) kullanılarak ölçülmüştür. Tüm ölçümler en az iki tekrarlı yapılmıştır. Uçucu yağ asitleri (UYA) ölçümleri numunenin pH 5'ten pH 4'e asit ile titrasyonunda harcanan asidin UYA miktarı ile orantılı kabul edildiği Buchauer (1998)'e göre yapılmıştır. Alkalinite HCl titrasyon yöntemi ile (APHA Yöntem No. 2320-A, 2005) belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde, çözünmüş sülfat, sülfür, Cr^{6+} ve KOİ analizlerinden önce numuneler 0,45 µm PVDF filtreden geçirilmiştir. KOİ analizlerinden önce ise numunelere H_2SO_4 ilave edilerek pH 2'nin altında olacak şekilde yaklaşık 5 dakika N_2 geçirilerek H_2S uzaklaştırılmıştır. Toplam metal konsantrasyonu analizleri öncesinde metal çökeleklerini çözünmüş forma getirmek üzere H_2SO_4 ilavesi ile pH 1'e getirilerek 0,45 µm membran filtreden geçirilmiştir. Yukarıdaki analizlere ilave olarak, anaerobik ve aerobik reaktörlerde pH takibi için portatif pHmetre (HACH HQ40d) kullanılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Sülfidojenik performans

İlk periyotta sistemde üretilmesi beklenen teorik HS- konsantrasyonu 800 mg/L (2.500 mgSO_4/L x 0,32 mgHS^-/mgSO_4) olarak hesaplanmıştır. Çalışmada test edilen en yüksek metal yükleri dikkate alındığında, ihtiyaç duyulan HS- konsantrasyonu, Cr^{6+}'nın Cr^{3+}'ya indirgenerek $Cr(OH)_3$ olarak, Cu^{2+}'nın ise CuS olarak çözeltiden uzaklaştırılması için sırasıyla 36 mg/L ve 260 mg/L olarak hesaplanmıştır, dolayısıyla teorik HS- üretimi, metal giderimine yönelik stokiyometrik ihtiyacın çok üzerindedir. Bununla beraber, çalışmada kullanılan aktif karbon yatak boyunca biyofilm halinde çoğalan SİB'in, literatürde farklı biyoreaktör konfigürasyonlarında raporlanan toksik eşik değerlerden (Cr^{6+} > 130 mg, Cu^{2+}> 100 mg/L) çok daha yüksek değerleri tolere edebileceği düşünülerek ve gerçek atıksu örneği de dikkate alınarak, Cr^{6+} için 100 mg/L ve Cu^{2+} için ise 150, 300 ve 500 mg/L metal konsantrasyonları test edilmiştir.

Sİ-AKYB'de, 4 ana işletme periyodu süresince sülfat indirgeme performansı, sülfat, sülfür (Şekil 2) ve KOİ konsantrasyonları (Şekil 3), pH, alkalinite ve UYA konsantrasyonları (Şekil 3.3) üzerinden izlenmiştir. P-I'de SO_4/KOİ oranı 1,25 uygulanmış ve kademeli olarak artan konsantrasyonlarda Cr^{6+} (150 mg/L'ye kadar), Cu^{+2} (520 mg/L'ye kadar) yüklenmesi sırasında sistem performansı düşmüş ve 14. günden itibaren çıkışta sülfat konsantrasyonu artmaya başlanmış, ayrıca çıkış HS^- konsantrasyonu 46. günde 60 mg/L'ye kadar inmiştir. Bu dönemde KOİ giderim verimi %94'ten %50'lere kadar gerilemiş, UYA konsantrasyonları 2.000 mg/L'ye kadar yükselmiştir. SİB'ler, organik maddeyi CO_2'e kadar tamamıyla oksitleyebilen tam oksitleyici SİB'ler veya organik maddeyi kısmen parçalayan eksik oksitletiyici SİB'ler olarak ikiye ayrılmaktadır (Muyzer ve Stams, 2008). Sülfat

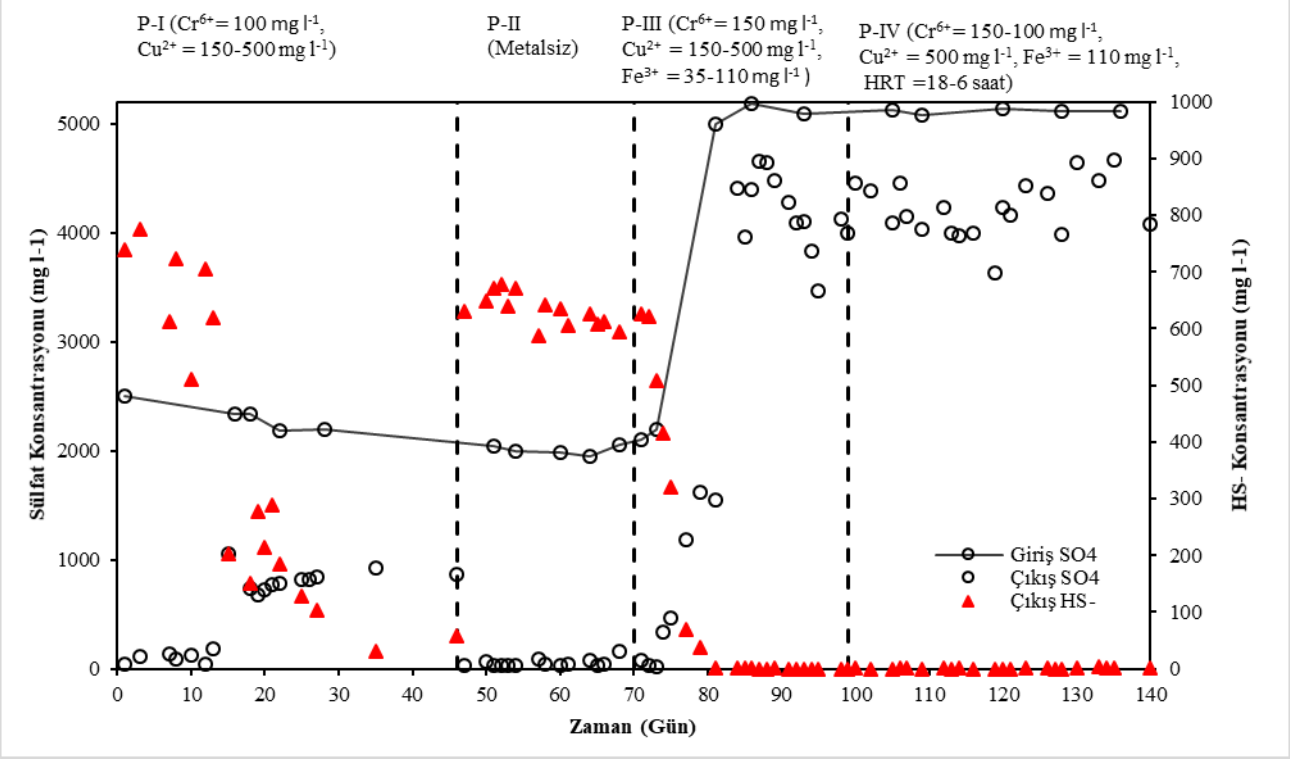
indirgeyen proseste UYA birikimi organik maddeyi CO_2'ye kadar oksitleyebilen SİB'lerin faaliyetinin ortamdaki toksik etkilerden daha fazla etkilendiğine işaret etmiştir. Literatürde, çevresel faktörlerin bu bakteri türlerinin popülasyon dinamiklerini ve substrat kullanımını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Özellikle, eksik oksitleyici SRB, laktat ve etanol gibi substratların varlığında daha yüksek bir spesifik büyüme oranına sahip olma eğilimindedir (Detmer vd., 2001).

Alkalinite 500 mg$CaCO_3$/L'ye kadar gerilemiş, pH değeri ortalama 7,4'te tutulabilmiştir (Şekil 4). Bununla beraber, bu periyot boyunca T-Cr ve T-Cu giderimlerinin %99,6'nın üzerinde seyretmesi, literatürde raporlanan değerlerden çok daha yüksek metal konsantrasyonlarının sistemde tolere edilebileceğini göstermiştir.

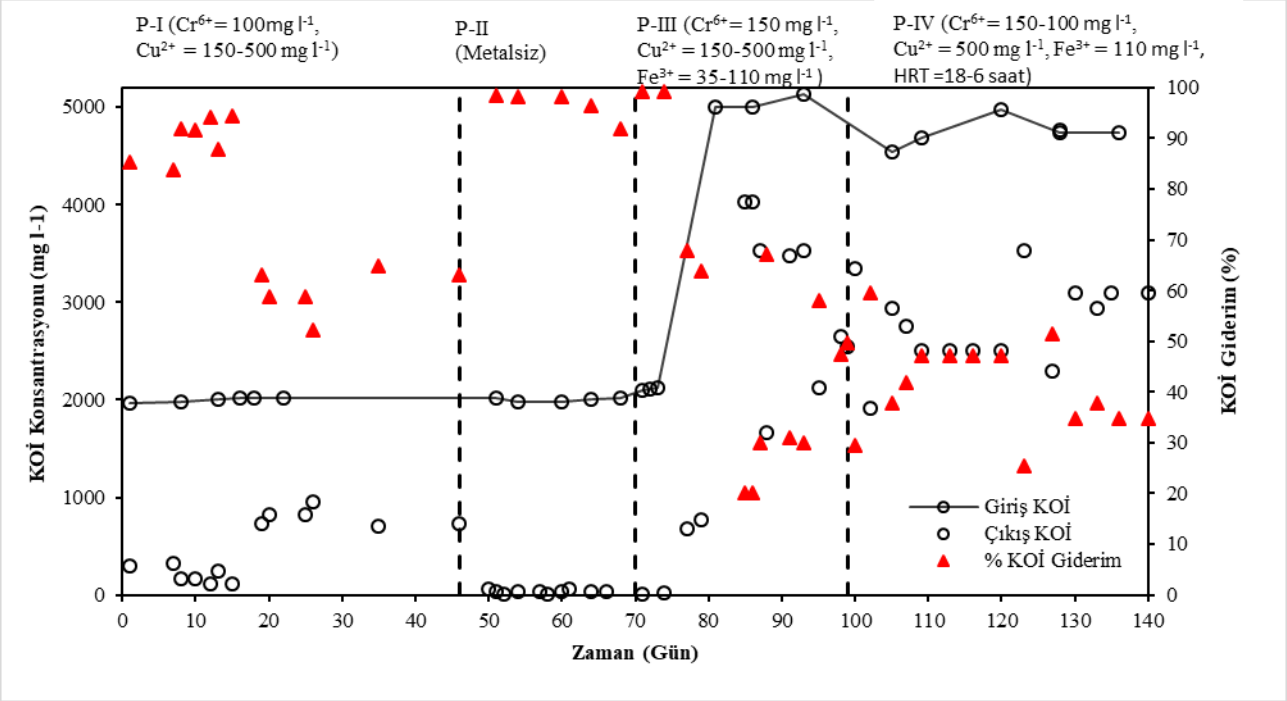
P-I'i takip eden 23 gün boyunca reaktöre metal beslenmeyerek SİB aktivitesinin iyileşmesi beklenmiştir. Bu dönemde HS^- üretimi ortalama 632 mg/L seviyesine yükselmiş ve bu dönemde reaktöre beslenen ortalama 2.000 mg/L sülfatın indirgenmesi ile stokiyometrik HS^- konsantrasyon değeri olan 680 mg/L'nin (2.000 x 0.34 gHS^-/gSO_4) %95'ini bulmuştur. KOİ giderim verimi ortalama %97 olmuştur.

P-III'te yeniden artan metal konsantrasyonları eklenmiş, Cr^{6+} ve Cu^{2+}'ya ilave olarak Fe^{3+} varlığının etkisi izlenmiştir. Bu dönemde, 76. günden itibaren metal yükleri, Cr^{6+} ve Cu^{+2} için sırasıyla, 150 ve 570 mg/L'ye ulaşması ile sülfat indirgeme performansında bozulma başlamıştır. Bu dönemde sülfat indirgenmesinin inhibe olduğu anlaşılmış, fakat sistem üst limitlerde test edilmeye devam edilmek istenmiştir. Burada 110 mg/L'ye kadar Fe^{3+} ilavesi ile metal inhibisyonunun azaltılabilmesinin mümkün olup olmayacağı anlaşılmak istenmiştir. Yine SİB aktivitesini iyileştirmesi amacıyla girişteki sülfat ve KOİ konsantrasyonu 5.000 mg/L'ye çıkartılmıştır. Bu sırada 81. günden itibaren çıkışta HS^- konsantrasyonları sıfıra inmiş, KOİ giderim verimi ortalama %44 olup %20'ye kadar gerilemiştir. 84. gün itibarıyla çıkışta sülfat konsantrasyonu ortalama 4.200 mg/L olmuştur. Metal yüklemesinin artması ile birlikte alkalinitede de sık sık düşüşler yaşanmış ve 79. günden itibaren ortalama 5 günde bir biyoreaktöre 2.000 mg $CaCO_3$/L alkalinite ilavesi yapılmıştır. Buna rağmen pH ortalama 5,7'de tutulabilmiştir. PIII boyunca UYA konsantrasyonu ortalama 125 mg/L olmuştur.

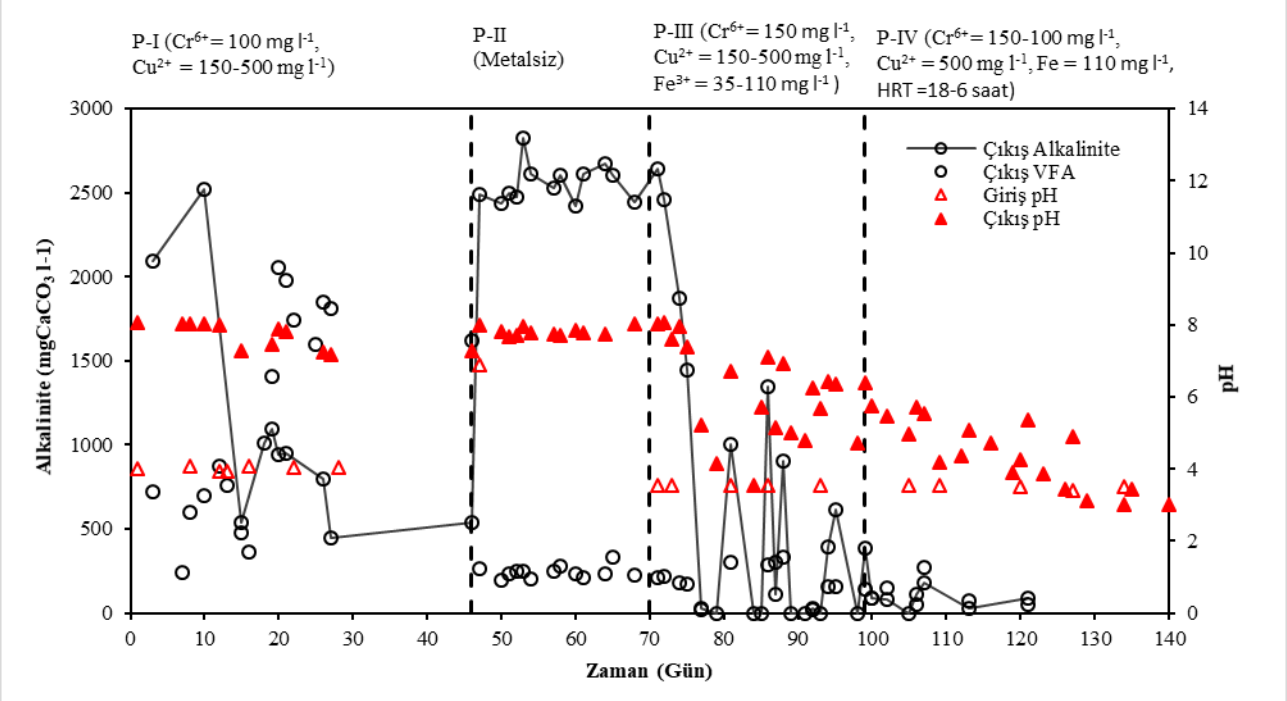
P-IV'te ise inhibisyon etkisini azaltmak amacıyla Cr^{6+} yükü azaltılıp (100 mg/L) diğer metal yükleri sabit tutularak HBS etkisi araştırılmıştır. Bu dönem boyunca çıkış HS- konsantrasyonu < 1 mg/L olmuş, sülfat konsantrasyonu ortalama 4.200 mg/L ve KOİ giderimi ise ortalama %40 olmuştur. pH ise HBS'nin kademeli olarak 18, 12 ve 6 saate düşürüldüğü dönemlerde sırasıyla ortalama 5,4, 4,6 ve 3,5'e gerilemiştir. Sülfat indirgenme prosesinin bu periyotta sınırlı olması nedeniyle, ağır metal toksisitesine ilave olarak yüksek etanol konsantrasyonunun da SİB'leri olumsuz etkilemiş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 2. Si-AKYB'de izlenen sülfat, HS^- konsantrasyon profilleri



Şekil 3. Si-AKYB'de izlenen KOİ konsantrasyon profilleri

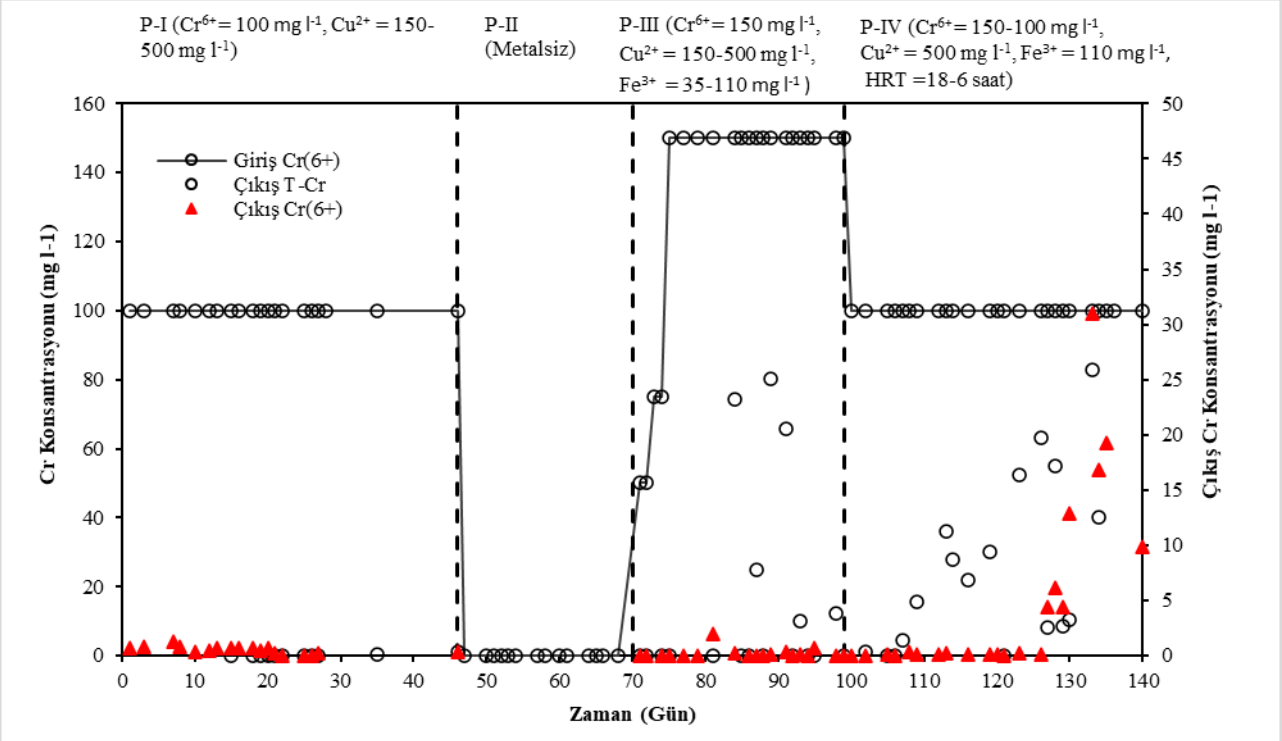


Şekil 4. Si-AKYB'de izlenen pH, alkalinite ve VFA konsantrasyon profilleri

3.1. Metal Giderim Performansı

3.1.1. Cr^{6+} giderimi

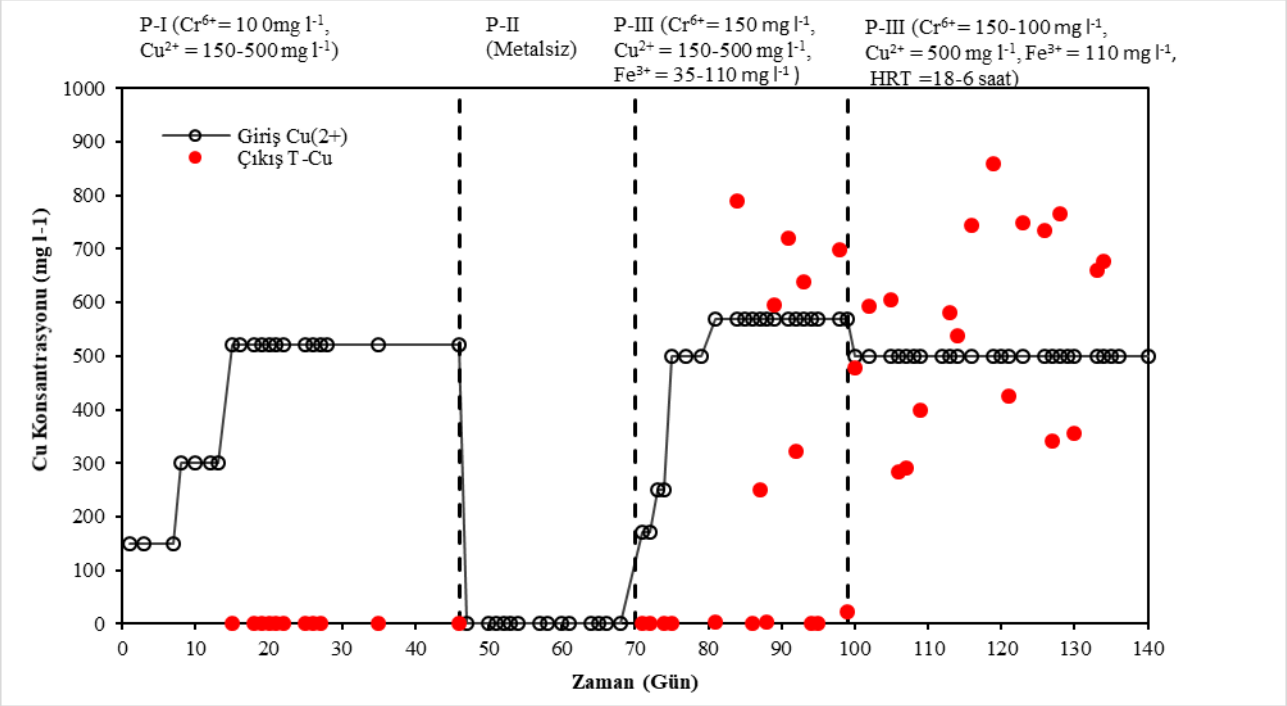
HBS'nin 6 saate düşürüldüğü dönem haricinde tüm işletme koşullarında çıkışta Cr^{6+} konsantrasyonu 1,4 mg/L'nin (0,25 ± 0,35 mg/L) altında kalmıştır (Şekil 5). HBS'nin 6 saate düşürülmesi ile birlikte çıkışta 30 mg/L'ye kadar yükselmiştir. Buna paralel olarak toplam Cr giderim veriminin de metal yüklemesinin artırıldığı işletimde pH değerinin 6'nın altında kaldığı zamanlar gerilediği ve çıkışta toplam Cr'nin 82 mg/L'ye kadar yükselebildiği gözlenmiştir.



Şekil 5. Si-AKYB'de Cr^{6+} ve Toplam Cr konsantrasyon profilleri

3.1.2. Cu^{2+} Giderimi

Cu giderimi, Giriş Cu^{2+} konsantrasyonunun 570 mg/L'ye çıkarıldığı döneme kadar oldukça yüksek verimlilikte seyretmiştir. Bu dönemde çıkışta T-Cu konsantrasyonu 0,02 mg/L'nin altında (0,0055 ± 0,0064 mg/L) ölçülmüştür (Şekil 6). 84. günden itibaren hem ortamdaki HS- konsantrasyonunun sıfır olması hem de pH'nın düşmesi ile birlikte çıkış Cu konsantrasyonları artmaya başlamış, bir süre pH 6,35'in üzerinde kaldığı zamanlarda 3 mg/L'nin altında ölçülmüş fakat geri kalan zamanlarda reaktör içinde birikim de göstererek giriş konsantrasyonlarının da üzerinde çıkmıştır.



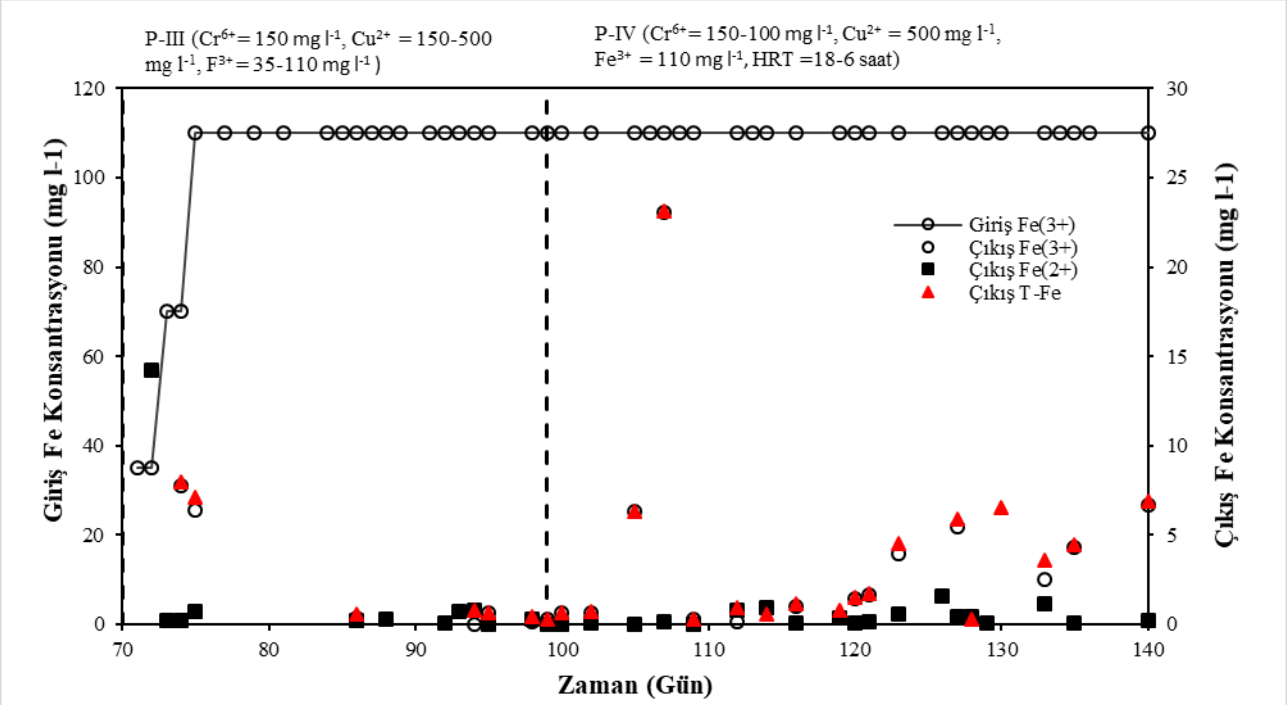
Şekil 6. Si-AKYB'de Cu konsantrasyon profilleri

pH'nın düşmesi ile birlikte (pH< 6) reaktör çıkışında T-Cu konsantrasyonlarının yükselmesi hatta giriş konsantrasyonlarının da üzerine çıkarak 720 mg/L'ye varması; (i) yüksek konsantrasyonda ağır metal ilavesinden kaynaklı inhibisyonun etkisiyle ve düşük pH nedeniyle üretilen HS^-'in daha büyük miktarlarda gaz fazına kaybedilmesi nedeniyle reaktörde yeterli sülfür bulunamaması sonucu bakırın CuS olarak çöktürülememesini ve bir kısım Cu'nun reaktör içi pH 7-8 civarında olduğu daha önceki işletme dönemlerinde $Cu(OH)_2$ olarak çöküp daha sonra düşük pH'da yeniden çözünmüş forma geçmiş olmasını düşündürmüştür.

3.1.3. Fe^{+3} ilavesinin etkisi

Sİ-AKYB'ye 70. günden itibaren, Cr^{6+} ve Cu^{2+}'ya ek olarak artan konsantrasyonda 110 mg/L'ye kadar Fe^{+3} ilave edilmesi ile HBS'nin 24 saat olduğu dönemde çıkışta toplam Fe ve Fe^{+3} konsantrasyonlarının hemen hemen eşit olduğu görülmüş ve çıkışta toplam Fe konsantrasyonu 0,6 mg/L'nin altında (0,55 ± 0,20 mg/L) ölçülmüştür (Şekil 7). Bu dönemde T-Fe gideriminin pH'daki dalgalanmadan (3,5-7,5) etkilenmediği görülmüştür. HBS'nin kademeli olarak 24 saat'ten 6 saate düşürüldüğü 100 ve 140 gün arasında girişte 10 mg/L Fe^{+3} ilavesi yapılmış, HBS 12 saat döneminde 1 gün hariç (107. gün T-Fe 23 mg/L ölçülmüştür) çıkışta toplam Fe konsantrasyonunun ortalama 1,75 mg/L olduğu fakat HBS'nin 6 güne indirilmesi ile 6,88 mg/L'ye kadar yükselebildiği görülmüştür.

Si-AKYB'nin farklı konsantrasyonlarda ve farklı HBS'lerde Cr^{6+} ve Cu^{2+} ilavesi ile işletiminde 110 mg/L konsantrasyonunda Fe^{+3} ilavesinin metal giderimini kötü etkilediği ve üretilen sülfürün tüm metali gidermeye yetmediği gözlenmiştir.



Şekil 7. Si-AKYB'de Fe^{3+}, Fe^{2+} ve T-Fe konsantrasyon profilleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, aktif karbon yataklı bir biyoreaktörde sülfat indirgeme koşullarında Cr^{6+} ve Cu^{2+}'nın giderim performansı, hidrolik bekleme süresi (HBS) ve Fe^{+3} ilavesinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sülfat indirgeyen bakterilerin (SİB) sülfür üretimi nedeniyle ağır metal gideriminde oldukça etkin olabileceğini ve özellikle pH, HBS ve sülfür çöktürme mekanizmalarının metal giderimini etkilediğini göstermektedir.

4.1. Sülfat İndirgeme Performansı

Sülfat indirgeme performansı, sisteme beslenen metal konsantrasyonları ve HBS'ye bağlı olarak değişim göstermiştir. 100 mg/L'ye kadar Cr^{6+} ve 300 mg/L'ye kadar Cu^{2+} konsantrasyonlarında sülfat indirgeme oldukça yüksek verimle gerçekleşmiştir ve bu durum, yüksek hidrojen sülfür (HS^-) üretimi ve düşen sülfat seviyeleri ile desteklenmiştir. Bu bulgu, benzer koşullar altında biyoreaktörlerde yüksek sülfat indirgeme verimi gösteren çalışmaları doğrulamaktadır (Şahinkaya ve ark., 2012; Kaksonen ve Puhakka, 2007). Ancak, Cu'nun 500 mg/L'ye

çıkarılması ve 110 mg/L'ye kadar Fe^{+3} ilavesi, SİB aktivitesini baskılayarak sülfat indirgeme performansının azalmasına neden olmuştur. Bu durum, metallerin SİB üzerinde toksik etkiler gösterdiği bir eşik değere ulaşılmasıyla ilişkilendirilebilir (Kaksonen ve Puhakka, 2007). Bu çalışmada Cr^{6+} için 100 mg/L, Cu^{2+} için ise 300 mg/L eşik konsantrasyon değerlerine kadar sülfat indirgeme performansının etkilenmediği gözlenmiştir.

4.2. pH'nin Etkisi ve Çökelme Mekanizmaları

pH değeri, hem sülfür çöktürme hem de doğrudan metal çöktürme açısından belirleyici bir faktör olarak gözlemlenmiştir. Cu ve Cr^{6+} gibi metallerin sülfür varlığında pH'ya bağlı olarak farklı formlarda çökeldiği gözlemlenmiştir. CuS, pH 6.0'ın üzerinde çözünmez bir formda çökme eğilimi göstermekte, pH 6.0'ın altındaki koşullarda ise çözünürlüğü artmaktadır (Stumm ve Morgan, 1996). Ayrıca pH'nın azalması ile (pH < 5) sülfürün H_2S formunda gaz fazına kaybedilmesi (Lewis, 2010) nedeniyle metal giderimleri de olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, Cu^{2+} gideriminde pH'nın 6'nın üzerine çıkarılması, CuS çökelmesini ve bu metalin sudan uzaklaştırılmasını artırmaktadır. Bilgin ve Jaffe (2019) iki aşamalı bir sistemde (kum yataklı bir biyoreaktör ve kimyasal çöktürme reaktörü) pH 7,5'te 600 mg/L'ya kadar Cu^{2+}'nın CuS formunda % 100 giderilebildiğini göstermiştir.

Cr^{6+}'nın ise indirgenerek Cr^{+3}'e dönüşmesi, çözünmez $Cr(OH)_3$ formunda çökelme olasılığını doğurmaktadır. Cr^{+3}'ün hidroksit olarak çökelmesi için optimum pH aralığı 5-6 civarında olup, literatürdeki Pourbaix ve dominant tür aralığı grafikleri incelendiğinde, pH 5-10 aralığında $Cr(OH)_3$ formunda kararlı bir çökelme gözlenmektedir (Barrera vd., 2012). Yüksek pH koşullarında $Cr(OH)_3$ oluşumu artmakta ve metal giderim verimliliği yükselmektedir (Shahid vd., 2017; Jiang vd., 2023). Bu sonuçlar, Cr ve Cu sülfür çöktürmesinin pH'ya bağımlı olduğunu ve optimum giderim için pH'nın uygun aralıkta tutulması gerektiğini belirten Huisman ve ark. (2006) tarafından da desteklenmektedir.

4.3. Hidrolik Bekleme Süresi (HBS) ve Metal Yüklemesi

HBS'nin 24 saatten 6 saate düşürülmesi, metal giderim oranlarında belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Daha uzun HBS'lerde Cr^{6+} ve Cu^{2+}'nın daha yüksek oranda giderildiği, kısa bekleme süresinin ise bu metallerin atık su içerisinde kalmasına neden olduğu gözlenmiştir. Bu durum, biyolojik süreçlerin verimliliği için yeterli temas süresine ihtiyaç duyulması ile açıklanabilir (Marchioretto ve ark., 2005). Yüksek metal yüklemesi durumunda, SİB'nin Cr^{6+} ve Cu^{2+} varlığında optimum performans göstermesi için HBS'nin dikkatle ayarlanması gerektiği görülmektedir.

4.4. Fe^{+3} İlavesinin Etkisi

Fe^{+3} ilavesi, sülfat indirgeyen biyoreaktörlerde metal gideriminde çeşitli olumlu katkılar sağlayabilir. Ancak bu katkılar, Fe^{+3} konsantrasyonunun optimum seviyede tutulmasına bağlıdır. Fe^{+3} iyonları, çözeltide hidrolize olarak $Fe(OH)_3$ gibi çözünmez bileşikler oluşturur. Bu $Fe(OH)_3$ çökeleği, Cr^{+3} ve Cu gibi diğer metal iyonları için adsorpsiyon yüzeyi sağlar ve bu iyonların ko-çöktürülmesine olanak tanır. $Fe(OH)_3$'ün yüzeyine adsorbe olan metaller, çözeltiden uzaklaştırılarak giderim verimliliğini artırır. Bu etki, pH'nın 5-6 civarında kontrol edilmesiyle optimize edilebilir (Gadd, 2010; Pagnanelli et al., 2009). Ayrıca Fe^{+3}, indirgendikten sonra sülfür iyonları ile birleşerek FeS formunda çökelir ve sülfür çöktürme reaksiyonlarını teşvik eder ve aynı zamanda CuS gibi diğer çözünmez metal sülfürlerin oluşumunu teşvik eder. FeS ve CuS gibi bileşiklerin düşük çözünürlükleri nedeniyle, bu metal sülfürler kolayca çökelir ve çözeltiden uzaklaştırılır. Bu mekanizma, özellikle yüksek metal konsantrasyonlarının olduğu sistemlerde oldukça etkilidir (Şahinkaya et al., 2013; Lens and Hulshoff Pol, 2000). Buna ek olarak Fe^{+3} ilavesi, sistemdeki pH'yi stabilize etme potansiyeline sahiptir. Fe^{+3}, hidroliz süreci sırasında $Fe(OH)_3$ formunda çökelir ve çözeltide hafif bir asidik ortam oluşturur, bu da pH'nın ani dalgalanmalarını önleyebilir. pH'nın belirli bir aralıkta stabil kalması, metal sülfür çöktürme reaksiyonlarının verimliliğini artırır. Düşük pH koşullarında metal iyonlarının sülfürle çökmesi zorlaşırken, Fe^{+3} hidrolizi ile oluşan $Fe(OH)_3$ çökeleği, SİB'nin aktivitesini olumsuz etkilemeden pH stabilizasyonuna katkıda bulunabilir (Gibert et al., 2004). Fe^{+3} ilavesi ile çöktürülen FeS veya $Fe(OH)_3$, toksik metallerin biyosisteme zarar vermeden ortamdan uzaklaştırılmasına katkı sağlayabilmektedir. Örneğin, Cr^{6+}'nın indirgenmesiyle oluşan Cr^{+3}, $Fe(OH)_3$ yüzeyine adsorbe olarak çözeltiden uzaklaştırılabilir ve SİB'nin toksik etkilerden korunmasına katkı sağlar (Kaksonen and Puhakka, 2007; Kaksonen et al., 2003).

Ancak, Fe^{+3}'un bu katkıları sağlayabilmesi için belirli bir denge önemlidir. Fe^{+3} fazla miktarda eklendiğinde, SİB için rekabet eden bir sülfür tüketici haline gelebilir ve diğer metallerin sülfürle çöktürülmesi için gerekli sülfür miktarını azaltarak sistemin verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, Fe^{+3} konsantrasyonunun dikkatli ayarlanması, olumlu etkilerin maksimuma çıkarılması ve istenmeyen rekabetçi reaksiyonların en aza indirilmesi için kritiktir (Şahinkaya et al., 2013; Neculita et al., 2007).

Bu çalışmada Fe^{+3} ilavesi, başlangıçta sistem performansında fark yaratmamış görünmekle birlikte, yüksek Fe^{+3} konsantrasyonlarında Cr^{6+} ve Cu^{2+} giderim verimliliğinde azalma gözlenmiştir. Fe^{+3}, sülfür iyonları için rekabete girerek diğer metallerin çöktürülmesi için gereken sülfürü azaltabilir. Şahinkaya ve ark. (2013) tarafından yapılan benzer çalışmalarda da yüksek Fe^{+3} konsantrasyonlarının SİB sistemlerinde operasyonel zorluklara yol açtığı gösterilmiştir. Ayrıca, Fe^{+3} varlığında pH değerlerinin düşme eğiliminde olması, metal çöktürme verimliliğini de olumsuz yönde etkilemiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, aktif karbon yataklı sülfat indirgeme biyoreaktörünün Cr^{6+} ve Cu^{2+} gibi ağır metallerin gideriminde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. pH ve HBS gibi parametrelerin optimizasyonunun, SİB aktivitesini sürdürülebilir kılmak ve metal giderim verimini artırmak için kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Fe^{3+} ilavesinin düşük konsantrasyonlarda fayda sağlarken, yüksek konsantrasyonlarda sistem verimliliğini olumsuz etkileyebileceği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalar için potansiyel taşıyan bu sistemin etkinliğini artırmak amacıyla, operasyonel parametrelerin dikkatle yönetilmesi gerektiğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 119Y312 no.lu "Ardışık Sabit Yataklı Anaerobik ve Aerobik Biyoreaktörlerde Metal İşleme Endüstrisi Atıksularının Arıtımı ve Mikrobiyal Popülasyonun Yenilikçi Moleküler Tekniklerle Belirlenmesi" başlıklı TÜBİTAK 1002 projesi ile desteklenmiştir.

Kaynakça

[1] Arias, J. M., & Tebo, B. M. 2003. Cr(VI) Reduction by Sulfate-Reducing Bacteria: Cytochrome c_3 as an Electron Transfer Mediator for Cr(VI) Reduction in *Desulfovibrio vulgaris*. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(6), 3255–3262.
[2] Albuquerque, V. F. de, Barros, A. L. de, Lopes, A. C., Santos, A. B. dos, & Nascimento, R. F. do. (2013). Removal of the metal ions Zn^{2+}, Ni^{2+}, and Cu^{2+} by biogenic sulfide in UASB reactor and speciation studies. *Desalination and Water Treatment, 51*(10–12), 2093-2101.
[3] Barrera-Díaz, C. E., Lugo-Lugo, V., & Bilyeu, B. (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *Journal of Hazardous Materials*, 223–224, 1-12.
[4] Bijmans, M. F., Vries, E. F. J. d., Yang, C., Buisman, C., Lens, P. N., & Dopson, M. (2010). Sulfate reduction at ph 4.0 for treatment of process and wastewaters. *Biotechnology Progress*, 26(4), 1029-1037.
[5] Bilgin, A., Jaffé, P.R. Precipitation of Copper (II) in a Two-Stage Continuous Treatment System Using Sulfate Reducing Bacteria. *Waste Biomass Valor* **10**, 2907–2914 (2019).
[6] Chang, J. S., & Kim, D. J. 2007. Effect of Temperature on the Bioreduction of Hexavalent Chromium by Anaerobic Microorganisms. *Environmental Technology*, 28(2), 171–177.
[7] Chung, J., Nerenberg, R., & Rittmann, B. E. (2006). *Bio-reduction of soluble chromate using a hydrogen-based membrane biofilm reactor. Water Research, 40(8), 1634–1642.*
[8] Cırık, K., & Özgür, N. 2013. Removal of Hexavalent Chromium by Sulfate-Reducing Bacteria in Different Bioreactor Configurations. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(8), 5474–5480.
[9] Cord-Ruwisch, R. (1985) A quick method for the determination of dissolved and precipitated sulfides in cultures of sulfate reducing bacteria, Journal of Microbiological Methods, 4. 33-36.
[10] De Smul, A., Dries, J., Goethals, L., Grootaerd, H., Verstraete, W., 1997. High rates of microbial sulphate reduction in a mesophilic ethanol-fed expanded-granular-sludge blanket reactor. Appl. Microbiol. Biotechnol. 48, 297–303. https://doi.org/10.1007/ s002530051053.
[11] Detmers, J., Brüchert, V., Habicht, K. S., & Kuever, J. (2001). Diversity of sulfur isotope fractionations by sulfate-reducing prokaryotes. *Applied and Environmental Microbiology, 67*(2), 888–894.
[12] Gadd, G. M. 2010. Metals, Minerals and Microbes: Geomicrobiology and Bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609–643.
[13] Gibert, O., de Pablo, J., Cortina, J. L., & Ayora, C. 2004. Chemical Characterization of Natural Organic Substrates for Biological Mitigation of Acid Mine Drainage. *Water Research*, 38(19), 4186–4196.
[14] Huisman, J. L., Schouten, G., & Lettinga, G. 2006. The Role of Sulfide in the Anaerobic Treatment of Sulfate-Containing Wastewater. *Water Research*, 40(7), 1329–1337.
[15] Jiang, X., Long, W., Peng, L., Xu, T., He, F., Tang, Y., & Zhang, W. (2022). Reductive immobilization of Cr(VI) in contaminated water by tannic acid. *Chemosphere, 297*, 134081.
[16] Kaksonen, A. H., Franzmann, P. D., & Puhakka, J. A. 2003. Performance and Ethanol Oxidation Kinetics of a Sulfate-Reducing Fluidized-Bed Reactor Treating Acidic Metal- and Sulfate-Containing Wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*, 83(7), 701–714.

[17] Kaksonen, A. H., & Puhakka, J. A. 2007. Sulfate Reduction-Based Bioprocesses for the Treatment of Acid Mine Drainage and the Recovery of Metals. *Engineering in Life Sciences*, 7(6), 541–564.
[18] Liamleam, W., Annachhatre, A.P., 2007. Electron donors for biological sulfate reduction. Biotechnol. Adv. 25, 452–463. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.002.
[19] Lens, P. N. L., & Hulshoff Pol, L. W. 2000. Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution: Principles and Engineering. *IWA Publishing*.
[20] Lewis, A. E. (2010). Review of metal sulphide precipitation. *Hydrometallurgy, 104*(2), 222-234.
[21] Loreto, C. D., Monge, O., Martin, A. R., Ochoa-Herrera, V., Sierra-Alvarez, R., & Almendariz, F. J. (2021). Effect of carbon source and metal toxicity for potential acid mine drainage (AMD) treatment with an anaerobic sludge using sulfate-reduction. *Water Science and Technology, 83*(11), 2669–2677.
[22] Marchioretto, M. M., Foresti, E., & Campos, J. R. 2005. Effect of pH and ORP on the Performance of UASB Reactors for Domestic Sewage Treatment. *Water Science and Technology*, 52(1–2), 387–394.
[23] Muyzer, G., Stams, 2008. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat Rev Microbiol* **6**, 441–454.
[24] Neculita, C. M., Zagury, G. J., & Bussière, B. 2007. Passive Treatment of Acid Mine Drainage in Bioreactors Using Sulfate-Reducing Bacteria: Critical Review and Research Needs. *Journal of Environmental Quality*, 36(1), 1–16.
[25] Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W., et al. 2009. Removal of Hexavalent Chromium-Contaminated Water and Wastewater: A Review. *Water Air Soil Pollution*, 200(2009), 59–77.
[26] Pagnanelli, F., Mainelli, S., De Angelis, S., & Toro, L. 2009. Copper and Cadmium Biosorption on *Rhizopus Oligosporus* sp. Biomass: Equilibrium and Kinetics. *Process Biochemistry*, 38(9), 1439–1447.
[27] Qian, J., Fan, J., Xu, Y., & Zhang, J. 2016. Bioreduction of Chromium (VI) in Anaerobic Sludge under Different Environmental Conditions. *Bioresource Technology*, 200(2016), 605–611.
[28] Ramakrishnaiah, C. R., & Prathima, B. 2011. Heavy Metal Removal by Chemical Precipitation and Electrocoagulation Techniques: A Comparative Study. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(7), 1866–1871.
[29] Richard, F. C., & Bourg, A. C. M. 1991. Aqueous Geochemistry of Chromium: A Review. *Water Research*, 25(7), 807–816.
[30] Sedlak, D. L., & Chan, P. G. 1997. Reduction of Hexavalent Chromium by Ferrous Iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(11), 2185–2192.
[31] Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., Dumat, C., & Rashid, M. I. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere, 178*, 513-533.
[32] Şahinkaya, E., Dursun, N., & Kilic, A. 2009. Bioreduction of Sulfate and Chromium in a Thermophilic Anaerobic Baffled Reactor. *Bioresource Technology*, 100(9), 2442–2449.
[33] Şahinkaya, E., Dursun, N., & Kilic, A. 2013. Sulfate and Metal Removal in Anaerobic Baffled Reactor Under Varying COD/SO_4^{2-} Ratios With and Without Acetate Supplementation. *Journal of Hazardous Materials*, 260(2013), 649–655.
[34] Şahinkaya, E., Kilic, A., & Dursun, N. 2012a. Performance of Anaerobic Baffled Reactor in Treating Sulfate and Chromium-Containing Wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 104(2012), 14–19.
[35] Şahinkaya, E., Yurtsever, A., & Çakmakçı, M. 2011. Effect of Varying COD/SO_4 Ratios on Sulfate Reduction in an Anaerobic Baffled Reactor. *Desalination*, 278(1–3), 77–83.
[36] Şahinkaya, E., Yurtsever, A., & Özdemir, S. 2007. Treatment of Acidic Wastewaters Using Sulfate Reducing Bacteria: The Effect of COD/SO_4 Ratio. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1–2), 303–309.
[37] Şahinkaya, E., Yurtsever, A., & Özdemir, S. 2012b. Sulfate Reduction and Chromium Removal in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *Bioresource Technology*, 118(2012), 235–240.
[38] Y.C. Song, B.C. Piak, H.S. Shin, S.J. La, Influence of electron donor and toxic materials on the activity of sulfate reducing bacteria for the treatment of electroplating wastewater, Water Sci. Technol, 1998, https://doi.org/10.1016/ S0273-1223(98)00527-7.
[39] Stumm, W., & Morgan, J. J. 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. 3rd Edition. Wiley-Interscience, New York.
[40] Teksoy Başaran, S., Kutlar, F. S., & Şahinkaya, E. 2021. High concentration hexavalent chromium removal performance of a sulfidogenic activated carbon-bed bioreactor at moderate temperature. Journal of Water Process Engineering, 42, 102162.
[41] Venitti, S., & Levy, L. S. 1974. Mutagenicity of Chromates in Bacteria and its Relevance to Chromate Carcinogenesis. *Nature*, 250(5466), 493–495.
[42] Young, C. A., Dahlgren, E. J., & Robins, R. G. (2003). *The solubility of copper sulfides under reducing conditions. Hydrometallurgy, 68(1-3), 23–31.*

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Atıkların Transfer Öğrenme Yöntemi ile Sınıflandırılmasında Veri Artırımının Etkisi

Necdet Tuğrul Artuğ*[1]

*[1]İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Elektrik Programı , İSTANBUL

(Alınış / Received: 05.02.2025, Kabul / Accepted: 13.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Atık Ayrıştırma,
Evrişimsel Sinir Ağları,
Derin Öğrenme,
Transfer Öğrenme,
Yapay Zekâ

Öz: Atıkların sınıflandırılmasının efektif bir şekilde yapılması, küresel ısınmaya karşı alınacak önlemlerden bir tanesidir. Bu sürecin geleneksel yöntemler yerine daha pratik yöntemlerle, yani yapay zekâ aracılığıyla yapılması sürece katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada 9 atık sınıfı içeren RealWaste veri seti kullanılarak, transfer öğrenme yoluyla sınıflandırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme ağlarının sınıflandırma başarısının test edilmesi için dört farklı senaryo ele alınmıştır. Ayrıca veri artırımının sınıflandırma sürecine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada AlexNet, GoogLeNet, MobileNet, ResNet serisi, VGG serisi ve Inception_v3 ağları tercih edilmiştir. Ağların son 2 katmanı eğitilirken, diğer katmanları dondurulmuştur. Veri artırımı için geometrik dönüşümler tercih edilmiştir. Veri seti üzerinde ek işlemler yapılmadan en yüksek başarı %91,57 olarak ResNet50 ağıyla elde edilmiştir. Veri artırımı yapıldığında ise Inception_v3 ağıyla %99,912'lik sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Veri artırımının sınıflandırma başarısına pozitif etki ettiği gözlemlenmiştir.

The Effect of Data Augmentation on Classification of Wastes via Transfer Learning Method

Keywords
Waste Decomposition,
Convolutional Neural Networks,
Deep Learning,
Transfer Learning,
Artificial Intelligence

Abstract: Effective classification of waste is one of the precautions to be taken against global warming. Carrying out this process with more practical methods instead of traditional methods, namely through artificial intelligence, will contribute to the process. In this study, classification process was conducted via transfer learning while using RealWaste dataset which contains 9 waste classes. Four different scenarios were considered to test the classification performance of the deep learning networks. Besides, the effect of data augmentation on the classification process was investigated. AlexNet, GoogLeNet, MobileNet, ResNet versions, VGG versions and Inception_v3 networks were preferred in this study. While the last 2 layers of the networks were trained, the other layers were frozen. Geometric transformations were preferred for data augmentation. The highest performance acquired without doing any additional processes on the data set was 91.57% with ResNet50 network. When data augmentation was made, 99.912% classification performance was achieved with the Inception_v3 network. It was observed that data augmentation affected the classification performance in a positive way.

*İlgili Yazar, email: tugrulartug@gmail.com

1. Giriş

Ev veya sanayi kaynaklı atıkların çöp sahalarında etkin bir şekilde ayıklanması, çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli bir rol oynar [1, 2]. Bu sürecin düzgün şekilde yönetilmemesinin hem çevreye hem de insan sağlığına

olumsuz etkisi vardır. Atıkların ayrıştırma sürecinin etkin yapılamaması ve bekletilmesi gaz salınımına sebep olur. Bu salınım da küresel ısınmada artış ile sonuçlanır [2, 3].
Atıklar organik, inorganik ve geri dönüştürülebilir atıklar olarak 3 ana grupta toplanabileceği gibi, kendi içlerinde de alt gruplara ayrılabilir [4]. Geri dönüştürülebilir atıklara örnek olarak kâğıt, cam, plastik ve metal verilebilir. Atıkların ayrıştırılması geleneksel şekilde insan gücüyle yapılabileceği gibi, akıllı sistemler vasıtasıyla da yapılabilmektedir. Bununla ilgili yapılan çalışmalardan birinde [5] akıllı telefon vasıtasıyla atığın türünü belirlemeye yönelik bir yazılım geliştirmişlerdir. Bunun için derin öğrenmeye dayalı bir sınıflandırıcı önermişler ve hazır bir veri seti olan GINI üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonunda %87,69 doğruluk elde etmişlerdir.

Yapılan bir diğer çalışmada [6] Chu ve diğerleri, atıkların sınıflandırılabilmesi için çok katmanlı hibrit bir derin öğrenme mimarisi tasarlamışlardır. Evrişimsel sinir ağları ile görüntülerden öznitelikler çıkartırken, çok katmanlı perseptron ile de atıkları sınıflandırmışlardır. Kendi oluşturdukları veri seti 5000 görüntüden oluşmaktadır ve atıkları geri dönüştürülebilir ve diğerleri olarak sınıflamışlardır. Sonuçta %90'ın üzerinde başarı elde etmişlerdir.

Zhang ve diğerleri [7], derin öğrenme yoluyla ResNet18 ağına kendi kendini izleme modülü entegre ederek, geri dönüştürülebilir atıkları sınıflamışlardır. Geliştirdikleri modeli TrashNet veri seti üzerinde denemişlerdir. TrashNet 6 farklı atık türüne ait görüntüleri içermektedir ve bu set üzerinde %95,87'lik bir başarı elde etmişlerdir.

Akıllı sistemlerle atık sınıflandırmasına yönelik bir çalışma da Hossen ve diğerleri [8] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada RWCNet adı verilen bir derin öğrenme modeli geliştirerek, TrashNet veri setini sınıflandırmaya çalışmışlardır. Önerdikleri model %95,01'lik bir başarı elde etmiştir.

Bilinen önceden eğitilmiş derin öğrenme ağlarını transfer öğrenme yoluyla kullanarak, katı atıkları sınıflandırma problemini içeren bir çalışma, Oza ve diğerleri [9] tarafından 2025 yılında yapılmıştır. Çalışmalarında hazır 3 veri setini birleştirerek kullanmışlardır. Böylece 10 farklı kategoride 30000'in üzerinde görüntü içeren bir veri seti oluşturmuşlardır. Dense-Net ve Efficient-Net ağları birleştirilerek %99,54'lük başarı elde etmişlerdir.

Mevcut çalışmanın amacı ise RealWaste [10] isimli veri seti üzerinde önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağlarını, transfer öğrenme yöntemi vasıtasıyla kullanarak atıkları sınıflandırmak ve veri artırımının sınıflandırma başarısı üzerine etkisini araştırmaktır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada çeşitli atıkları içeren bir veri seti [10], transfer öğrenme yöntemi ile bilinen evrişimsel sinir ağları kullanılarak sınıflandırılacaktır. Oluşturulacak senaryolar ile sınıflandırma performansı artırılmaya çalışılacak ve ağların performansları karşılaştırılacaktır. Tüm süreçler MATLAB ortamı üzerinde yürütülecektir. Ağların eğitimi işlemi için yüksek performanslı bir bilgisayar kullanılacaktır. Bilgisayarın donanımında 5,8 GHz'lik 24 çekirdekli bir işlemci, 32 GB 4800 MHz DDR5 bellek ve Nvidia RTX A4000 yongasına sahip 16 GB bellekli bir ekran kartı bulunmaktadır.

2.1. Veri seti

RealWaste [10] veri seti 524x524 çözünürlüğünde, toplam 9 farklı sınıfa ait atık görüntüsü barındırmaktadır. Bu veri setini diğerlerinden ayıran özelliği, deformasyona ve bozulmaya uğramış materyalleri de içermesidir. Atık türleri sırasıyla bitki (436), cam (420), gıda (411), kâğıt (500), karışık (495), karton (461), metal (790), plastik (921) ve tekstilden (318) oluşmaktadır. Karışık isimli kategori, net şekilde belirlenmiş olan diğer 8 kategoriye girmeyen atıklar için belirlenmiş bir sınıftır. Veri setinin düzgünce eğitim, test ve validasyon olarak ayrılabilmesi için bitki, gıda, karton, plastik ve tekstil sınıflarından sırasıyla 1, 1, 1, 1 ve 3 adet görüntü atılmış ve toplamda 4745 görüntü elde edilmiştir. Bahsedilen 9 sınıfa ait örnek görüntüler Şekil 1'de sunulmuştur. Karışık kategorisinin örnek görüntüsü bir bulaşık süngeridir.



1. Sıra: Bitki, Cam, Gıda
2. Sıra: Kağıt, Karışık, Karton
3. Sıra: Metal, Plastik, Tekstil

Şekil 1. RealWaste veri setinden 9 sınıf için örnek görüntüler

2.2. Yöntem

Çalışmada kullanılacak olan veri setinin sınıflandırılması için, önceden eğitilmiş ve bilinen evrişimsel sinir ağları kullanılacaktır. Test edilecek ağlar, derinlik ve parametre bilgileri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önceden eğitilmiş derin öğrenme ağları ve bilgileri

Ağ	Ağın Derinliği	Parametre Sayısı (Milyon)
AlexNet [11]	8	61
GoogLeNet [12]	22	7
MobileNet [13]	53	3,5
ResNet18 [14]	18	11,7
ResNet50 [14]	50	25,6
VGG16 [15]	16	138
VGG19 [15]	19	144
Inception_v3 [16]	48	23,9

AlexNet 2012'de ImageNet yarışmasını kazanmış olup Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever ve Geoffrey Hinton tarafından geliştirilmiştir [11]. Oldukça hızlı eğitilebilen bir ağdır. GoogLeNet ise aynı yarışmayı 2014 yılında kazanmış olup, Google mühendisleri tarafından geliştirilmiştir [12]. İlk versiyonu, nesne algılama ve görüntü sınıflandırma işlemlerini mobil cihazlarda bile yapabilecek kadar sistem dostudur. Sandler ve diğerleri tarafından geliştirilen MobileNet ise düşük sistem gereksinimleriyle mobil cihazlarda gerçek zamanlı uygulamalar geliştirmek için idealdir [13]. Bunu sağlarken, derinliği yine yüksek tutabilmiş ve performanstan ödün vermemiştir. ResNet ise eğitim sırasında yeri geldiğinde bazı katmanları atlamasına imkân veren bir mimari sunar. He ve diğerleri tarafından geliştirilen ResNet, bu mimari sayesinde daha derin ağlar oluşturabilmeyi mümkün kılmıştır [14]. ResNet ağı 2015 yılı ImageNet yarışmasını kazanmıştır. Derinlik sayısı 152'ye kadar olan modelleri mevcuttur. VGG ağının mimarisi sıralı şekilde evrişim katmanları, havuzlama katmanları ve tam bağlı katmanlardan oluşur. Bu düzenli mimari yüksek parametre sayısına sahiptir ve VGG16 ile VGG19 olmak üzere iki versiyonu vardır [15]. Transfer öğrenme içeren çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir. Inception_v3 de yine Google mühendisleri tarafından geliştirilmiştir. Kendinden önce geliştirilen GoogLeNet mimarisinin 3. versiyonudur. Bu versiyon hem derinliği hem de parametre sayısını belirgin şekilde artırarak, ağın patern tanıma yeteneğini ileri taşımıştır [16].

Yukarıda adı geçen ağların her biri için aşağıdaki ortak parametre ayarları tercih edilmiştir;

- Öğrenme oranı: 10^{-4}
- Validasyon frekansı: Her 5 iterasyonda bir
- İterasyon sayısı: 200

MATLAB ortamında her ağın son iki konvolüsyon katmanı eğitilmek için açık bırakılıp, diğer katmanlar dondurulmaktadır. Ağ, en iyi doğruluk değerinin alındığı iterasyondaki ağırlık değerlerini kaydetmektedir. Bu çalışmada 4 farklı senaryo ele alınmış olup, detayları 2.4-2.7 bölümleri arasında verilmiştir.

2.3. Veri seti ön işlemleri

AlexNet için görüntüler 227x227 boyutuna, GoogLeNet, MobileNet, ResNet18, ResNet50, VGG16 ve VGG19 için 224x224 boyutuna ve Inception_v3 için 299x299 boyutuna küçültülmüştür. Veri seti %60 eğitim, %20 test ve %20 validasyon olmak üzere rastgele bölünmüştür.

Derin öğrenme çalışmalarında, veri setinde bulunan örnek sayısı sınıflandırma performansında kilit rol oynar. Örnek sayısı ne kadar yüksek olursa, ağ modelinin görüntülerden çıkarabileceği öznitelik sayısı da artar. Dolayısıyla ağın genelleme performansı da yükselir.

Veri sayısı az olduğunda, sentetik bir şekilde veri artırımı yoluna başvurulabilir. Veri artırımı yöntemleri iki ana başlıkta toplanabilir. Bunlardan ilki derin öğrenme yaklaşımını içeren nöral stil transferini (Neural style transfer - NST) ve üretken çatışmacı ağları (Generative adversarial networks – GAN) içerir [17]. Diğeri ise görüntü üzerine manipülasyonlar yapan kaydırma, döndürme, yansıma, kesme, ölçekleme gibi geometrik dönüşümleri ve keskinleştirme, kontrast ile oynama gibi fotometrik dönüşümleri içerir [17, 18].

Sadece veri setindeki örnek sayısının az olduğu durumlarda değil, sınıflardaki örnek sayısının dengesiz olduğu durumlarda da veri artırımı performansı olumlu şekilde etkilemektedir. Yapılan bir çalışmada [17] dengesiz bir veri setine geometrik dönüşümler uygulayarak veri sayısını artırmışlar ve F1 skoru üzerinde artış kaydetmişlerdir. ImageNet veri seti üzerinde yapılan bir diğer çalışmada [18], geometrik dönüşümlerin performansa etkisinin daha fazla olduğu bulgusuna ulaşmışlardır.

Çalışmada kullanılan veri seti belli bir standartta kaydedilmiştir ve düzenli bir yapıya sahiptir. Bu bilgilere ilaveten daha önceki çalışmalarda elde edilen bulguların ışığında, veri artırımı için geometrik dönüşüm tercih edilmiştir.

Veri artırımı işleminde kullanılan geometrik dönüşümlere ait işlemler aşağıda verilmiştir;

- Döndürme: 90, 180 ve 270 derece
- Yansıma: X ve Y ekseni ayna görüntüleri

Bu işlemler sonucunda orijinal görüntüyle birlikte veri setindeki görüntü sayısı, senaryo içerisinde 6 katına çıkmaktadır.

2.4. Ham verinin sınıflandırılması (8 sınıflı)

İlk senaryoda kategorisi net bir şekilde belirli olan 8 sınıf ele alınmış ve 'karışık sınıfı' dışarıda bırakılmıştır. Görüntü sayısı 4250'dir. Yukarıdaki ayarlara göre 8 farklı ağ bu veriler ile eğitilmiş ve doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 Skoru, ROC eğrisi altında kalan alan değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca karşıtlık matrisi de oluşturulmuştur.

2.5. Artırılmış verinin sınıflandırılması (8 sınıflı)

İkinci senaryoda ise 2.4'teki aynı 8 sınıflı veri setine, veri artırımı yapılmış olup tekrar aynı ağlar eğitilip test edilmiştir. Bu işlem sonunda elde edilen görüntü sayısı 25500'dür. Bir önceki bölümde bahsi geçen parametreler bu senaryo için de hesaplanmıştır.

2.6. Ham verinin sınıflandırılması (9 sınıflı)

Bu senaryoda, net bir şekilde ayrılmış kategorilerdeki sınıflardan da yeri geldiğinde bir parça içeren (Ör: Plastik içeren oyuncak) karışık sınıfı da veri setine dahil edilmiştir. Böylece veri setindeki görüntü sayısı 4745'e yükselmiştir. Ağlar tekrar eğitilip, aynı parametreler bu aşamada da hesaplanmıştır.

2.7. Artırılmış verinin sınıflandırılması (9 sınıflı)

Son senaryoda ise 2.6'daki 9 sınıflı veri setine veri artırımı yapılmıştır. Bu sayede görüntü sayısı 28470'e çıkmıştır. Veri artırımının etkisinin araştırılması istenen bu en karmaşık senaryoda, yine önceki senaryolarda adı geçen parametreler hesaplanmıştır. Karışık sınıfına ait 4 adet örnek görüntü Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Karışık sınıfına ait 4 adet görüntü (çubuk, kolye, toz kümesi ve sünger)

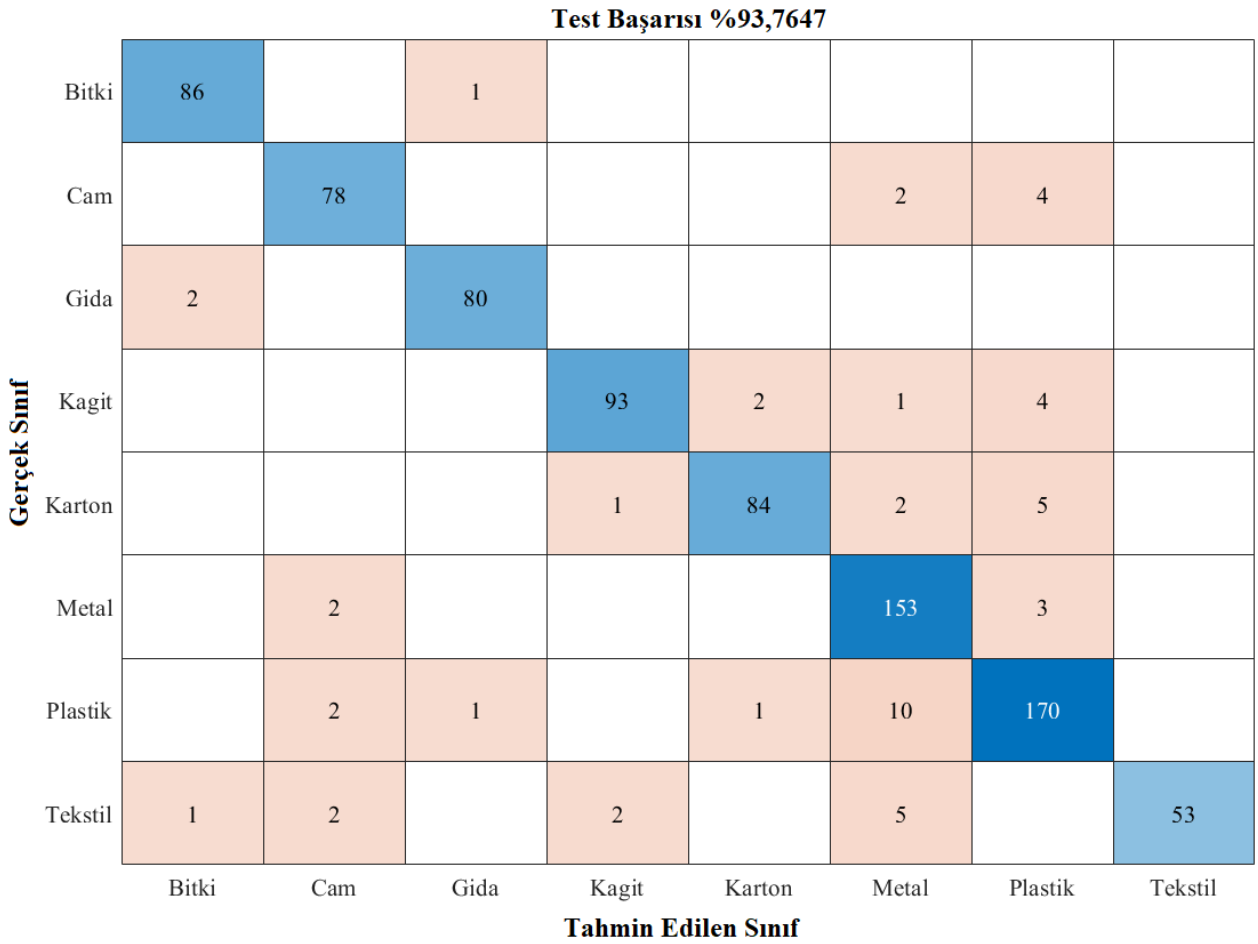
3. Bulgular

İlk senaryo (Bölüm 2.4) için elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. 8 sınıflı ham verilerin sınıflandırılma performansı

Ağ	Eğitim Başarısı	Test Başarısı	Validasyon Başarısı	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru	ROC Eğrisi Alanı
AlexNet	98,824	87,765	88,706	88,693	87,433	0,881	0,928
GoogLeNet	99,647	89,647	91,177	90,739	89,706	0,902	0,941
MobileNet	99,451	91,412	92,235	91,676	92,081	0,919	0,954
ResNet18	99,608	93,059	93,412	93,949	**93,733**	0,938	**0,964**
ResNet50	**99,882**	93,177	93,529	93,599	93,279	0,934	0,961
VGG16	98,745	87,882	89,177	89,533	87,815	0,887	0,930
VGG19	99,569	93,059	**94,941**	93,411	93,514	0,935	0,963
Inception_v3	99,529	**93,765**	94,471	**95,039**	93,366	**0,942**	0,962

En yüksek değer veren parametreler tablo üzerinde koyu ile gösterilmiştir. Eğitim süresi en kısa zaman alan ağ AlexNet olarak öne çıkmıştır. Diğer taraftan en kötü test başarısı da yine AlexNet ile alınmıştır (%87,765). En iyi test sonucu Inception_v3 ağıyla %93,765 olarak elde edilmiştir. Inception_v3 ağına ait karşıtlık matrisi Şekil 3'te verilmiştir.



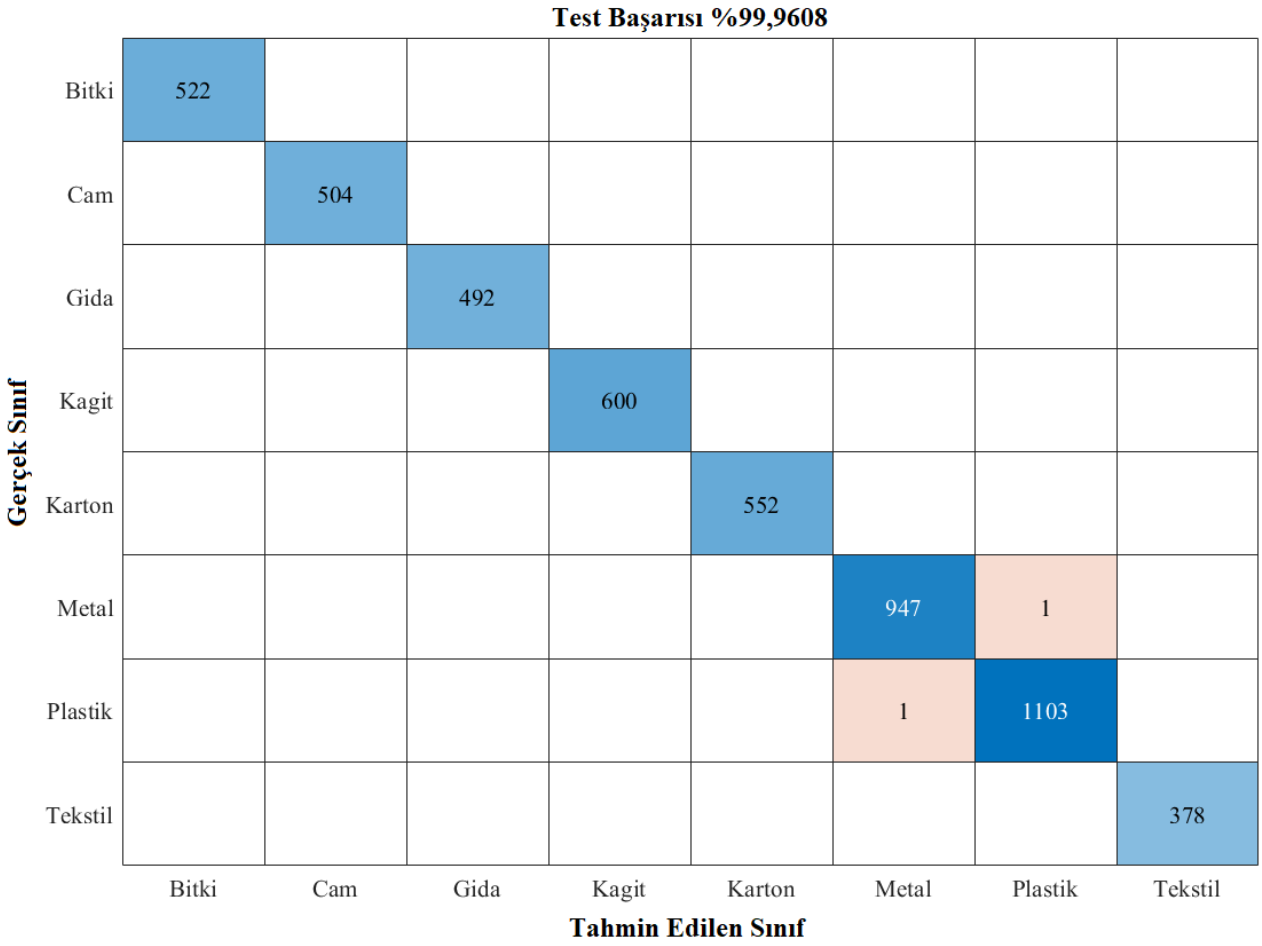
Şekil 3. Inception_v3 ağı için 8 sınıflı ham veri test performansı

Arttırılmış veri ile oluşturulan ikinci senaryoya (Bölüm 2.5) ait sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. 8 sınıflı arttırılmış verilerin sınıflandırılma performansı

Ağ	Eğitim Başarısı	Test Başarısı	Validasyon Başarısı	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru	ROC Eğrisi Alanı
AlexNet	99,856	98,157	98,843	98,196	98,487	0,983	0,991
GoogLeNet	**100**	99,902	**100**	99,934	99,908	0,999	**1**
MobileNet	99,987	99,471	99,765	99,462	99,521	0,995	0,997
ResNet18	**100**	99,745	99,882	99,776	99,817	0,998	0,999
ResNet50	**100**	**99,961**	99,980	**99,976**	**99,976**	**1**	**1**
VGG16	99,987	99,039	99,235	99,196	98,960	0,991	0,994
VGG19	99,778	98,333	98,726	98,558	98,496	0,985	0,991
Inception_v3	99,994	99,902	99,980	99,934	99,943	0,999	**1**

Veri artırımı başarıyı tüm parametreler için yükseltmiştir. En yüksek değerler yine tabloda koyu ile belirtilmiştir. En yüksek test başarısını ResNet50 ağı vermiştir (%99,961). AlexNet ağı yine en hızlı eğitilen ağ olmakla beraber, en düşük sınıflandırma performansını %98,157 ile göstermiştir. ResNet50 ağı sonuçlarından elde edilen karşıtlık matrisi Şekil 4'te verilmiştir.



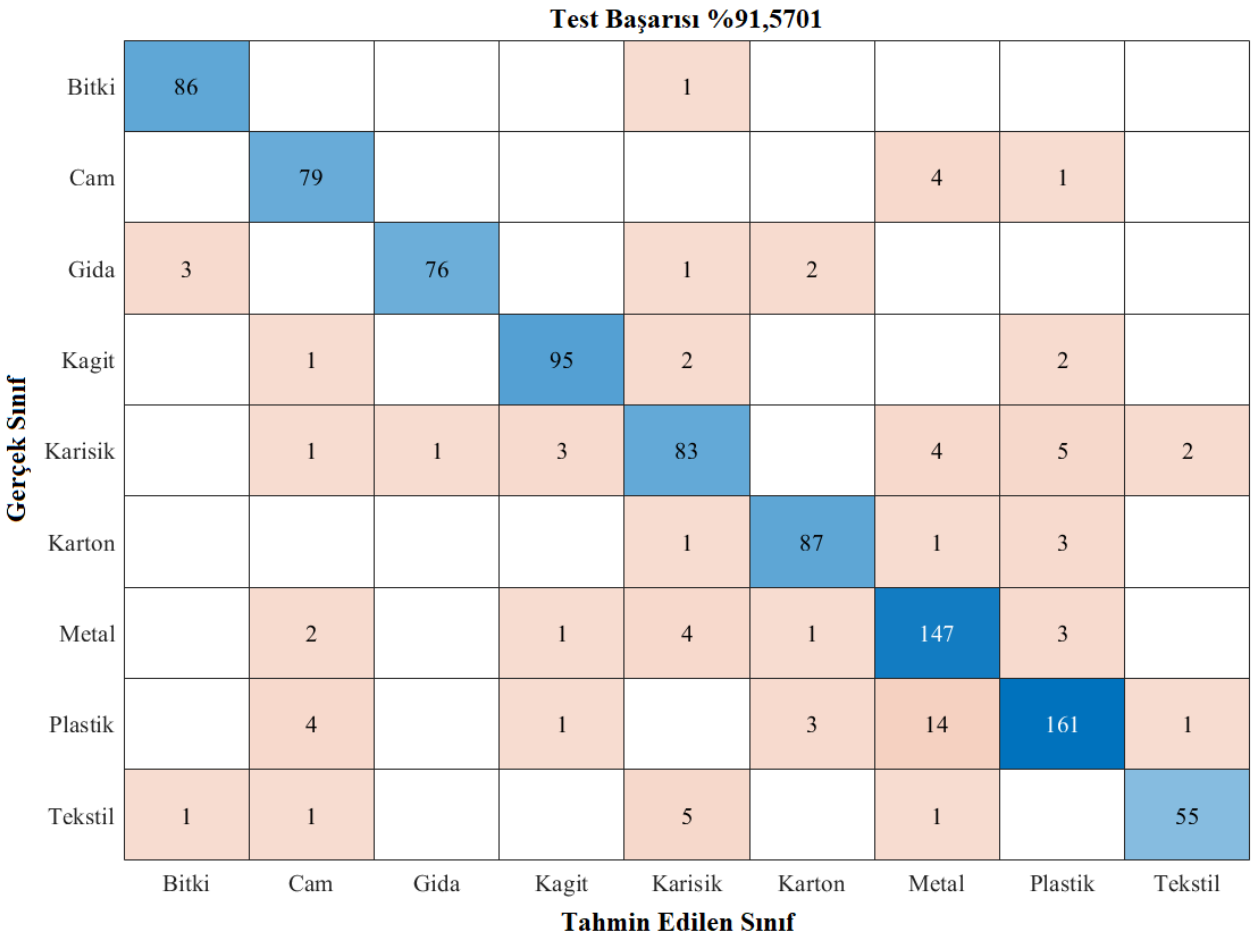
Şekil 4. ResNet50 ağı için 8 sınıflı artırılmış veri test performansı

Üçüncü senaryoda (Bölüm 2.6) karışık sınıfı da veri setine eklenmiştir. Eğitilen ağlar ile elde edilen sonuçlar Tablo 4'te paylaşılmıştır. İleriki senaryolarda AlexNet ağı, önceki iki senaryoda da (Bölüm 2.4 ve 2.5) en düşük sınıflandırma başarısını gösterdiğinden test edilmemiştir. Benzer şekilde VGG ağları da hem uzun eğitim süreleri hem de yine bahsedilen senaryolarda en iyi sonuçları vermediğinden testlere dahil edilmemişlerdir.

Tablo 4. 9 sınıflı ham verilerin sınıflandırılma performansı

Ağ	Eğitim Başarısı	Test Başarısı	Validasyon Başarısı	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru	ROC Eğrisi Alanı
GoogLeNet	99,895	87,566	87,777	88,322	87,647	0,880	0,930
MobileNet	99,895	86,934	88,514	86,973	87,819	0,874	0,931
ResNet18	**99,930**	90,200	91,992	90,893	90,057	0,905	0,944
ResNet50	99,860	**91,570**	**92,624**	**92,326**	**91,869**	**0,921**	**0,954**
Inception_v3	99,895	**91,570**	92,202	91,708	91,352	0,915	0,951

Eklenen yeni 'karışık' sınıfı, 8 sınıflı ilk senaryoya (Bölüm 2.4) kıyasla, performansı %2-3 arasında düşürmüştür. Tabloda en yüksek değerler koyu ile gösterilmiştir. Bu senaryoda en yüksek test başarısı ResNet50 ve Inception_v3 ağları ile %91,57 olarak elde edilmiştir. En hızlı eğitilen ağ ResNet18 olurken, en düşük test performansını MobileNet göstermiştir (%86,934). ResNet50 ağına ait karşıtlık matrisi Şekil 5'te sunulmuştur.



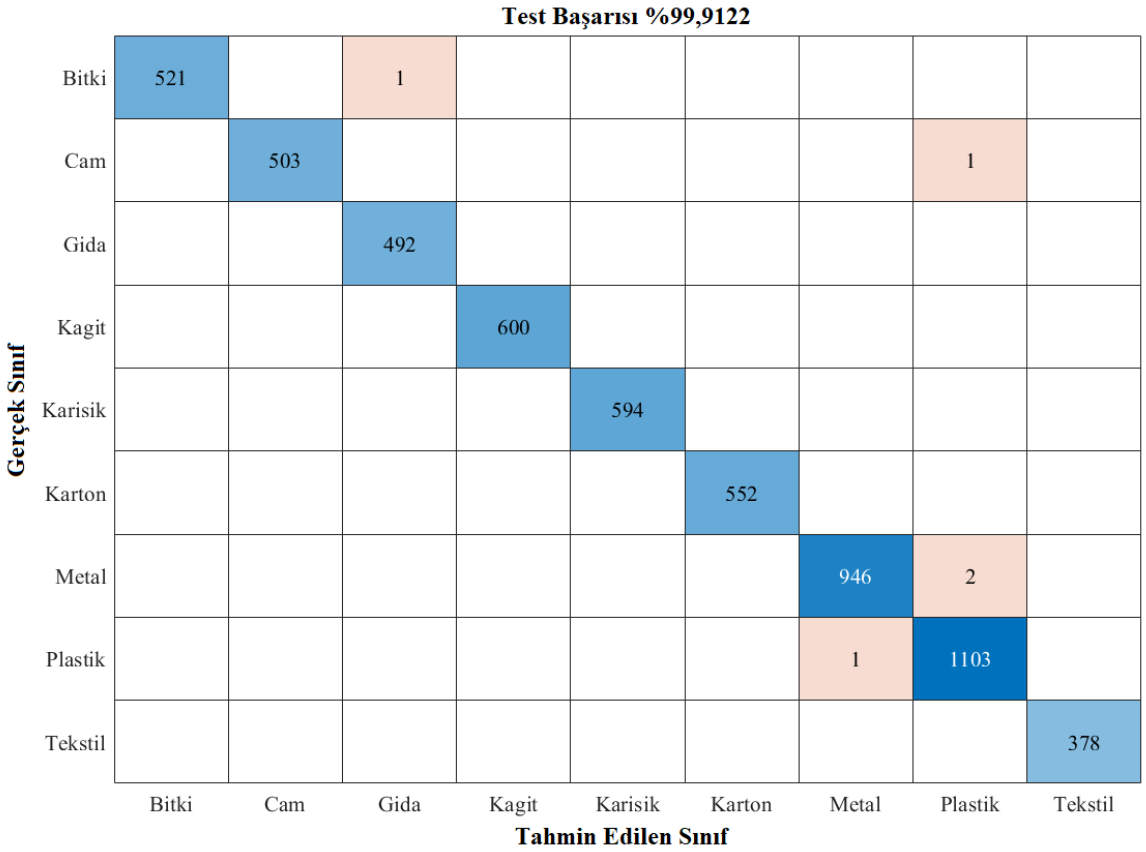
Şekil 5. ResNet50 ağı için 9 sınıflı ham veri test performansı

En karmaşık olan son senaryoya (Bölüm 2.7) ait sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur.

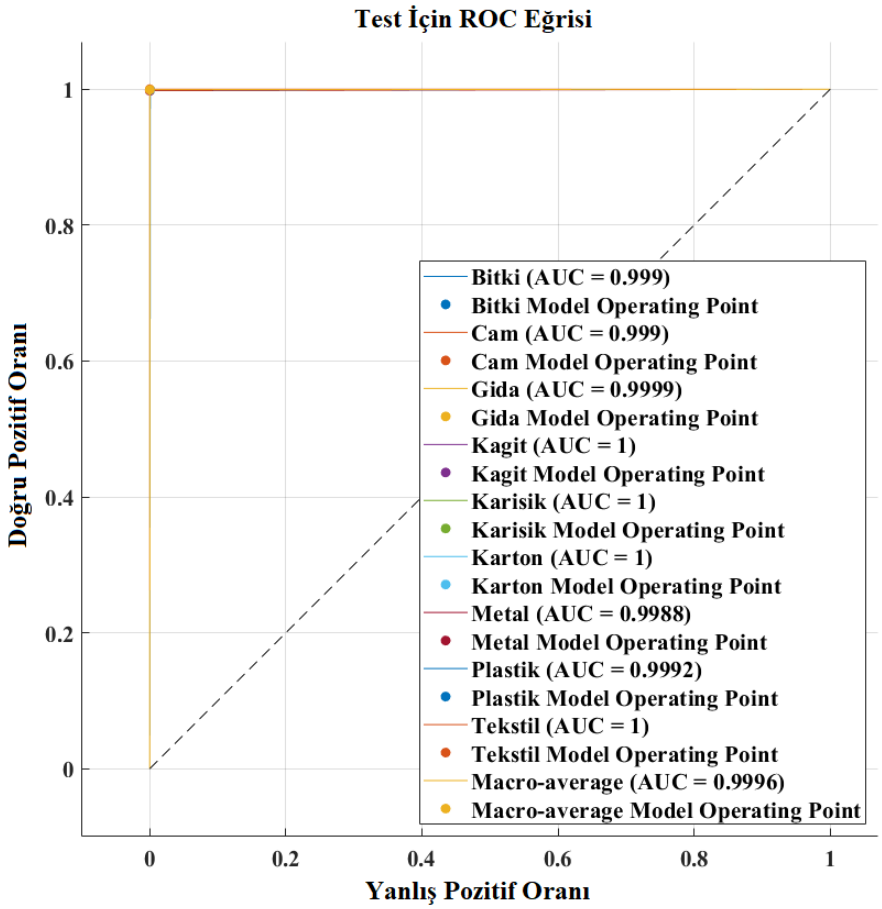
Tablo 5. 9 sınıflı arttırılmış verilerin sınıflandırılma performansı

Ağ	Eğitim Başarısı	Test Başarısı	Validasyon Başarısı	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru	ROC Eğrisi Alanı
GoogLeNet	**100**	99,877	99,912	99,885	99,900	**0,999**	0,999
MobileNet	99,977	99,298	99,701	99,314	99,347	0,993	0,996
ResNet18	**100**	99,701	99,737	99,809	99,779	0,998	0,999
ResNet50	**100**	99,895	**99,947**	99,900	**99,929**	**0,999**	**1**
Inception_v3	**100**	**99,912**	99,895	**99,936**	99,923	**0,999**	**1**

Veri artırımı sonuçlara olumlu etki etmiştir. En yüksek değerler koyu ile gösterilmiş olup, en iyi test başarısını veren ağ Inception_v3'tür (%99,912). ResNet18 en hızlı eğitilen ağ olarak öne çıkarken, en düşük sınıflandırma performansı %99,298 ile MobileNet'e aittir. Inception_v3 ağına ait karşıtlık matrisi ve sınıflara ait ROC eğrileri sırasıyla Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Inception_v3 ağı için 9 sınıflı artırılmış veri test performansı



Şekil 7. Inception_v3 ağı için 9 sınıflı artırılmış veriye ait ROC eğrileri ve eğri altında kalan alan değerleri

4. Tartışma ve Sonuç

Mevcut çalışmada, bilinen önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağları kullanılarak, transfer öğrenme yöntemiyle atıkların sınıflandırılmasında veri artırımının etkisi araştırılmıştır. Bunun için öncelikle veri setindeki görüntüler, uygulanacak ağın girişine göre ölçeklenmişlerdir. Ağların son iki katmanı ağırlıkların ince ayarı için eğitilmiş, diğer katmanlar ise dondurulmuştur. Çalışma kapsamında 4 senaryo belirlenmiştir. İlk senaryoda açık bir şekilde birbirinden ayrılmakta olan 8 atık kategorisi sınıflandırılmıştır. İkinci senaryoda ise aynı kategorilere veri artırımı yapılmış ve sınıflandırma başarısı araştırılmıştır. Üçüncü senaryoda 9. sınıf olan 'karışık' kategorisi eklenmiş ve görüntülerde sayı artırımına gidilmeden, bu zorlaştırılmış veri setinin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Son senaryoda ise yine bu 9 kategoriye veri artırımı yapılmış ve sınıflandırma sonuçları incelenmiştir.

İlk senaryonun sonuçlarına bakıldığında, test başarısının %87,765'in altına inmediği ve en yüksek başarıyı Inception_v3 ağının %93,765 ile gösterdiği görülmektedir. Aynı ağ %95 üzeri kesinlik ve F1 skoru için 0,942 değerini vermiştir. Bu senaryo için tüm ağlar birlikte değerlendirildiğinde en iyi sınıflandırılan atık bitki, en kötü sınıflandırılan atık ise plastik olarak belirlenmiştir.

İkinci senaryoda ise veri artırımının, sınıflandırma başarısını belirgin bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Test sonuçları %98,157'un altına inmezken, en yüksek sınıflandırma başarısı %99,961 olarak ResNet50 ağı ile elde edilmiştir. Diğer tüm parametrelerde de neredeyse hep en iyi sonucu veren ResNet50 ağı, diğer ağlardan bir adım öndedir. Tüm ağlar beraber ele alındığında bitki ve gıda atıklarının en doğru şekilde sınıflandırıldığı gözlemlenirken, yine plastik atıklarının nispeten daha yanlış sınıflandırıldığı görülmüştür. Yanlış sınıflandırılan plastikler, genellikle metal olarak yanlış sınıflandırılmıştır. Her ne kadar sınıflandırılma oranı diğer atık sınıflarına göre düşük olsa da, %96,649'un altına inmemiştir. Plastik atıkların yanlış sınıflandırılmasının sebebi, zaman zaman metal gibi parlak yüzeyli olmalarından olabilir. Benzer sorunla çalışmalarında karşılaşan Younis ve Obaid [19], bu iki sınıfı ayırmada karşılaşılan zorluklara değinmişlerdir.

Üçüncü senaryo, kullanılan veri setinin kaynak çalışması olan yayın ile [20] benzer bir senaryodur. Single ve diğerleri yaptıkları çalışmada, veri setinden rastgele %10'luk kısmını test için ayırmışlardır. Kalan %90'lık veriyi de %80 eğitim ve %20 validasyon olarak ayırmışlardır. Böylece veri seti %72 eğitim, %18 validasyon ve %10 test olarak ayrılmıştır. Mevcut çalışmada ise veri setinin bölünmesi %60 eğitim, %20 test ve %20 validasyon şeklindedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile [20] numaralı çalışmanın sonuçlarının karşılaştırması Tablo 6'da sunulmuştur. Sadece birebir uyumlu olan ağlar karşılaştırma tablosuna eklenmiştir.

Tablo 6. Üçüncü senaryonun kaynak çalışma [20] ile karşılaştırma sonuçları

Ağ	Çalışma	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru
MobileNet	Single vd. [20]	**88,15**	**89,98**	85,86	**0,879**
	Mevcut Çalışma	86,934	86,973	**87,819**	0,874
Inception_v3	Single vd. [20]	89,19	91,34	87,73	0,903
	Mevcut Çalışma	**91,57**	**91,708**	**91,352**	**0,915**

Ağlara yönelik sonuçlar kendi içinde değerlendirildiğinde, Single vd. MobileNet için daha iyi sonuçlar elde etmişken, mevcut çalışma Inception_v3 için daha iyi sonuç vermiştir. Mevcut çalışmanın ikinci en iyi test performansını veren ağ Inception_v3 olsa da Single vd.nin sonuçlarının [20] üzerine çıkmıştır. Bu çalışmanın en iyi sonucu da tesadüfi bir şekilde %91,57'dir ve ResNet50 ağına aittir. İki sonuç aynı test performansını verse de diğer parametreler ele alındığında, ResNet50 ağı bu senaryo için daha iyi sonuçlar sunmaktadır. Atık kategorilerinden en doğru sınıflandırılan, her ağ için bitki sınıfıdır. En hatalı sınıflandırılan ise beklendiği gibi karışık sınıfıdır. Ağlar içerisinde en düşük oranla doğru sınıflandırılan karışık sınıfına ait sınıflandırma başarısı %70,7'dir. En iyi genel test performansı veren ResNet50 ağında ise karışık sınıfına ait sınıflandırma performansı %83,838 olarak hesaplanmıştır.

Son senaryo, eklenen karışık sınıfı ile zorlaşan problemde, sınıflandırma performansını artırmak için planlanmıştır. Veri artırımı bu son senaryo için de sınıflandırma performansına olumlu etki yapmıştır. En düşük sınıflandırma başarısı dahi %99,298'dir. En iyi test başarısı %99,912 ile Inception_v3 ağına ait olsa da ResNet50 ağı da oldukça yakın bir performans göstermiştir. Tüm ağların performansı birlikte ele alındığında bitki ve gıda sınıfları yüksek doğrulukla sınıflandırılırken, plastik sınıfı en düşük doğrulukla sınıflandırılan atık türü olmuştur. En düşük performansı veren ağ için plastik sınıfının doğruluk değeri %99,094 olarak bulunmuştur.

Tüm senaryoların sonuçları irdelendiğinde, veri artırımının performansa olumlu etki gösterdiği görülmektedir. Yanlış sınıflandırmaların sebebi, o atık sınıfında kısmi de olsa başka sınıftan materyal içermesi olabilir. Örneğin cam kavanozların kapakları metal olabildiğinden metal sınıfında yanlış olarak sınıflanabilmektedir.

İlk iki senaryoda AlexNet en kötü sınıflandırma performansını göstermiştir. AlexNet ağının parametre sayısı test edilen ağlar arasında en yüksek 3. olsa da derinliği yeterli gelmemiş olabilir. Pekâlâ ağın derinliğinin fazla olması illa iyi sonuç verecek anlamına gelmez. Ağın organizasyonunun probleme göre uyumlu olması daha yüksek sonuç alınmasını sağlayacaktır [21].

Bu çalışmanın sonuçları tatmin edici olsa da sistemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ağın performansı görüntü kalitesine bağımlıdır. Görüntülerin bir standarda uygun olarak çekilmesi önemlidir ve cisim ortaya konumlanmalıdır. Eğer öyle değilse de ağda başarının sağlanması için cisim önişlemlerle ortalanmalı ve ağa göre görüntü ölçeklenmelidir. Ayrıca eğitim verisinde her sınıfa ait görüntü adedi dengeli olmalıdır.

Bu çalışmada kurulan ağ yapısı ile bahsi geçen sınıflardaki atıklar ayrıştırılabileceği gibi, atıklar arasında sadece ayrıştırılmak istenen bir sınıfa da odaklanılabilir. Örneğin geri dönüştürülebilir olanlar ile geri dönüştürülemeyen atıklar ayrıştırılabilir. Test edilecek görüntünün ağa hangi açıyla verileceği bilinemeyeceğinden, veri artırımında önerilen geometrik dönüşümler uygulanıp, üretilen türevleriyle beraber görüntüler ağa verilebilir. Elde edilen sonuçlar bir komiteden geçirilerek, çoğunluğun kararına göre görüntünün sınıfı tespit edilebilir. Ayrıca tüm senaryoların eğitim süreci incelendiğinde, 200 iterasyonun eğitim süresini gereksiz yere uzattığı ve yaklaşık 80 iterasyonun ağların eğitimi için yeterli olduğu görülmüştür. Ağın ayarları, en iyi doğruluk değerini verdiği iterasyondaki ağırlık değerlerini çekmek üzerine olduğundan, sonuçlar üzerine olumsuz bir etkisi olmamıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü bünyesinde bulunan Yapay Zekâ Laboratuvarı envanterindeki bilgisayar kullanılmıştır.

Kaynakça

[1] Baun, A., Jensen, S. D., Bjerg, P., Christensen, T. H., Nyholm, N. 2000. Toxicity of organic chemical pollution in groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). Environ. Sci. Technol., 34, 1647–1652.

[2] Asase, M., Yanful, E. K., Mensah, M., Stanford, J., Amponsah, S. 2009. Comparison of municipal solid waste management systems in Canada and Ghana: a case study of the cities of London, Ontario, and Kumasi, Ghana. Waste Manag., 29(10), 2779-2786.

[3] Themelis, N. J., Ulloa, P. A. 2006. Methane generation in landfills. Renew. Energy, 32, 1243–1257.

[4] Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. 2012. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban development series; knowledge papers, 15. https://hdl.handle.net/10986/17388. (Erişim Tarihi: 01.02.2025).

[5] Mittal, G., Yagnik, K. B., Garg, M., Krishnan, N. C. 2016. Spotgarbage: smartphone app to detect garbage using deep learning. UbiComp '16: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, 12-16 Eylül, Hamburg, 940-945.

[6] Chu, Y., Huang, C., Xie, X., Tan, B., Kamal, S., Xiong, X. 2018. Multilayer Hybrid Deep-Learning Method for Waste Classification and Recycling. Comput Intell Neurosci., 5060857.

[7] Zhang, Q., Zhang, X., Mu, X., Wang, Z., Tian, R., Wang, X., Liu, X. 2021. Recyclable waste image recognition based on deep learning. Resources, Conservation and Recycling, 171, 105636.

[8] Hossen, M. M., Majid, M. E., Kashem, S. B. A., Khandakar, A., Nashbat, M., Ashraf, A., Hasan-Zia, M., Kunju, A. K. A., Kabir, S., Chowdhury, M. E. 2024. A reliable and robust deep learning model for effective recyclable waste classification. IEEE Access, 12, 13809-13821.

[9] Oza, P., Agrawal, S., Kapadia, M., Raotole, O. 2025. Solid waste classification using deep neural network: A transfer learning approach. Earth Science Informatics, 18(2), 1-25.

[10] Single, S., Iranmanesh, S., Raad, R. 2023. RealWaste [Dataset]. UCI Machine Learning Repository. https://archive.ics.uci.edu/dataset/908/realwaste. (Erişim Tarihi: 14.12.2024).

[11] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. 2017. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Communications of the ACM, 60(6), 84-90.

[12] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., Rabinovich, A. 2015. Going deeper with convolutions. IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 7-12 Haziran, Boston, 1-9.

[13] Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., Chen, L. C. 2018. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 18-23 Haziran, Salt Lake City, 4510-4520.

[14] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. 2016. Deep residual learning for image recognition. IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 27-30 Haziran, Las Vegas, 770-778.

[15] Simonyan, K., Zisserman, A. 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint, arXiv:1409.1556. https://arxiv.org/abs/1409.1556. (Erişim Tarihi: 01.02.2025).

[16] Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., Wojna, Z. 2016. Rethinking the inception architecture for computer vision. IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 27-30 Haziran, Las Vegas, 2818-2826.

[17] de la Rosa, F. L., Gómez-Sirvent, J. L., Sánchez-Reolid, R., Morales, R., Fernández-Caballero, A. 2022. Geometric transformation-based data augmentation on defect classification of segmented images of semiconductor materials using a ResNet50 convolutional neural network. Expert Systems with Applications, 206, 117731.

[18] Shijie, J., Ping, W., Peiyi, J., Siping, H. 2017. Research on data augmentation for image classification based on convolution neural networks. 2017 Chinese Automation Congress (CAC), 20-22 Ekim, Çin, 4165-4170.

[19] Younis, H., Obaid, M. 2024. Performance Comparison of Pretrained Deep Learning Models for Landfill Waste Classification. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 15(11), 689-698.

[20] Single, S., Iranmanesh, S., Raad, R. 2023. RealWaste: A Novel Real-Life Data Set for Landfill Waste Classification Using Deep Learning. Information, 14(12), 633.

[21] Sharma, N., Jain, V., Mishra, A. 2018. An analysis of convolutional neural networks for image classification. Procedia computer science, 132, 377-384.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Optimization of Emulsification Parameters for Chasteberry (*Vitex agnus-castus L.*) Essential Oil Aqueous Nanoemulsions

İlhan Özen*[1], Oğuz Demiryürek[1]

*[1]Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, Melikgazi, Kayseri 38030, Türkiye

(Alınış / Received: 06.02.2025, Kabul / Accepted: 06.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Chasteberry oil, Tween80, Ultrasonication, Nanoemulsion

Abstract: Chasteberry essential oil (CEO) is known as an efficient compound for women's health. However, in order to increase its efficacy, it should be preserved until use. One option for this purpose is to prepare its nanoemulsions. Here, feasibility of CEO nanoemulsion formulation development was reported without the need of co-surfactants and co-solvents employing a simple ultrasonication process, which was complemented by statistical evaluation. To that end, CEO NEs were prepared using an ultrasonic homogenizer using only water as the solvent and Tween80 (T80) as the emulsifier. Variations in the emulsification parameters such as emulsifier concentration (CEO/T80 ratio: 1/0, 1/1, 1/2, and 1/4) and ultrasonication time (0, 1, 5, 10, and 20 min) were tested. Turbidity measurements and morphology analyses were performed in addition to dynamic light scattering measurements. On the basis of statistical evaluation of droplet size and Zeta potential values, the best emulsification process parameters were revealed. The minimum droplet size (estimate: 37 nm) was achieved accompanying by a high Zeta potential value of -36 mV when employed an ultrasonication time of 10.55 min by using T1 (CEO/T80: 1/1). Morphology analyses delivered complementary results.

Hayıtotu (*Vitex agnus-castus L.*) Esansiyel Yağı Sulu Nanoemülsiyonları için Emülsifikasyon Parametrelerinin Optimizasyonu

Anahtar Kelimeler
Hayıtotu Yağı, Tween80, Ultrasonikasyon, Nanoemülsiyon

Öz: Hayıtotu esansiyel yağı (HEY) kadın sağlığı için etkili bir bileşen olarak bilinmektedir. Bununla beraber, etkinliğini arttırmak için HEY'in kullanıma kadar korunması gerekmektedir. Bu amaç için bir seçenek, HEY'in nanoemülsiyonlarını (NE) hazırlamaktır. Burada HEY NE formülasyonlarının basit bir ultrasonikasyonla yüzeyaktif madde ve yardımcı çözgen gereksinimi olmadan yapılabilirliği ve istatistiksel değerlendirmesi raporlanmıştır Bu amaçla HEY NE'ler çözgen olarak sadece su ve emülgatör olarak Tween80 (T80) kullanılarak ultrasonik homojenleştirici ile hazırlanmıştır. Emülgatör konsantrasyonu (HEY/T80 oranı: 1/0, 1/1, 1/2 ve 1/4) ve ultrasonikasyon süresi (0, 1, 5, 10, ve 20 dk.) gibi emülsifikasyon parametrelerindeki varyasyonlar test edilmiştir. Dinamik ışık saçılımı ölçümlerine ilaveten bulanıklık ölçümleri ve morfoloji analizleri gerçekleştirilmiştir. Damlacık boyutu ve Zeta potansiyeli verilerinin istatistiksel değerlendirmesine göre en iyi emülsifikasyon parametreleri ortaya çıkarılmıştır. T1 (HEY/T80: 1/1) kullanılarak 10.55 dk'lık ultrasonikasyon süresinde -36 mV'luk yüksek bir Zeta potansiyeli eşliğinde en küçük damlacık boyutunun (tahmin değeri: 37 nm) elde edilebileceği gösterilmiştir. Morfoloji analizleri tamamlayıcı sonuçlar vermiştir.

*İlgili Yazar, email: iozen@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Essential oils, extracted from medicinal plants and containing a mixture of many bioactive compounds, have always been played a key role for keeping a healthy life [1]. However, they have some drawbacks such as water insolubility, unstability, and volatility, which should be overcome to fully exploit their potential in various fields [2,3]. Making emulsions is one of the easiest ways to improve their efficiency, in which essential oils are dispersed in a solvent (mostly water) as spherical droplets with the help of an emulsifier [4-6].

Emulsifiers are surface active molecules, which positions at the oil-water interface, reduces the interfacial tension, and hinders (or delays) the aggregation of droplets [7]. Typically, its hydrophilic part is in the aqueous phase, while the hydrophobic tail remains enclosed in the oil phase [8,9]. Emulsifiers are classified according to their hydrophilic-lipophilic balance (HLB) values. Water-in-oil (W/O) emulsions are produced using surfactants with a low HLB (3-6) value, while oil-in-water (O/W) emulsions are created with surfactants with a high HLB (8-15) value. Small-molecule non-ionic surfactants such as polyoxyethylene sorbitan fatty acid esters (tweens), sugar esters and monoglycerides are extensively used as emulsifiers [10-13].

Based on their droplet size and stability, there are 3 types of emulsions, i.e., coarse emulsions (1-100 μm), microemulsions (10-100 nm), and nanoemulsions (NE; 20-500 nm) [14-16]. Microemulsion forms spontaneously since its free energy is lower than its phase-separated components. They are optically transparent as the particle size is lesser than the wavelength (typically <100 nm) and weakly scatters light [14]. Nanoemulsions have droplet dimensions similar to the microemulsions ranging from <200 and in some cases <100 nm [17]. Nanoemulsions are not affected by physical and chemical variations including temperature and pH. They require less amount of surfactants for their preparation. Their stability and efficacy is more pronounced than microemulsions [18,19].

Nanoemulsions can be prepared by either bottom up or top-down approach, which are also known as low energy and high energy methods, respectively. In the low energy methods including spontaneous emulsification, emulsion-inversion point, phase-inversion composition, and phase-inversion temperature methods, NEs are prepared by altering the temperature or composition of the oil-water system and the energy input is from the chemical potential of the constituents [20]. The high energy methods involve the use of mechanical devices such as high-pressure homogenizer, micro-fluidizer, or ultrasonicator. Within high-energy methods, ultrasonicators have been the instrument of choice, since they feature advantages such as being easy to operate and clean. Their energy efficiency is high and they provide a good emulsion stability by using less amount of emulsifier [21,22]. Ultrasonicators transform energy into mechanical vibrations transmitted by a probe system, which is directly applied to the sample afterwards [23]. These physical effects disrupt droplets and facilitate the formation of stable O/W and/or W/O emulsions with small droplets size [24].

Chasteberry essential oil (CEO), extracted from *Vitex agnus-castus L.*, is widely used for the treatment of premenstrual syndrome (PMS), menstrual irregularities, fertility disorders, and symptoms of menopause [25]. In addition, CEO has antifungal property against Candida albicans fungus [26-28], being useful for treating itching/irritation in sensitive areas. Despite its well-known beneficial properties for women's health, CEO has been used only a few times in nanoemulsion formulation [29,30]. In the related studies, it is striking that many co-surfactants and co-solvents were employed. In addition, the NEs generated were not statistically evaluated. In our study, we showed for the first time that stable CEO NEs could be generated without the need of many chemicals and cumbersome processing steps. To that end, only water and only Tween80 were used. Tween80 has been chosen due to having an HLB value of 15 [31], which is suitable for preparing aqueous chasteberry oil O/W nanoemulsions. Droplet size and Zeta potential measurement results were statistically evaluated and optimum processing conditions were established.

2. Material and Method

2.1. Materials

Chasteberry essential oil (CEO) (100% pure steam-distilled extract of *Vitex agnus-castus L.*) was supplied by Ahimsa Oils, Australia. According to the manufacturer's declaration, the main components are 1,8-cineole (20.18%), sabinene (19.02%), α-pinene (15.73%), β-Caryophyllene (12.89%) and trans-β-farnesene (6.02%) [32]. Tween80 (T80) and all other chemicals and solvents were purchased from Sigma Aldrich Pty. Ltd, Australia. Ultrapure water (conductivity: 0.055 μS/cm) was used in all experiments.

2.2. Preparation of CEO nanoemulsions

The ratio of CEO to Tween80 (T80) was selected as 1:0, 1:1, 1:2, 1:4. The amount of CEO was adjusted to 125 mg/10 mL NE. To prepare CEO NEs, calculated amounts of T80 were added to water and vortexed for 2 min. Then CEO was added and vortexed again for 2 minutes. Finally, ultrasonication (US) was performed for 0, 1, 5, 10 and 20 min using an Omni Ruptor 400 (Omni International, Inc, USA). For this purpose, a stepped micro processing tip model OR-T156 (diameter: 3.8 mm, length: 25.6 cm) was used. NEs were ultrasonicated at 20 kHz, 50% power (400 Watt), 70% pulse for 0, 1, 5, 10 and 20 minutes. The notations used for CEO NEs are given in Table 1. Just vortexed samples were designated as 0 min ultrasonication.

Table 1. The notation used for preparing CEO NEs.

Oil Phase/Surfactant	Ratio	Notation				
		0 min	1 min	5 min	10 min	20 min
CEO/T80	1/0	W.0	W.1	W.5	W.10	W.20
	1/1	WT1.0	WT1.1	WT1.5	WT1.10	WT1.20
	1/2	WT2.0	WT2.1	WT2.5	WT2.10	WT2.20
	1/4	WT4.0	WT4.1	WT4.5	WT4.10	WT4.20

2.3. Characterizations

2.3.1. pH, electrical conductivity and surface tension of CEO nanoemulsions

The pH and electrical conductivity of CEO NEs were measured using a pH meter (Mettler Toledo SevenEasy pH-Meter) and conductivity meter (TPS, WP-Plus), respectively. Surface tension measurements were carried out using Attension Theta Flow Premium Contact Angle Optical Tensiometer (nanoScience Instruments Inc.) in air atmosphere and at room temperature. The surface tension of the raw materials and nanoemulsions were measured using the Pendant Drop method with 3-4 µL droplets at ambient temperature, 30% relative humidity and calculated using the Young/Laplace method. All measurements were performed in triplicate.

2.3.2. Ultra-violet visible spectroscopy analysis of CEO nanoemulsions

Turbidity of CEO NEs was determined by measuring the absorbance at 600 nm with a Varian Cary 300 UV-Vis spectrophotometer with/without dilution [33]. Ultrapure water was used as blank sample.

2.3.3. Dynamic light scattering (DLS) analysis of CEO nanoemulsions

To determine droplet size and Zeta potential of CEO NEs, DLS measurements were carried out at 25ºC Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical Ltd, UK). It yields the mean droplet size as well as the polydispersity index (PDI), which represents the droplet size distribution. PDI values < 0.1 and >0.3 mean a very narrow and a very broad distribution, respectively [34]. Before measurements, 0,1 ml of nanoemulsions were diluted with 50 mL water and the pH was adjusted to 7,0 using buffer solution.

2.3.4. Statistical analysis for droplet size and Zeta potential of CEO nanoemulsions

The results obtained from Zetasizer Nano ZS measurements were evaluated in Design Expert®6.06 software by a statistical method using a general factorial design by determining surfactant amount, ultrasonication time and days as factors and droplet size (d50) and Zeta potential as response. ANOVA was applied to assess the statistical significance of the variations. The statistical significance of each factor was assessed by setting the significance level at $p \leq 0.05$. The contribution (%) of each factor on the respective response was also assessed.

2.3.5. Microscopy characterizations of CEO nanoemulsions

Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) characterizations were performed for evaluating morphology of the NEs generated. For the SEM, one drop 500 times diluted CEO NE was placed on silicon wafer. The samples were dried at 50°C overnight. Subsequently, the stubs were coated with platinum. An accelerating voltage of 2-5 kV was used using a Zeiss Supra 1555 VP field emission gun scanning electron microscope, secondary electron detector. For the TEM, a 3 µl of 500 times diluted CEO NE was placed on the 300 mesh copper grid and stained with ammonium molybdate aqueous solution (2 wt.%, pH:5,16) [35]. The stained samples were characterized at 200 kV by using JEOL 2100 LaB6 transmission electron microscope. (Figure 1). Sample preparation of nanoemulsions for TEM was as follows: A 300 mesh copper grid was taken from the grid holder (Figure 1.a) and it was held with tweezer on a Whatman filter paper carbon coated side face up (Figure

1.b). Using the side blot method, a 3 µL droplet of the sample was placed on the copper grid and waited for 1 min (Figure 1.c). The edge of the grid was touched to a sheet of filter paper to pull off the liquid through capillary action (Figure 1.d). Next, two 50 µL droplets of ultrapure water (Figure 1.e, designated as 1 and 2) and two 50 µL droplets of staining agent solution (2% ammonium molybdate pH:5,16) (Figure 1.e, designated as 3 and 4) were placed on a sheet of laboratory film (parafilm). The grid was touched gently to water droplet and lifted off a small droplet onto the surface of the grid (Figure 1.f). Then, the edge of the grid was touched to a sheet of filter paper to pull off the liquid through capillary action (Figure 1.g). This action was repeated twice. Afterwards, the grid was touched gently to the staining solution (Figure 1.h) and held for 10-15 sec. Then, the edge of the grid was touched to a sheet of filter paper to pull off the liquid through capillary action (Figure 1.i). This action was repeated twice as well. Finally, the TEM grid prepared with the sample was allowed to dry at ambient conditions and put it back to its holder before characterization (Figure 1.j).

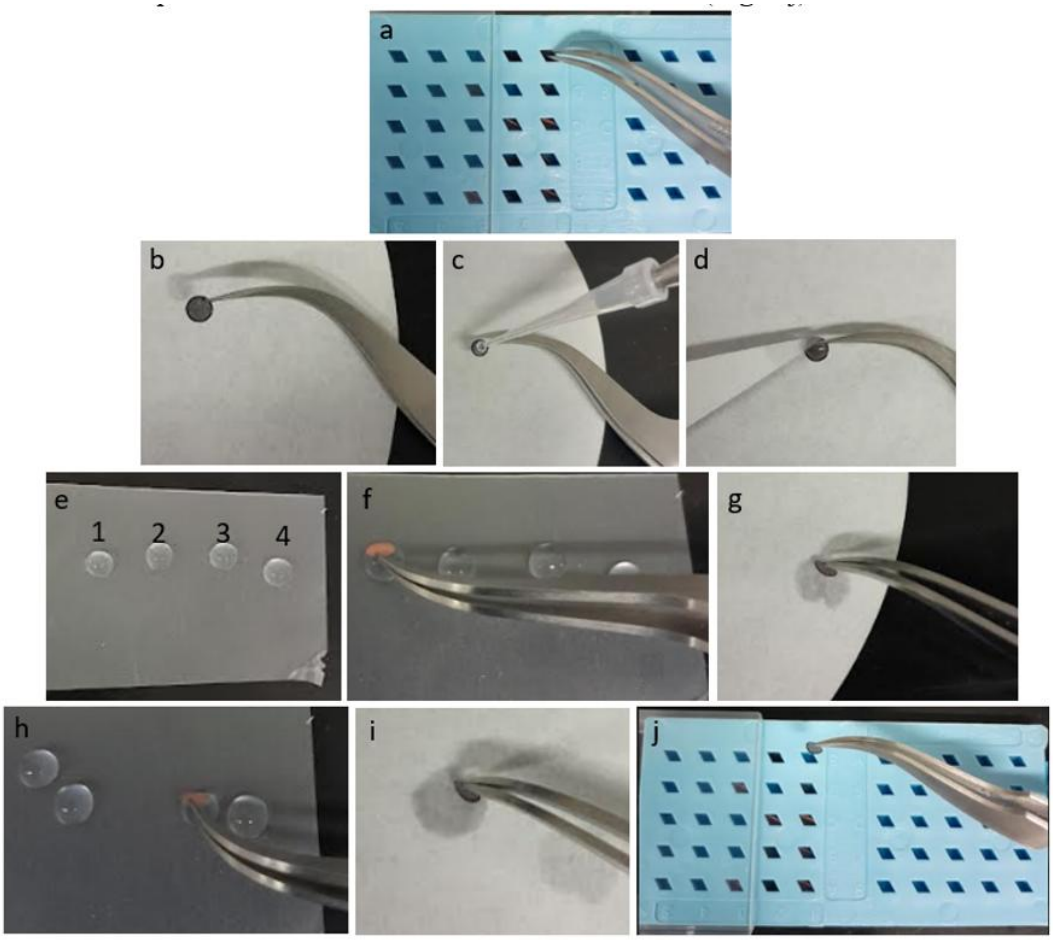


Figure 1. Sample preparation steps for TEM characterization. a. Taking a copper grid from the grid holder, b. Holding the grid with tweezer on a filter paper, c. Putting the sample droplet on the grid, d. Touching the edge of the grid to a sheet of filter paper, e. Putting droplets of ultrapure water (#1 and #2) and droplets of staining agent solution (#3 and #4) on a sheet of laboratory film (parafilm), f. Touching the grid to water droplet, g. Touching the edge of the grid to a sheet of filter paper, h. Touching the grid to the staining solution, i. Touching the edge of the grid to a sheet of filter paper, j. Putting the dried grid back to its holder.

3. Results

3.1. pH, electrical conductivity, and surface tension of CEO nanoemulsions

The results for pH, electrical conductivity and surface tension of the CEO NEs are given in Table 2. Water has a pH of 5.53±0.02. Regardless of the ultrasonication time, the surfactant-free CEO NEs showed almost identical pH values ranging from 6.20±0.02 to 6.32±0.01. Apparently, addition of CEO increased the pH value slightly. All other NEs containing different amounts of T80 led to further increase of the pH due to surfactant. However, the pH values were nearly the same, changing between 7.20±0.02 and 7.26±0.03.

The electrical conductivity of the water used was found to be 0.055 µS/cm. CEO NEs prepared without surfactant resulted in increased conductivity values with an increase in ultrasonication time. (17.2±1.2 µS/cm for W.0 and 27.1±1.6 µS/cm for W.20). Incorporation of the surfactant (WT1: NEs with 1/1 CEO/T80) resulted in further

increase of the conductivity values (29.1±2.1 µS/cm for WT1.0 and 34.0±1.3 µS/cm for WT1.20). Furthermore, conductivity was improved by increasing the T80 amount. According to these results, addition of T80 increased the electrical conductivity of the CEO NEs prepared. Nonetheless, the values are generally low, varying between 34.1±3.1 and 39.7±3.1 µS/cm.

Water exhibits a high surface tension value of 71.26±0.24 mN/m. In contrast, the neat T80 and the neat CEO exhibited substantially lower surface tension values of 31.68±0.05 and 27.61±0.32 mN/m, respectively. Furthermore, CEO NEs prepared exclusively using CEO yielded surface tension values ranging from 43.19±0.94 mN/m (W.0) to 49.83±0.13 mN/m (W.20). The incorporation of the T80 led to a further decline in surface tension values. However, the values didn't change depending on the ultrasonication time (39.45±0.15 mN/m for WT1.0 and 39.72±0.14 mN/m for WT1.20).

Table 2. pH, electrical conductivity, and surface tension of CEO NEs.

Notation	pH	Electrical Conductivity (μScm^{-1})	Surface Tension (mNm^{-1})
W.0	6.30±0.01	17.2±1.2	43.19±0.94
W.1	6.32±0.02	19.1±2.0	46.61±0.60
W.5	6.20±0.02	23.7±0.9	47.01±0.89
W.10	6.26±0.03	25.0±0.5	47.99±0.23
W.20	6.32±0.01	27.1±1.6	49.83±0.13
WT1.0	7.26±0.02	29.1±2.1	39.45±0.15
WT1.1	7.20±0.02	32.7±3.0	39.05±0.35
WT1.5	7.26±0.03	34.3±0.1	38.27±0.16
WT1.10	7.20±0.02	33.2±0.5	38.33±0.09
WT1.20	7.26±0.03	34.0±1.3	39.72±0.14
WT2.0	7.22±0.04	34.1±3.1	38.60±0.10
WT2.1	7.27±0.02	35.7±2.0	38.81±0.16
WT2.5	7.31±0.01	36.1±2.9	39.05±0.21
WT2.10	7.22±0.02	36.4±1.5	39.53±0.17
WT2.20	7.28±0.05	35.9±2.3	39.84±0.22
WT4.0	7.38±0.02	37.4±3.0	39.64±0.08
WT4.1	7.30±0.04	37.7±1.1	40.09±0.14
WT4.5	7.19±0.16	38.1±2.8	40.18±0.09
WT4.10	7.21±0.07	37.2±4.5	40.45±0.16
WT4.20	7.31±0.03	39.7±3.1	40.02±0.17

3.2. Optical transparency of CEO nanoemulsions

Visual images were taken and transparency measurements were performed in freshly prepared (0th day) and aged (42nd day) CEO NEs (Figure 2). The CEO NE prepared in the absence of US and T80 (W.0) delivered a transparent solution. Just vortexing without ultrasonication might have led to a microphase separation of oil and water which cannot be visible to the naked eye. On the other hand, independent of ultrasonication time, all CEO NEs had a blurry appearance.

Considering the NEs prepared by using surfactant delivered different results. An increase in both T80 concentration and ultrasonication time resulted in an appreciable color change in the emulsions from cloudy to clear appearance. The sample with CEO/T80 ratio of 1/1 (WT1) was slightly blurry before ultrasonication. Only 1-minute US (WT1.1) led to a totally blurry appearance. However, increasing the US time improved the transparency gradually. A ultrasonication time of 10 min (WT1.10) delivered a fully transparent solution. Increasing the time to 20 min made the solution slightly blurry again. The samples with other oil-to-surfactant ratios (1/2 (WT2) and 1/4 (WT4)) delivered the same results. Increasing the surfactant amount to 1/4 only changed the appearance of the 1-minute ultrasonicated sample (WT4.1) more transparent comparatively.

Considering the visual images together with absorbance values at 600 nm, following results were obtained: The samples prepared with CEO/T80 ratio of 1/4 and ultrasonicated delivered the most transparent solutions (0.1621 for 5 min US (WT4.5), 0,0872 for 10 min US (WT4.10), and 0,0000 for 20 min US (WT4.20)). Some ultrasonicated samples with CEO/T80 ratios of 1/1 and 1/2 also depicted quite close values (0,0250 for WT1.10, 0,0238 for WT2.10). Considering the same formulations after 42 days, all of them were only slightly blurrier than the freshly prepared ones. They delivered nearly the same results.

3.3. Statistical analysis for droplet size of CEO nanoemulsions

Before statistical evaluation of the results, droplet size, polydispersity index (PdI), and Zeta potential values are given in Table 3, Table 4, and Table 5, respectively.

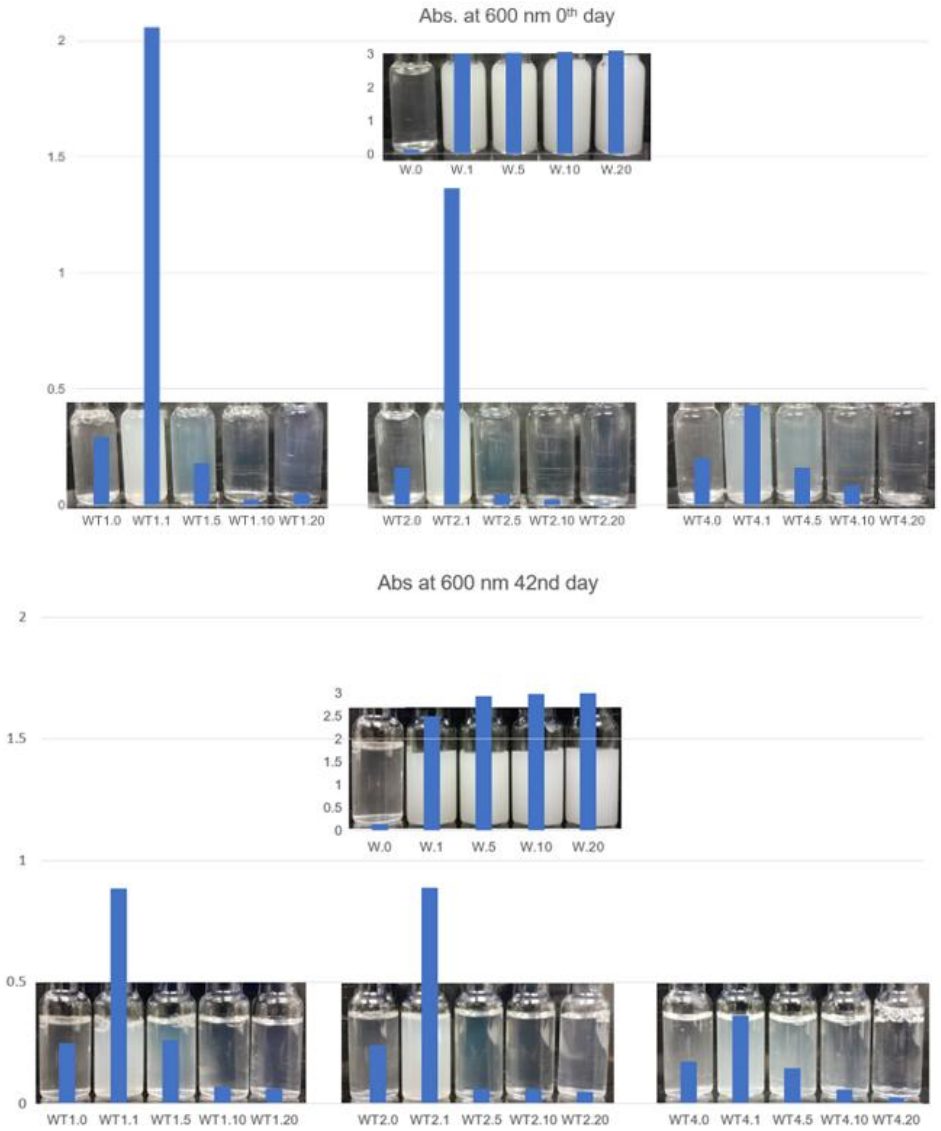


Figure 2. Physical appearance and turbidity values of freshly prepared (0th day) and aged (42nd day) CEO NEs at 600 nm depending on T80 amount.

Table 3. Droplet sizes of CEO NEs.

Notation	0 day		7 day		14 days		28 days		42 days	
	Z-Aver. (nm)	STD Dev.	Z-Aver. (nm)	STD Dev.	Z-Aver. (nm)	STD Dev.	Z-Aver. (nm)	STD Dev.	Z-Aver. (nm)	STD Dev.
W.0	376	67	648	26	563	34	865	12	847	81
W.1	299	7	288	7	303	1	386	41	316	6
W.5	326	1	356	4	306	8	359	51	324	3
W.10	289	8	390	6	308	13	324	1	378	46
W.20	258	12	315	6	396	2	364	37	376	16
WT1.0	259	15	213	78	250	11	340	39	495	15
WT1.1	221	14	214	18	299	15	357	32	360	11
WT1.5	100	43	110	8	140	2	170	39	283	46
WT1.10	65	2	48	1	131	4	190	8	232	46
WT1.20	229	101	246	43	395	8	338	40	371	33
WT2.0	192	15	248	26	139	25	207	2	278	17
WT2.1	175	2	192	5	194	7	279	4	241	50
WT2.5	53	3	63	0	97	4	191	6	201	22
WT2.10	51	3	71	33	51	4	128	28	126	27
WT2.20	39	3	33	8	79	0	100	47	75	6
WT4.0	157	18	78	2	212	17	219	71	169	16
WT4.1	243	6	270	22	276	33	309	54	287	12
WT4.5	238	4	205	17	213	18	207	22	241	5
WT4.10	50	5	60	2	52	8	244	42	235	1
WT4.20	26	3	22	4	30	6	84	3	63	10

Table 4. PdI values of CEO NEs.

Notation	0 day		7 days		14 days		28 days		42 days	
	PdI	STD Dev.	PdI	STD Dev.	PdI	STD Dev.	PdI	STD Dev.	PdI	STD Dev.
W.0	0.428	0.063	0.625	0.051	0.530	0.029	0.787	0.031	0.729	0.016
W.1	0.405	0.041	0.439	0.010	0.479	0.056	0.411	0.007	0.495	0.001
W.5	0.393	0.037	0.401	0.016	0.508	0.034	0.594	0.031	0.46	0.045
W.10	0.363	0.016	0.479	0.090	0.420	0.006	0.472	0.059	0.465	0.045
W.20	0.308	0.059	0.360	0.030	0.485	0.003	0.533	0.016	0.369	0.014
WT1.0	0.438	0.021	0.472	0.272	0.336	0.016	0.353	0.012	0.469	0.008
WT1.1	0.391	0.056	0.424	0.016	0.396	0.073	0.372	0.017	0.388	0.022
WT1.5	0.323	0.081	0.401	0.054	0.214	0.001	0.389	0.026	0.387	0.043
WT1.10	0.456	0.001	0.505	0.032	0.272	0.023	0.361	0.011	0.306	0.009
WT1.20	0.442	0.082	0.497	0.001	0.403	0.197	0.246	0.084	0.374	0.146
WT2.0	0.734	0.121	0.528	0.115	0.534	0.161	0.341	0.020	0.463	0.024
WT2.1	0.413	0.005	0.472	0.015	0.520	0.102	0.488	0.074	0.471	0.129
WT2.5	0.381	0.017	0.346	0.007	0.577	0.142	0.358	0.021	0.237	0.046
WT2.10	0.304	0.406	0.307	0.093	0.533	0.032	0.381	0.040	0.403	0.128
WT2.20	0.466	0.028	0.524	0.255	0.545	0.009	0.398	0.017	0.696	0.001
WT4.0	0.724	0.032	0.729	0.066	0.771	0.144	0.547	0.001	0.302	0.083
WT4.1	0.601	0.016	0.653	0.011	0.652	0.003	0.403	0.038	0.334	0.011
WT4.5	0.521	0.023	0.621	0.056	0.607	0.091	0.495	0.096	0.371	0.039
WT4.10	0.501	0.120	0.586	0.018	0.521	0.154	0.345	0.051	0.391	0.007
WT4.20	0.577	0.182	0.677	0.026	0.573	0.033	0.498	0.056	0.770	0.090

Table 5. Zeta potential values of CEO NEs.

Notation	0 day		7 day		14 days		28 days		42 days	
	Zeta (mV)	STD Dev.	Zeta (mV)	STD Dev.	Zeta (mV)	STD Dev.	Zeta (mV)	STD Dev.	Zeta (mV)	STD Dev.
W.0	-33.5	2.1	-33.1	2.1	-38.5	0.2	-35.2	3.5	-31	4.7
W.1	-39.8	0.4	-31.1	0.4	-35.9	1	-35.2	0.4	-29.6	1.5
W.5	-34.7	0.2	-38.1	0.7	-35.9	1.2	-30	1.7	-32.8	1.1
W.10	-40	0.8	-43.8	1.9	-39.7	0.4	-33.4	0.4	-32.9	1.1
W.20	-42.3	0.6	-37.8	0.3	-37.3	0.6	-34	0.3	-35	1
WT1.0	-41.1	1.1	-34.2	2.1	-28.8	3.7	-19.5	9.7	-11.4	2.5
WT1.1	-37.6	0.5	-37.1	3.5	-25.6	0.5	-19.9	7.5	-18.5	6.5
WT1.5	-36.3	5.5	-39.6	3.6	-33.4	3.9	-18.1	6.5	-18.6	0.4
WT1.10	-33.6	3.4	-40.3	1.8	-29.6	0.5	-19	1.1	-21.7	2.6
WT1.20	-36	3.3	-38.7	4.2	-30.1	1.5	-16.8	0.6	-18.9	1.4
WT2.0	-36.9	1.8	-34.7	2.6	-31.2	0.8	-25	9	-21.9	6.5
WT2.1	-41.5	1	39.1	2.1	-32	0.9	-24	2.7	-21	0.1
WT2.5	-37	2.5	-36.1	2.6	-30.3	1.2	-20.2	3.6	-21.6	0.3
WT2.10	-37.7	3.5	-37.4	1.6	-31.4	2.5	-26.3	2.8	-26.7	1.5
WT2.20	-34.4	2.6	-37.2	2.2	-33.6	3.8	-25.5	3.5	-24.5	2.5
WT4.0	-35.9	0.3	-37.9	5.5	-32.6	8.5	-30.3	0.5	-19	4.9
WT4.1	-34.1	3.3	-38.5	6.8	-32.5	5.2	-23	2.3	-20	1.7
WT4.5	-33.6	7.3	-36.4	4	-34.3	7.4	-23.8	1.6	-21.2	7
WT4.10	-38.9	1.1	-39.5	2.7	-31.4	1.9	-25.5	1.1	-18.3	1.6
WT4.20	-35.6	2.1	-37.5	3	-28.2	5.5	-20.2	1.8	-15	2.2

To reveal optimum emulsification conditions, droplet size (d_{50}) of CEO NEs were evaluated statistically. The statistical analysis was started with model selection. Following the entry of the droplet size data into the Design Expert® 6.06 software, the model with the largest sum of squares, F-values, the smallest p-value (Prob > F), the largest R-squared and the smallest PRESS (Predicted Errors Sum of Squares) can be recommended. The cubic model that mostly satisfied the mentioned conditions was suggested for the analysis of droplet sizes, although linear model and quadratic model had the largest F-value than the cubic model.

To judge the statistical significance of the variations, ANOVA was applied by using general factorial design considering surfactant amount, ultrasonication time, and days as input variables and droplet size as response variable. The results are shown in Table 6, which will be evaluated in Section 4. Discussion and Conclusion.

Table 6. ANOVA table for droplet size of CEO NEs.

Source	Sum of Sq.	Contribution %	DF	Mean Sq.	F-value	Prob > F	
Model	1069597	89,8626	27	39614,7	21,99701	< 0.0001	**significant**
A	561207,1	47,15004	3	187069	103,8746	< 0.0001	**significant**
B	101056,9	8,490337	1	101056,9	56,11427	< 0.0001	**significant**
C	116720,9	9,806355	1	116720,9	64,81209	< 0.0001	**significant**
B^2	66983,08	5,62761	1	66983,08	37,19396	< 0.0001	**significant**
C^2	1109,082	0,09318	1	1109,082	0,615845	0.4354	Not significant
AB	103536,2	8,698634	3	34512,06	19,16365	< 0.0001	**significant**
AC	37089,45	3,116085	3	12363,15	6,864936	0.0004	**significant**
BC	237,0451	0,019915	1	237,0451	0,131625	0.7179	Not significant
B^3	1376,991	0,115688	1	1376,991	0,764607	0.3850	Not significant
C^3	2854,512	0,239823	1	2854,512	1,585036	0.2124	Not significant
AB^2	106315,4	8,932132	3	35438,47	19,67806	< 0.0001	**significant**
AC^2	1163,805	0,097778	3	387,935	0,21541	0.8854	Not significant
B^2C	4929,818	0,414181	1	4929,818	2,7374	0.1027	Not significant
BC^2	4377,673	0,367792	1	4377,673	2,430808	0.1237	Not significant
ABC	9767,088	0,820586	3	3255,696	1,807803	0.1541	Not significant
Residual	120661,2	10,1374	67	1800,913			
Cor.Total	1190258	100	94				

The regression equations according to surfactant amount emerged from the developed model are shown below.

No Surfactant

Average Droplet Size = 337,2729 - 0,12733xB - 3,27491xC - 0,70267xB^2 + 0,173656xC^2 + 0,588343xBxC + 0,029597xB^3 - 0,00281xC^3 - 0,01166xB^2xC - 0,00527xBxC^2

Surfactant Amount T1

Average Droplet Size = 244,4407 - 36,3297xB - 0,04795xC + 1,265108xB^2 + 0,222846xC^2 + 0,364877xBxC + 0,029597xB^3 - 0,00281xC^3 - 0,01166xB^2xC - 0,00527xBxC^2

Surfactant Amount T2

Average Droplet Size = 191,4485 - 19,8582xB -1,71995xC + 0,008023xB^2 + 0,202649xC^2 + 0,412459xBxC + 0,029597xB^3 - 0,00281xC^3 - 0,01166xB^2xC - 0,00527xBxC^2

Surfactant Amount T4

Average Droplet Size = 235,875 - 9,54106xB - 2,26773xC - 0,751xB^2 + 0,178067xC^2 + 0,552195xBxC + 0,029597xB^3 - 0,00281xC^3 - 0,01166xB^2xC - 0,00527xBxC^2

The regression contour plots are demonstrated in Figure 3 according to surfactant amount by determining the regression equations. Here x-axis represents ultrasonication time, y-axis shows the days, contours show the droplet size of CEO NEs. The results of the contour plots will be evaluated and discussed in Section 4. Discussion and Conclusion.

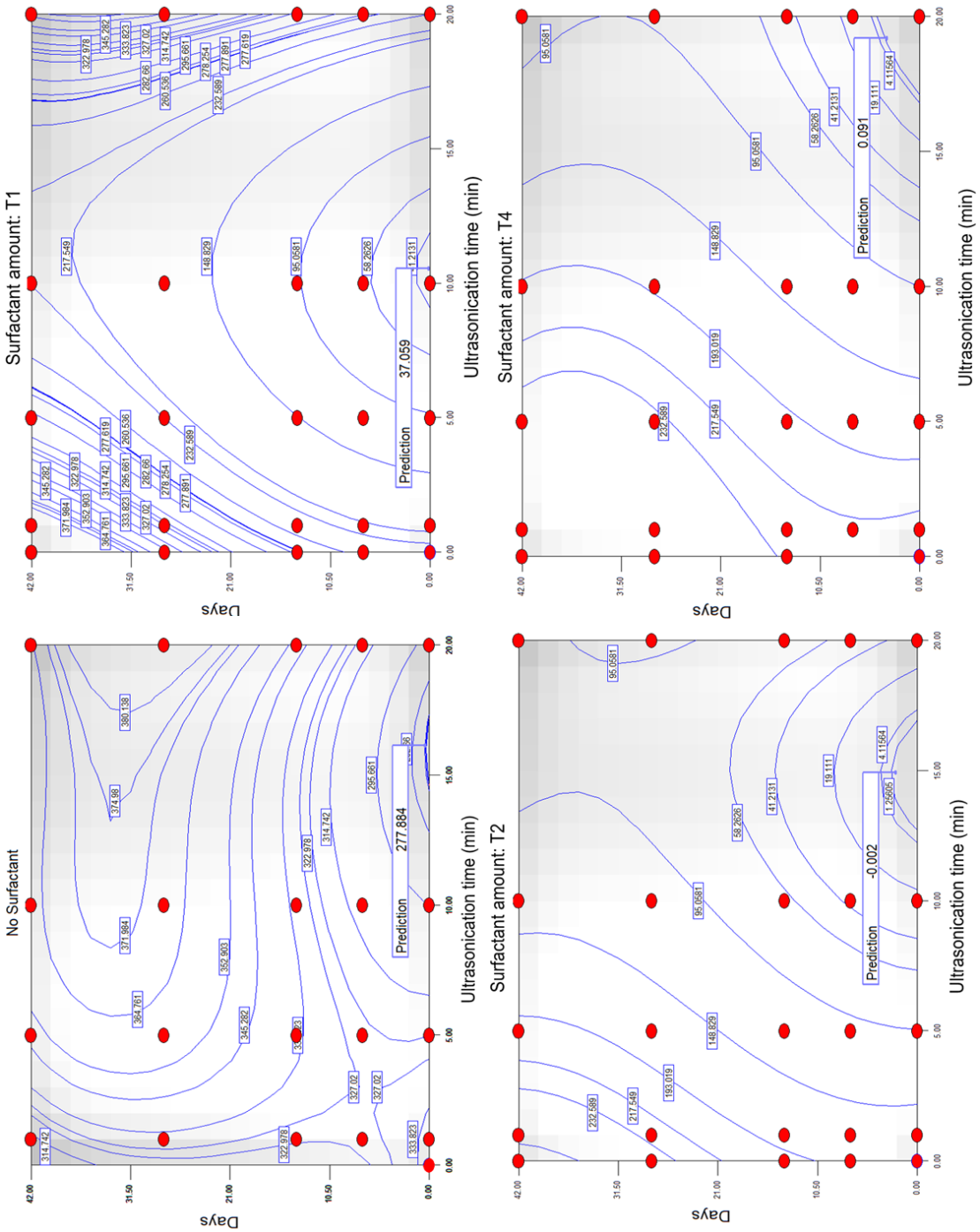


Figure 3. Regression contour plots for droplet size of CEO NEs without surfactant and with surfactant (T1, T2, and T4).

3.4. Morphology of CEO nanoemulsions

The SEM images are illustrated in Figure 4. In order to facilitate a comparison between the results of SEM with those of DLS measurements, the droplet sizes observed in the SEM images were subject to a coarse quantitative analysis based on visual inspection. The results are presented in Table 7, alongside the DLS results obtained from the optimised processing conditions. The results obtained from the SEM characterisation appear to be analogous to those obtained from the DLS measurements.

Laborious sample preparation process, time-consuming measurements, and limited availability of TEM restricts its use. Therefore, only the CEO NE prepared using a CEO/T80 of 1/1 and ultrasonicated for 10 min (WT1.10) was used for the TEM characterization (Figure 5). According to the TEM image, droplet size of ca. 50-150 nm was observed, which was in accordance with the DLS results (65±2 nm).

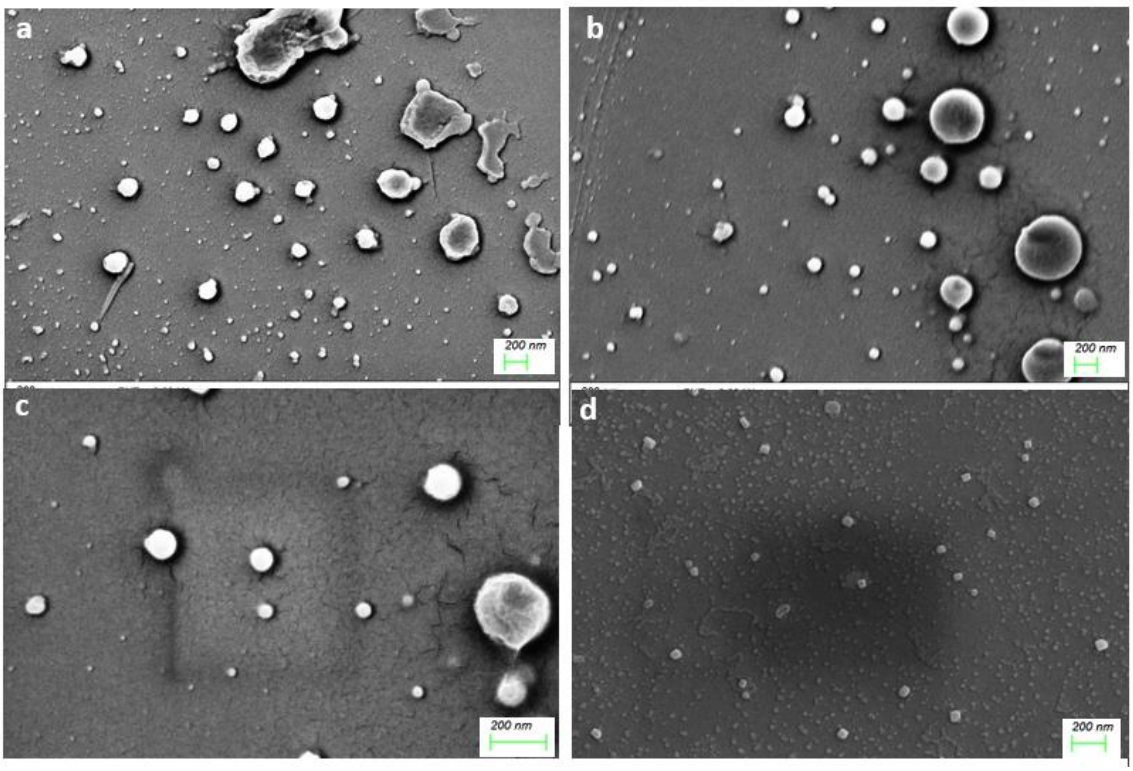


Figure 4. SEM images of CEO NEs (a: W.0, b: W.10, c; WT1.0, d: WT1.10).

Table 7. Rough comparison of droplet sizes of CEO NEs obtained from SEM and DLS.

Notation	Droplet Size (nm)	
	SEM	DLS
W.0	200-300	376±67
W.10	100-300	289±8
WT1.0	80-300	259±15
WT1.10	<100	65±2

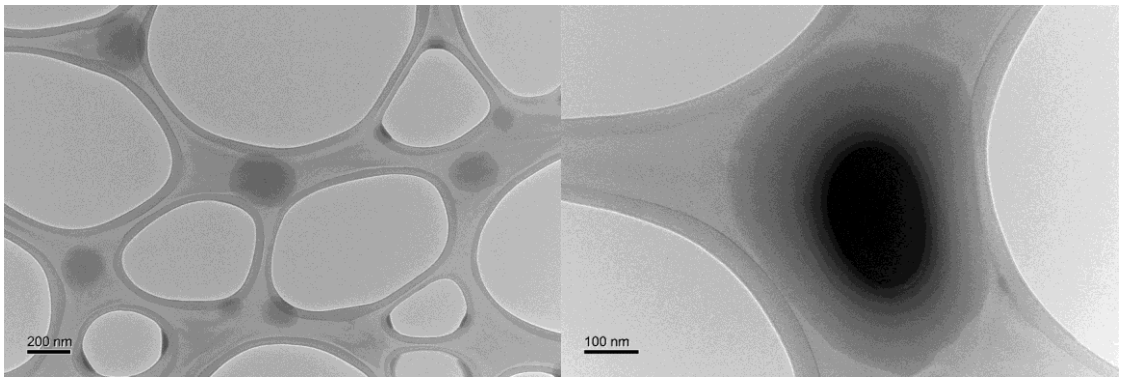


Figure 5. TEM image of the CEO NE (WT1.10).

4. Discussion and Conclusion

The purpose of this study was to reveal optimum processing conditions for chasteberry essential oil nanoemulsions. Considering visual inspection and UV-Vis evaluation of the CBO NEs, it can be said that the distinctive color change observed during the generation of emulsion could be attributed to the Rayleigh scattering effect due to the formation of nano-sized droplets [36]. Accordingly, transparency of the emulsions might be an indication of the presence of nano-sized droplets. Even the aged NEs showed the same result meaning that they kept their stability even after 42 days. The formation was a non-spontaneous process due to its positive Gibbs free energy. However, surfactant/emulsifier could reduce this positive free energy, thereby improving its spontaneous character and the stability of the NEs [6,37].

Statistical evaluation of droplet size values of CBO NEs delivered the following results: According to Table 6, the model developed explains 89,86% of the droplet sizes with these data. In addition, surfactant amount (A), ultrasonication time (B), and days (C) are significant parameters on the droplet size. However, the most significant

factor on droplet size is the surfactant amount (A) with 47,15% contribution. ultrasonication time (B+B2) and the day (C+C2) have 14,12% and 9,9% contributions on the droplet size, respectively.

When all contour plots in Figure 3 are considered, it can be concluded that the minimum droplet size (Prediction: 37.059 nm) can be achieved by determining days:0 and ultrasonication time as 10.55 min by using T1 (CEO/T80: 1/1). It is astonishing to note that the optical transparency values literally supported the statistical analysis results of the droplet size. Accordingly, a CEO/T80 of 1/1 employing an US time of 10 min (WT1.10) delivered the most transparent and the smallest droplet sizes.

Considering all results, following conclusions can be drawn: Droplet sizes of chasteberry essential oil nanoemulsions increased with increasing aging time. The presence of a very broad droplet size distribution in all NEs indicates that ultrasonication alone is inadequate for achieving a narrow distribution. All NEs exhibited relatively high Zeta potential absolute values (>30). Despite the decrease in Zeta potential values over time, they were found to be generally stable, even in the long term.

This study showed that chasteberry essential oil containing nanoemulsions could be prepared by employing a simple ultrasonication using only water and a surfactant. Statistical analyses results of the droplet size values delivered complementary results in addition to physical appearance and turbidity measurement results. The prepared nanoemulsions were also shown to be stable in the long-term and could be used in cream and/or gel formulations for women's health, where storage stability is important. As a future study, chasteberry essential oil will be provided from different sources and related formulations are planned to prepare and compare their efficacy.

Acknowledgment

This work was supported by the TUBITAK 2219 International Post-doctoral Research Fellowship Program for Turkish Citizens [grant number 1059B191900929]. Prof. Minoo Naebe from Deakin University, Australia was greatly acknowledged for her kind support.

References

[1] Christaki, E., Bonos, E., Giannenas, I., Florou-Paneri, P. 2012. Aromatic plants as a source of bioactive compounds. Agriculture, 2(3), 228–243.

[2] Bakry, A.M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M.Y. et al. 2016. Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15 (1), 143-182.

[3] Turek, C., Stintzing, F.C. 2013. Stability of essential oils: a review, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 12 (1), 40-53.

[4] Acosta, E. 2009. Bioavailability of nanoparticles in nutrient and nutraceutical delivery, Current Opinion in Colloid and Interface Science, 14(1), 3-15.

[5] McClements, D.J., Decker, E.A., Weiss, H. 2007. Emulsion-based delivery systems for lipophilic bioactive components, Journal of Food Science, 72(8), R109-R124.

[6] Tadros, T., Izquierdo, P., Esquena, J., Solans, C. 2004. Formation and stability of nano-emulsions, Advances in Colloid and Interface Science, 108, 303-318.

[7] Taha, A., Ahmed, E., Ismaiel, A., Ashokkumar, M., Xu, X. et al. 2020. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions, Trends in Food Science & Technology, 105, 363-377.

[8] Chung, C., Sher, A., Rousset, P., Decker, E.A., McClements, D.J. 2017. Formulation of food emulsions using natural emulsifiers: Utilization of quillaja saponin and soy lecithin to fabricate liquid coffee whiteners, Journal of Food Engineering, 209: 1-11.

[9] van Nieuwenhuyzen, W. 2015. Production and utilization of natural phospholipids. Polar Lipids: Biology, Chemistry, and Technology. The Netherlands: AOCS Press.

[10] Kralova, I., Sjöblom, J. 2009. Surfactants used in food industry: a review, Journal of Dispersion Science and Technology, 30, 1363-1383.

[11] Leser, M.E., Sagalowicz, L., Michel, M., Watzke, H.J. 2006. Self-assembly of polar food lipids, Advances in Colloid and Interface Science, 123-126, 125–136.

[12] Ziani, K., Chang, Y., McLandsborough, L., McClements, D.J. 2011. Influence of surfactant charge on antimicrobial efficacy of surfactant-stabilized thyme oil nanoemulsions, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59, 6247-6625.

[13] Hait, S.K., Moulik, S.P. 2001. Determination of critical micelle concentration (CMC) of nonionic surfactants by donor-acceptor interaction with lodine and correlation of CMC with hydrophile-lipophile balance and other parameters of the surfactants, Journal of Surfactants and Detergents, 4, 303–309.

[14] Anton, N., Vandamme, T.F. 2011. Nano-emulsions and micro-emulsions: clarifications of the critical differences, Pharmaceutical Research, 28, 978-985.

[15] Gupta, A., Eral, H.B., Hatton, T.A., Doyle, P.S. 2016. Nanoemulsions: formation, properties and applications. Soft Matter, 12(11), 2826-2841.

[16] McClements, D.J. 2012. Nanoemulsions versus microemulsions: terminology, differences, and similarities. Soft Matter, 8(6), 1719-1729.

[17] Saifullah, M., Ahsan, A., Shishir, M.R.I. 2016. "Production, stability and application of micro- and nanoemulsion in food production and the food processing industry," in Nanotechnology in the Agri-Food Industry, Emulsions, ed A. M. Grumezescu (Cambridge, MA: Academic Press), 405–442.

[18] Patel, R.B., Patel, M.R., Thakore, S.D., Patel, B.G. 2017. Chapter 17 - Nanoemulsion as a Valuable Nanostructure Platform for Pharmaceutical Drug Delivery, Editor(s): Alexandru Mihai Grumezescu. Nano- and Microscale Drug Delivery Systems, Elsevier, 321-341.

[19] Tunç, E.N., Kaplan, A.B.U., Kılınboz, Y.F., Çetin, M. 2023. Nanoemulsion formulation containing carbamazepine and levetiracetam: Development and in vitro characterization, İstanbul Journal of Pharmacy, 53(2), 133-139.

[20] Bouchemal, K., Briançon, S., Perrier, E., Fessi, H. 2004. Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: solvent, oil and surfactant optimisation, International Journal of Pharmaceutics, 280, 241-251.

[21] Chemat, F., Zill-E-Huma, Khan, M.K. 2011. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction, Ultrasonics Sonochemistry, 18 (4), 813-835.

[22] Li, W., Leong, T.S.H., Ashokkumar, M., Martin, G.J.O. 2017. A study of the effectiveness and energy efficiency of ultrasonic emulsification, Physical Chemistry Chemical Physics, 20 (1), 86-96.

[23] Jafari, S.M., Assadpoor, E., He, Y., Bhandari, B. 2008. Re-coalescence of emulsion droplets during high-energy emulsification, Food Hydrocolloids, 22, 1191-1202.

[24] Cucheval, A., Chow, R.C.Y. 2008. A study on the emulsification of oil by power ultrasound, Ultrasonics Sonochemistry, 15(5), 916-920.

[25] Puglia, L.T., Lowry, J., Tamagno, G. 2023. Vitex agnus castus effects on hyperprolactinaemia, Frontiers in Endocrinology, 14, 1-9.

[26] Keikha, N., Shafaghat, M., Mousavi, S.M., Moudi, M., Keshavarzi, F. 2018. Antifungal effects of ethanolic and aqueous extracts of vitex agnus-castus against vaginal isolates of Candida albicans, Current Medical Mycology, 4(1), 1-5.

[27] Asdadi, A., Hassani, L.M.I., Chebli, B., Moutaj, R., Gharby, S. et al. 2014. Chemical composition and antifungal activity of vitex agnus-castus l. seeds oil growing in Morocco. J. Mater. Environ. Sci., 5(3), 823-830.

[28] Özen, İ., Demiryürek, O., Ceylan, A., Kaplan, A.B.U, Çetin, M. et al. 2024. Sustainable bio-sourced nanoemulsions: Pectin-based delivery systems for vitex essential oil and its therapeutic potentials. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 1–13.

[29] Piazzini, V., Monteforte, E., Luceri, C., Bigagli, E., Bilia, A.R. et al. 2017. Nanoemulsion for improving solubility and permeability of Vitex agnus-castus extract: formulation and in vitro evaluation using PAMPA and Caco-2 approaches, Drug Delivery, 24(1), 380-390.

[30] Chinese Patent, J.W.P.D., CO, 2010. Vitex oil nanoemulsion and preparation method thereof, CN101773578A.

[31] Kassem, M.G.A., Ahmed, A.M.M., Abdel-Rahman, H.H., Moustafa, A.H.E. 2019. Use of Span 80 and Tween 80 for blending gasoline and alcohol in spark ignition engines, Energy Reports, 5, 221-230,

[32] Ahimsa Oils, 2023. Chaste Tree (Vitex) Oil, (Access Date: 10.04.2023).

[33] Nirmala, M.J., Durai, L., Gopakumar, V., Nagarajan, R. 2020. Preparation of celery essential oil-based nanoemulsion by ultrasonication and evaluation of its potential anticancer and antibacterial activity, International Journal of Nanomedicine, 15, 7651-7666.

[34] Scholz, P., Keck, C.M. 2015. Nanoemulsions produced by rotor–stator high speed stirring, International Journal of Pharmaceutics, 482 (1-2), 110-117.

[35] Salvia-Trujillo, L., Rojas-Graü, M.A., Soliva-Fortuny, R., Martín-Belloso, O. 2013. Effect of processing parameters on physicochemical characteristics of microfluidized lemongrass essential oil-alginate nanoemulsions, Food Hydrocolloids, 30, 401-407.

[36] Mason, T.G., Wilking, J.N., Meleson, K., Chang, C.B., Graves, S.M. 2006. Nanoemulsions: formation, structure, and physical properties, Journal of Physics: Condensed Matter, 18(41), R635.

[37] Hasani, F., Pezeshki, A., Hamishehkar, H. 2015. Effect of surfactant and oil type on size droplets of betacarotene-bearing nanoemulsions, International Journal of Current Microbiology Applied Sciences, 4(9), 146-155.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Galvanizli Çelik Boru Dirseklerinin Üretim Sürecine Bağlı Mekanik Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Tuba Demirel*[1], Eyyup Gerçekcioğlu[2], İrem Küçük[1], Zeynep Danışman[3], Adil Burak Külek[1]

*[1]Hasan Kalyoncu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep
[2]Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri
[3]Hasan Kalyoncu Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

(Alınış / Received: 08.02.2025, Kabul / Accepted: 14.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Sonlu Elemanlar Yöntemi,
Gerilme Analizi,
Üretim İş Akışı,
Malzeme Davranışı

Öz: Galvanizli çelik havalandırma boru sistemlerinde, boru ve dirsek elemanları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 6 adet dirsek bağlantı elemanının soğuk şekillendirme sonrası kaynaklı imalatla birleştirilme süreci teorik ve uygulamalı olarak değerlendirilmiştir. Solidworks 2020 Simulation yazılımı kullanılarak oluşturulan boru tasarım modeli, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analizlerde borunun gerilme dağılımları ve dirsek üzerindeki toplam deformasyon incelenmiştir. Von Mises gerilme analizi sonuçları, yükün elastik deformasyon bölgesinde kaldığını ve güvenli çalışma şartlarına uygun olduğunu göstermiştir. Malzemenin akma mukavemeti ve Von Mises gerilme değerleri, uygulanan kuvvet ve sınır şartları dikkate alındığında güvenilir bulgular sunmaktadır. 3D modelleme ve statik analiz yöntemleri sayesinde prototip üretim öncesinde zaman kaybının önüne geçileceği öngörülmektedir.

Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Galvanized Steel Pipe Elbows Depending on the Manufacturing Process

Keywords

Finite Element Method,
Stress Analysis,
Manufacturing Workflow,
Material Behavior

Abstract: Galvanized steel ventilation pipe systems frequently utilize pipe and elbow components. In this study, the process of joining six elbow connection components through welded fabrication after cold forming was theoretically and experimentally evaluated. The pipe design model, created using Solidworks 2020 Simulation software, was analyzed using the finite element method. The stress distributions of the pipe and the total deformation on the elbow were examined in the analyses. The results of the Von Mises stress analysis showed that the applied load remained within the elastic deformation range and met safe working conditions. The yield strength of the material and Von Mises stress values provided reliable findings, considering the applied forces and boundary conditions. It is anticipated that 3D modeling and static analysis methods will prevent time loss caused by unsuccessful trials before prototype production.

*İlgili Yazar, tuba.demirel@hku.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde iklimlendirme amacıyla yaygın olarak kullanılan havalandırma boru sistemleri, sistem verimliliği ve iç mekan hava kalitesi açısından önemlidir. Bu boruların üretimindeki kaynaklı birleştirme bağlantılarında, kaynak bölgesinin ani soğuması sonucunda artık gerilmeler oluşmaktadır. Boru tasarımı, esas olarak gerilme analizine bağlıdır. Boru hatlarındaki aşırı yükleme ile aşırı gerilim/yorgunluk ile oluşan akma, bağlantı noktalarında sızıntı, borulardaki hareketlerden kaynaklı bağlantı teçhizatı üzerindeki tahrip edici yükler ve aşırı itme, boru desteklerinde kopmaya sebep olmaktadır [1-4]. Bu gerilmelerin analizinde sonlu elemanlar tabanlı bilgisayar programları yardımcı olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikte karmaşık fiziksel problemlerin çözümü için kullanılan bir sayısal analiz tekniğidir. Analiz için geometrik elemanlar düğüm ve noktalara ayrılmalıdır. Sonuçlar bu noktalar üzerindeki değerlerden elde edilir [5]. Statik simülasyon, bir malzemenin statik yüklere dayanma yeteneğini belirler ve yükün etkilerini iş parçası üzerine dağıtmaktadır [6].

Ay ve ark., AISI 316L (EN 1.4404) kalite paslanmaz çelikten üretilen dirsek boruların üretim sürecini incelemiştir. Gerilme dağılımları ve toplam deformasyon değişimleri analiz edilerek, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve üretim parametreleri optimize edilmiştir. Et kalınlıklarının, EN 10243-4 standardına göre 152,4 mm çapındaki borular için belirlenen toleranslar içinde olduğu tespit edilmiştir. Analizler, 20, 25, 30, 35 ve 40 saniyelik işlem süreleriyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, maksimum gerilmenin, bükme yarıçapının dış tarafında ve hidrolik iticinin temas ettiği bölgede oluştuğu belirlenmiştir. Üretim hatalarının önlenmesi için, yağlama koşullarının ve kalıp yüzey pürüzlülüğünün uygun seviyede olması, ayrıca kaynak ağzı açma işleminin standartlara uygun yapılması önerilmiştir. Toplam deformasyonun, erkek kalıba temas eden bölgede maksimum seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Süre ve gerilme kuvvetleri karşılaştırıldığında ise, 25 saniyelik işlem süresi optimum değer olarak belirlenmiş ve bu sürenin işçilik ile maliyet açısından tasarruf sağladığı ortaya konmuştur [7].

Xie ve Yue, denizaltı boru hatlarının genellikle deniz tabanına döşendiğini ve bu süreçte bükme, eksenel gerilim, boru üzerindeki tepki kuvvetinin etkileri altında büyük deformasyonların meydana geldiğini belirtmiştir. Bükülmüş boruların karşı karşıya olduğu riskler de artmaktadır. Boru üzerindeki ortalama basınç kuvveti yaklaşık 400 kN olarak ölçülmüştür. Model testlerinden elde edilen kuvvet sonuçları, sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlara kıyasla biraz daha düşük çıkmıştır. Bu farkın, test modeli ile sonlu elemanlar modeli arasındaki kaçınılmaz yapısal farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Eksenel gerilim, eğilme momenti, tepki kuvveti ve gemi hareketinin yüksek birleşik yükleri, boru hattında plastik deformasyona neden olabilir ve bu deformasyonun doğru şekilde ölçülmesi oldukça zordur. Aşırı bükülme nedeniyle oluşan gerilme ve deformasyonların doğru bir şekilde tespit edilmesi, boru hasarlarını önlemek ve operasyonel parametrelerin optimize edilmesini sağlamak için etkili bir yöntem sunmaktadır [8].

Gök ve ark., çelik sacların soğuk şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan problemleri çözmek için bilgisayar destekli non-lineer sonlu elemanlar yazılımı (DYNAFORM 5.0) kullanmıştır. Şekillendirme sürecindeki gerilme, deformasyon ve kalıp tasarımı gibi sorunlar daha doğru bir şekilde analiz edilmiş ve optimize edilmiştir. Bu, üretim verimliliğini artırmış ve ürün kalitesini iyileştirmiştir [9]. Geri dönüştürülebilir özelliğiyle sürdürülebilir kalkınma ve yeşil ekonomi hedeflerine katkı sağlayan galvanizli sac, havalandırma boru üretiminde çinko kaplaması sayesinde korozyona karşı koruma sağlayarak kaynak bölgelerinin paslanmasını önlemektedir. Kolay şekillendirilebilen ve dayanıklı bir malzeme olan galvanizli sac da, özellikle kalın cidarlı bölümlerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında otomatik gaz altı kaynakları (örneğin, MIG/MAG veya TIG) ve punto, elektrot kaynakları bulunmaktadır. Bu yöntemler, yüksek kaliteli ve güvenilir kaynak dikişleri sağlamak için tercih edilmektedir [8-10]. EN 10346:2015, galvanizleme, alaşımlama veya diğer koruyucu kaplama işlemleriyle üretilen düşük karbonlu çelik levha ve şeritlere yönelik bir üretim standardıdır. DX51D, sıcak daldırma galvanizli çelik sacların bir sınıfıdır ve EN 10346 standardı kapsamında tanımlanır. Bu tür çelikler genellikle iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu sınıfta bulunan çelik grubunun mekanik özelliklerine bakıldığında; Akma Sınırı (R_e): en fazla 280 MPa, Çekme Mukavemeti (R_m): en fazla 500 MPa, Uzama (A_{80}): Minimum %22 (>=0.50 mm kalınlıkta) olmalıdır [11, 12]. Bir malzeme, elastik şekil değiştirme bölgesinde kalırsa kalıcı deformasyon oluşmaz. Tasarımda, malzemenin mekanik özellikleri bu bölgeye göre hesaplanır ve yük kaldırıldığında malzeme eski haline dönerse kalıcı deformasyon meydana gelmez. Bunun için yükle oluşan gerilmenin, malzemenin akma mukavemetinden küçük olması gerekir [13]. Bir yapısal elemanda güvenlik faktörü (SF — Safety Factor), yapının maksimum dayanabileceği gerilmenin, uygulanan çalışma gerilimine oranı olarak tanımlanır. Yani malzemenin akma dayanımının, yük altında oluşan maksimum gerilmeye oranıdır. Tasarım mühendisliğinde genellikle 1'in oldukça üzerinde bir güvenlik katsayısı (s) kullanılır (örneğin: 1,5; 2 veya daha yüksek). Eğer bu katsayı 1'in altındaysa, malzeme veya yapı, uygulanan gerilme altında kalıcı deformasyona uğrayabilir [14].

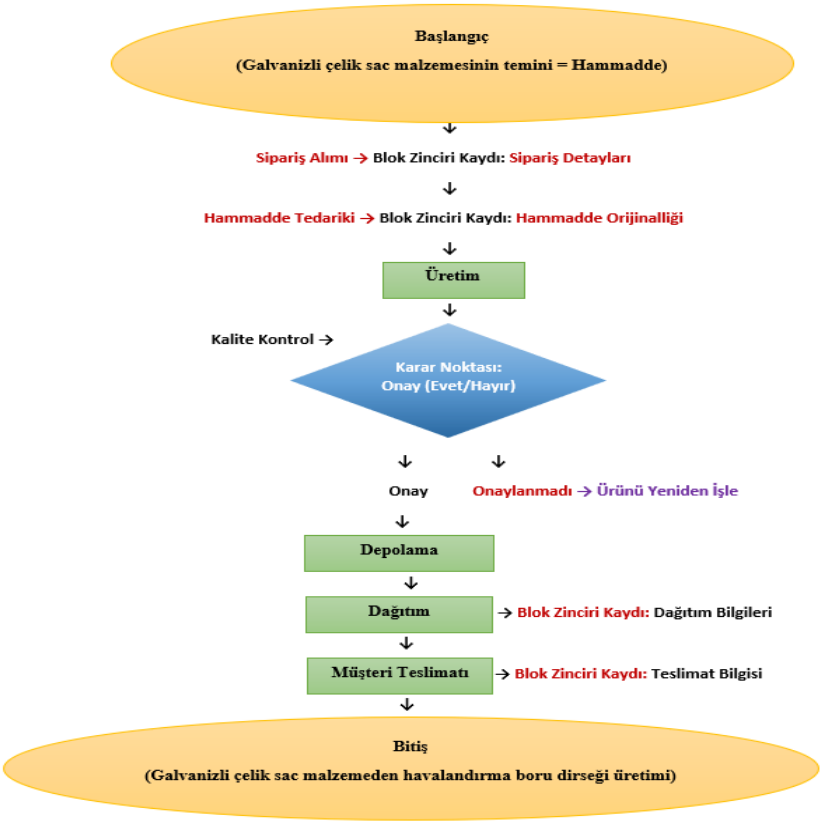
Boru tasarımı, temel olarak gerilme analizine dayanmaktadır ve iyi analiz edilmiş yapılar daha dayanıklı ve maliyet açısından daha avantajlıdır. İnce galvanizli sac malzeme şekillendirilirken, özellikle karmaşık kalıp geometrilerinde yırtılma gibi hatalar kritik sorunlar yaratabilir ve üretim sürecini olumsuz etkileyebilir. Bu çalışmada, bükülerek elde edilen 6 boru parçasının kaynaklanmasıyla oluşturulan galvanizli havalandırma borusunun statik analizi, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgelerine kuvvet yüklemesi uygun olmadığından, yalnızca borunun kendi statik ağırlığı dikkate alınmıştır. Havalandırma borusunun dayanabileceği maksimum yük, katalog değerlerine göre analiz edilmiştir. Solidworks 2020 yazılımı kullanılarak şekillendirme sürecinde oluşabilecek gerilme ve deformasyon parametreleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, üretim sürecinde şekillendirme işlemi sırasında uygulanan yük altında boru dirseğinin yapısal dayanım sınırlarını sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile sayısal olarak analiz etmek ve bu süreç için optimum şekillendirme yükü değerini belirlemektir. Yapılan analizlerde; malzeme özellikleri, geometrik toleranslar ve sınır şartları dikkate alınarak şekillendirme işlemi sırasında oluşabilecek maksimum gerilme ve deformasyon bölgeleri tespit edilmiştir. Böylece, üretim sürecinde ortaya çıkabilecek istenmeyen

deformasyonların ve yapısal zafiyetlerin önüne geçilmesi amaçlanmakta, aynı zamanda malzeme performansının korunması ve üretim kalitesinin artırılması sağlanmaktadır. Çalışmada ayrıca deneysel verilerle sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır.

2. Havalandırma Borusu Üretimindeki İş Akışı

Proses akış modeli, imalat sürecinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu süreçteki potansiyel sorunları tespit etmeye yardımcı olmuştur. Bu model, tedarik zincirinin her aşamasında blok zinciri teknolojisinin her aşamadaki veri akışının nasıl sağlandığını göstermektedir (Şekil 1).



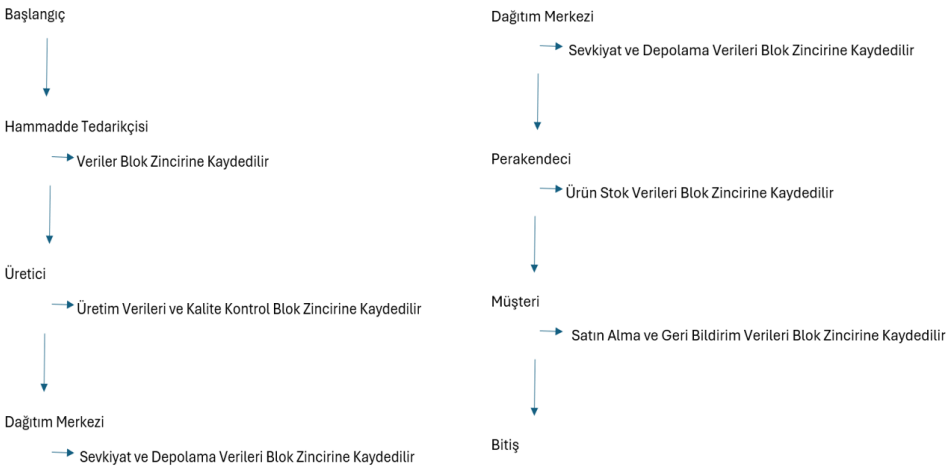
Şekil 1. Üretim hattındaki iş akış modeli

Bu çalışmada, tedarik zinciri yönetim süreçlerinde blok zinciri (blockchain) teknolojisinin entegrasyonu ele alınmış ve bu teknolojinin sağladığı yapısal avantajlar detaylı olarak değerlendirilmiştir. Blok zinciri; değiştirilemez ve şeffaf veri yapısı sayesinde, tedarik zincirinin tüm aşamalarında veri güvenliği, izlenebilirlik ve işlem doğruluğu sağlamaktadır. Her işlem veya veri girişi, blok zinciri sisteminde kriptografik olarak imzalanan bağımsız bloklar hâlinde kaydedilmekte ve bu bloklar birbirine zaman damgası ve hash değerleri ile bağlı olarak eklenmektedir. Blok zinciri teknolojisi, her işlem veya veri girişini bir blok olarak kaydeder ve her yeni blok, önceki bloğun verilerini doğrulayarak güvenliği sağlar.

Bu sistem sayesinde, üretimden nihai kullanıcıya kadar olan tüm süreçlerde sahtecilik, veri manipülasyonu ve hatalı işlem riski minimize edilmekte, aynı zamanda sistemdeki her işlem geri izlenebilir ve denetlenebilir hâle gelmektedir. Özellikle tedarik zincirinin karmaşık ve çok aktörlü yapısı göz önünde bulundurulduğunda, blok zinciri ile elde edilen veri bütünlüğü ve şeffaflık, tedarik zinciri yönetiminde önemli bir güven unsuru oluşturmaktadır.

Çalışmada sunulan Şekil 2'deki blok zinciri entegrasyonlu iş akış diyagramı ve pseudocode ise bu sürecin işleyiş mantığını hem görsel hem algoritmik düzeyde açıklamıştır. Pseudocode yapısı, sistemin temel algoritmik mantığını basitleştirilmiş bir dilde aktararak, veri akışının ve blok zincirinin nasıl yapılandığının sistematik bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu diyagram ve kod, veri akışını ve blok zincirinin nasıl oluşturulduğunu anlamayı kolaylaştırarak teknolojinin uygulanabilirliğini ve faydalarını açıkça göstermeyi amaçlar. Bu modelde, entegrasyonun en önemli katkıları arasında; gerçek zamanlı veri paylaşımı, süreç optimizasyonu, hataların hızlı tespiti, maliyet kontrolü ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi yer almaktadır. Ayrıca, sistemin sahip olduğu değiştirilemez veri yapısı, yasal uyumluluk ve denetim süreçlerinde de önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Ürün üretildiğinde, üretim verileri dijital olarak kaydedilmekte ve blok zincirine bir blok olarak eklenmektedir. Her yeni blok, önceki blokların bütünlüğünü kontrol ederek doğrulama işleminden geçmektedir. Tedarik zincirinin her aşamasında benzer şekilde veri girişleri yapılmakta ve zincir sürekli olarak genişlemektedir. Böylelikle zincir üzerindeki tüm işlemler dağıtık defter (distributed ledger) yapısı sayesinde herkes tarafından erişilebilir ve denetlenebilir hâle gelmektedir.



Şekil 2. Pseudocode blok zinciri

Bu çalışmada, galvanizli sac malzemesinin kullanıldığı havalandırma borusu üretim süreci, firmanın standart iş akış modeline uygun olarak toplam yedi aşamada sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tosyalı Toyo Çelik A.Ş firmasından galvanizli sac malzemesi temin edilmiştir (Şekil 3) [10]. Üretim aşamaları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir. Bu üretim akışı, malzeme kaybını minimumda tutarak, seri ve standardize üretimi mümkün kılan bir sistematik sunmaktadır. Ayrıca her adımda, ürün kalitesinin ve iş güvenliğinin sağlanması için endüstriyel standartlara uygunluk gözetilmektedir:

1. Boyutlandırma işlemi: Üretime başlanmadan önce kullanılacak galvanizli sac levhanın geometrik boyutları belirlenmiştir. Bu aşama, ürünün teknik resmine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde TS EN 1505:2000 standardında belirtilen boyut ve tolerans kriterleri dikkate alınmıştır (Şekil 3a).

2. Kesme işlemi: Belirlenen boyutlara uygun olarak CNC kontrollü sac levha kesme makinesi yardımıyla hassas şekilde kesilmiştir. Kesim işlemi sırasında, ±0,5 mm imalat toleransı sağlanarak, sonraki işlemlerin hassasiyeti güvence altına alınmıştır. Kesim işlemi, üretim toleranslarını sağlamak ve sonraki işlemlerin doğruluğunu garanti altına almak açısından kritik öneme sahip olmuştur (Şekil 3b).

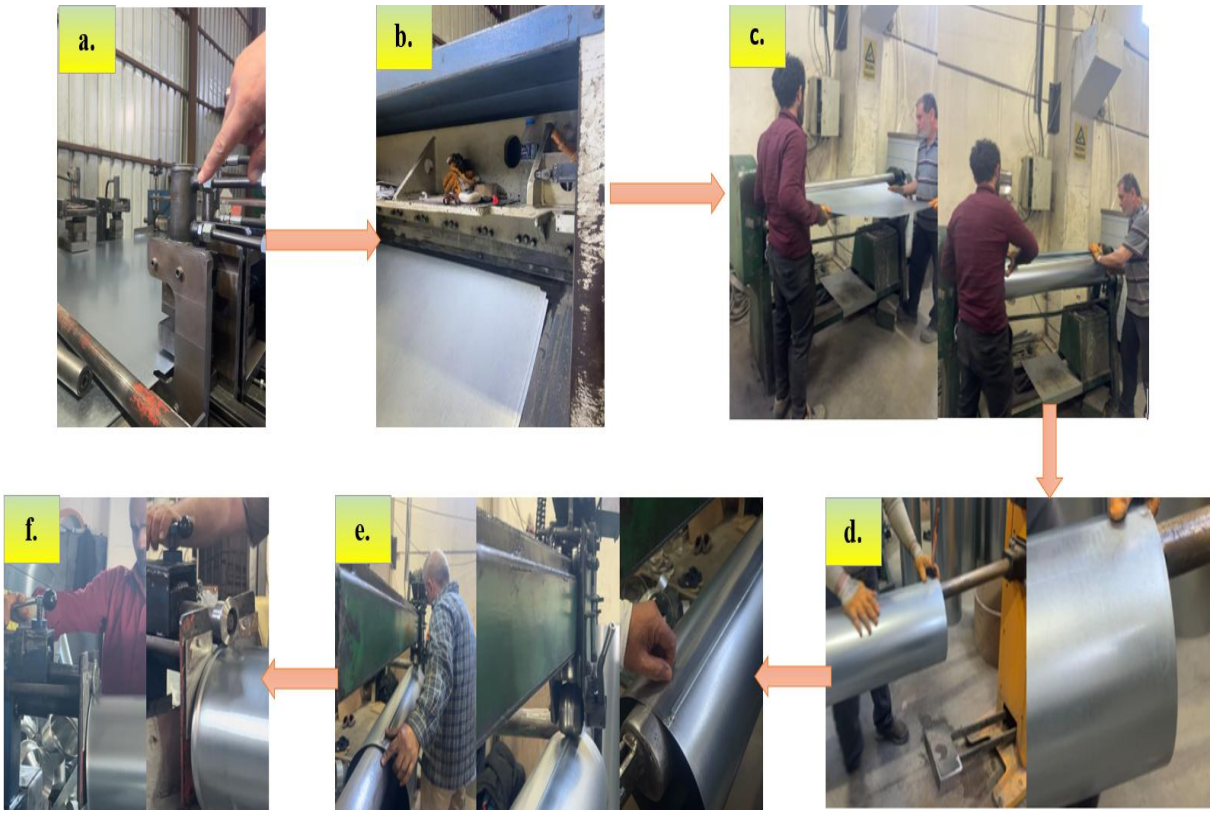
3. Bükme ve Şekillendirme işlemi: Kesilen sac levhaların kenarları, hidrolik pres bükme makineleri yardımıyla istenilen açı ve yarıçapta bükülmüştür. Ardından, silindirik formu elde etmek amacıyla rulo şekillendirme makineleri kullanılmıştır. Bu aşamada sac kalınlığı olarak seçilen 0,7 mm, hem şekillendirme kolaylığı hem de yeterli yapısal dayanım sağlamıştır (Şekil 3c).

4. Puntalama işlemi: Şekillendirilmiş sacın birleşim bölgelerine geçici olarak puntalama kaynağı uygulanmıştır. Bu işlem, nihai kaynağın düzgün ve hizalı yapılabilmesi için bir ön bağlama yöntemidir (Şekil 3d).

5. Birleştirme ve Sızdırmazlık işlemi: Puntalanmış bölgeler, kenetleme ve sıkıştırma işlemi ile tamamen birleştirilmiştir. Bu işlem, sac kenarlarının birbirine geçirilmesi ve mekanik sıkıştırma yöntemiyle sızdırmazlık sağlanmasını mümkün kılmıştır. Bu aşamada, TS EN 10143:2006 standardına uygun tolerans ve sızdırmazlık değerleri kontrol edilmiştir (Şekil 3e).

6. Kenetleme İşlemi: Borunun uç kısımlarına, montaj kolaylığı sağlamak amacıyla kenetleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, boruların montaj esnasında birbirine bağlanabilmesi için gerçekleştirilmiştir. Uçlardan

birine tek kenarlı, diğerine ise çift kenarlı kenetleme yapılırak bağlantı sırasında uygun geçme ve sızdırmazlık sağlanmıştır (Şekil 3f).



Şekil 3. Havalandırma borusunun üretim aşaması (a-f)

7. Kaynak işlemi: Üretim sürecinin son aşamasında, şekillendirilmiş iki boru parçası eksenel doğrultuda hizalanarak, üst üste getirilip giydirme yöntemiyle birleştirilmiştir (Şekil 4). Galvanizli çelik sac levhalar, rulo şekillendirme makinelerinde silindirik boru formuna dönüştürüldükten sonra, boru kenarları ilk olarak direnç (punta) kaynağı yöntemiyle geçici olarak birleştirilmiştir. Bu işlem, parçaların eksenel hizalanmasını sağlamak, kaynak sırasında oluşabilecek çarpılmaları kontrol altına almak ve montaj toleranslarını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Geçici puntalama işleminden sonra, gaz altı kaynağı (MIG/MAG) yöntemi kullanılarak puntalanan bölgeler üzerinden kaynak dikişi oluşturulmuştur. Burada, kaynak sırasında uygulanan ısı girdisi dikkatle kontrol edilerek, galvanizli malzemenin kaplama yapısında oluşabilecek bozulmaların ve çinko buharlaşmasının önüne geçilmiştir. Ayrıca, kaynak parametreleri (akım, gerilim, hız, ısı girdisi) malzeme kalınlığı olan 0,7 mm'ye uygun şekilde optimize edilmiştir. Böylece kaynak sonrası deformasyon, çarpılma ve gerilme birikimi en aza indirgenmiştir.

Son aşamada ise, daha yüksek yapısal bütünlük ve sızdırmazlık sağlamak amacıyla, manuel ark (elektrot) kaynağı yöntemi uygulanmıştır. Bu işlem, özellikle MIG/MAG kaynağının ulaşamadığı, geometrik olarak zor erişilen noktalarda kaynak sürekliliğini ve mekanik dayanımı sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Yapılan kaynak işlemi, TS EN ISO 15614-1, TS EN ISO 5817 ve TS EN 10219 standartlarında belirtilen kaynak dikişi kalitesi, boyutsal toleranslar ve mekanik özellik kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çok aşamalı kaynak yöntemiyle birlikte, boru elemanlarının birleşim bölgelerinde homojen kaynak dikişleri, minimum deformasyon, optimum mukavemet ve standartlara uygun tolerans değerleri sağlanarak, üretim kalitesi ve yapısal güvenilirlik artırılmıştır.



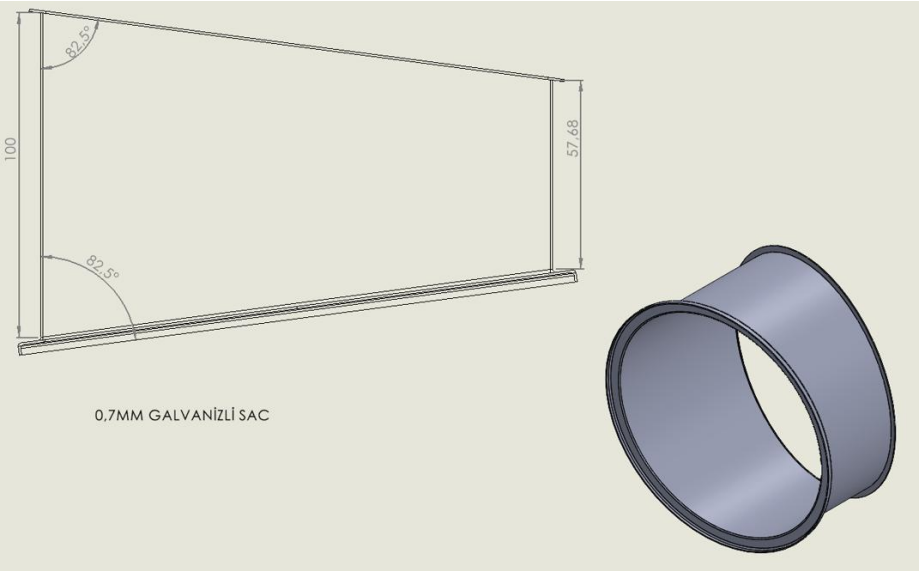
Şekil 4. Birleştirilmiş boru dirseklerinin 6 adet bağlantı elemanları

Galvanizli çelik boru dirseklerinin üretim süreci ile sonlu elemanlar yöntemi arasında önemli bir bağ vardır. Üretim süreci sırasında uygulanan işlemler (örneğin, şekillendirme, kaynaklama, galvanizleme) malzemenin mekanik özelliklerini, yüzey pürüzlülüğünü ve iç gerilmelerini etkiler. Bu faktörler, sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme modelleme parametrelerini doğrudan etkiler ve analiz sonuçlarının doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Üretim sürecindeki sıcaklık değişimleri, mekanik deformasyonlar ve galvanizleme işlemi, çelik borunun mukavemet, elastiklik modülü ve akma dayanımı gibi özelliklerini değiştirir. Sonlu elemanlar yönteminde doğru sonuçlar elde edebilmek için bu parametrelerin analize doğru şekilde dahil edilmesi gerekir. Üretim sırasında oluşabilecek mikro çatlaklar, iç gerilmeler ve yüzey kusurları, dirseğin yük taşıma kapasitesini ve yorulma dayanımını etkiler. Bu kusurların etkilerinin simüle edilmesi, üretim sürecindeki kritik aşamaların belirlenmesine yardımcı olabilir. Şekillendirme sürecinde oluşan geometrik deformasyonlar ve tolerans sapmaları, dirseklerin çalışma performansını etkileyebilir. Bu deformasyonların çalışma koşullarında ne tür sonuçlara yol açabileceğini öngörmek için kullanılabilir. Üretim sürecindeki belirli parametrelerin optimize edilmesine olanak tanır. Kullanılan çelik türü, galvanizleme yöntemi veya şekillendirme basıncı gibi parametreler, sonlu elemanlar simülasyonları ile test edilerek maliyet, dayanıklılık ve performans açısından en uygun üretim süreci geliştirilebilir. Bu bağlamda, sonlu elemanlar analizi ve üretim süreci, birbiriyle etkileşimli olarak değerlendirilmelidir. Üretim sürecindeki her aşama, sonlu elemanlar modellemesine temel oluştururken, sonuçları da üretim sürecini optimize etmek ve ürün kalitesini artırmak için geri besleme sağlamaktadır. İş akış şemasında her bir adım, detaylı inceleme ve doğrulama gerektirebilir, bu nedenle her adımı dikkatlice takip etmek önemlidir.

3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme

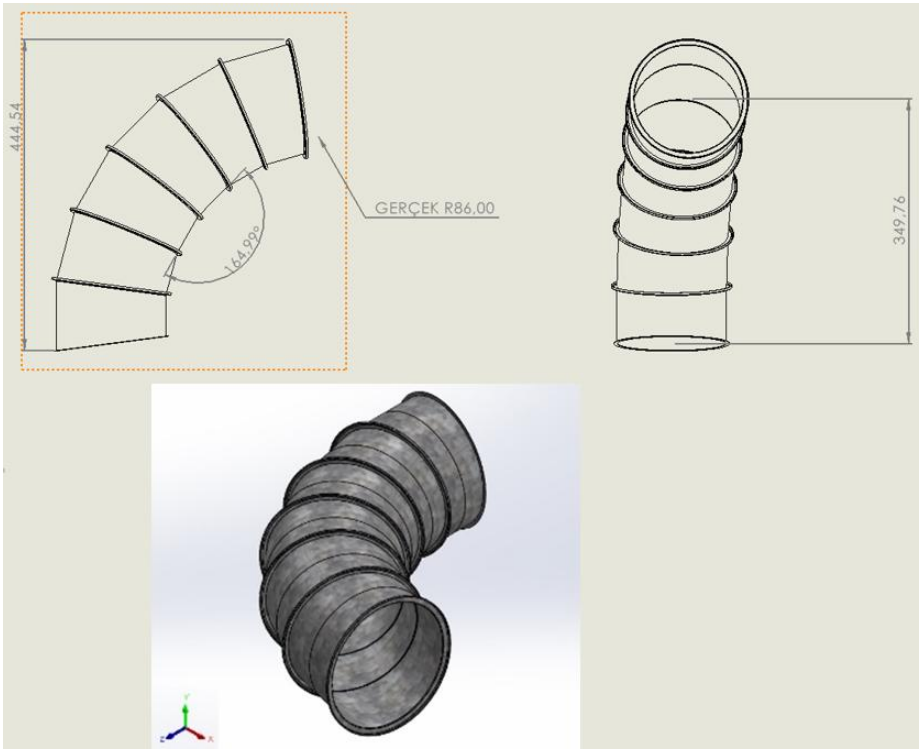
Çalışmada, galvanizli çelik sac boru dirseğinin geometrik boyutları ve üretim spesifikasyonları, ilgili teknik çizim ve detaylı teknik resimlerle gösterilmiştir. Bu çizimler, boru dirseğinin tasarımına dair ölçüsel verileri ve üretim aşamasındaki kritik toleransları içermektedir (Şekil 5). Üretimde sac kalınlığı 0,7 mm alınmıştır. Malzemedeki sac kalınlığı, hem yapısal dayanıklılığı hem de borunun şekillendirilebilirliğini doğrudan etkilemektedir. 0,7 mm kalınlık, yeterli mukavemeti sağlarken, aynı zamanda bükme ve kaynak işlemlerini kolaylaştıracak optimum bir değer olarak belirlenmiştir. Daha ince bir sac, yırtılma veya şekil bozulmasına yol açabilirken, daha kalın bir sac şekillendirme sırasında işlem zorlukları yaratabilir. Seçilen bu değerler, statik analizlerde doğru sonuçlar elde edilmesi ve malzeme israfının önlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Üretimde kullanılan sac malzeme ve işlemler, TS EN 10346:2015 "Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Mamuller" standardı, TS EN 1505:2000 "Havalandırma Tesisatı — Kanal Sistemleri — Sac Kanal ve Bağlantı Elemanları İçin Boyutlar" standardı ve EN 10143:2006 "Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Ürünler için Toleranslar" standardına uygun şekilde seçilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu sayede, endüstriyel standartlarla uyumluluk sağlanmış ve ürün kalitesi güvence altına alınmıştır [15-18]. Şekil 5'te boru parçasını oluşturan sacın boyutları verilmiştir.



Şekil 5. Galvanizli çelik boru dirseğinin bağlantı elemanı (mm)

Tasarlanan havalandırma borusu, 6 adet dirsek bağlantı elemanının dikkatlice birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Her bir dirsek bağlantı elemanı, borunun yön değiştirmesini sağlayan ve sistemin düzgün çalışması için gerekli olan geometrik yapı bileşenleri olarak işlev görmektedir. Bu elemanların birleşimi, borunun istediği şekle ulaşmasını ve hava akışının istenilen yönlere yönlendirilmesini sağlamaktadır. Şekil 6'da bu tasarımın boyutları ve üç boyutlu (3D) modeli verilmiştir. Şekil 6' da galvanizli çelik borunun çapı Ø172 mm'dir.



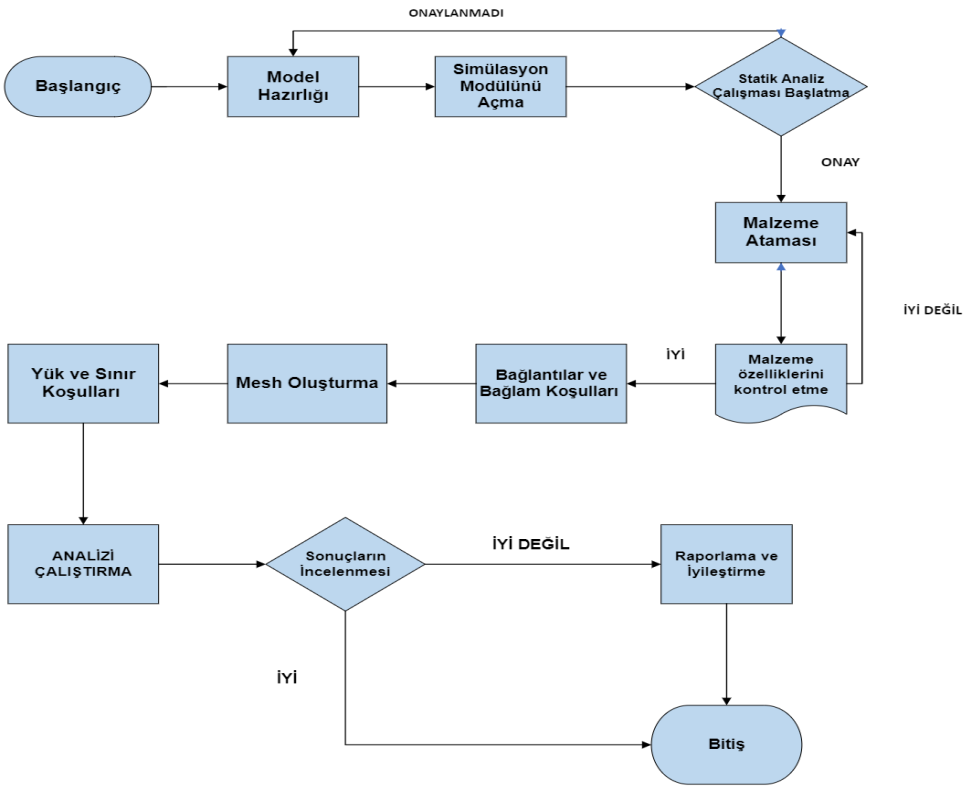
Şekil 6. Galvanizli çelik boru 6 adet bileşenin montajı (mm)

Havalandırma borusu malzemesinde soğuk haddelenmiş galvanizli sac malzemesi seçilmiştir. Galvanizli sacın kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen galvanizli çelik sacın malzeme özelliklerini içeren katalog değerleri firmadan temin edilmiştir [10].

Tablo 1. Galvanizli çelik sac malzemenin kimyasal özellikleri [10]

Metal Türü	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Al	% V	%Nb	%Ti
Galvanizli sac	0,047	0,0106	0,2483	0,0096	0,0066	0,0338	0,0023	0,0027	0,001

Boru dirseğinin modellenmesi ve statik hata analizinin basamakları, sonlu elemanlar modellenmesindeki iş akış şeması Şekil 7'de sunulmuştur. Bu şemada, her adımın sırasıyla nasıl ilerlemesi gerektiği detaylandırılmıştır. İş akış modelinin oluşturulmasında, Microsoft Visio programı kullanılarak görsel olarak şemanın düzeni ve süreci net bir şekilde aktarılmıştır.

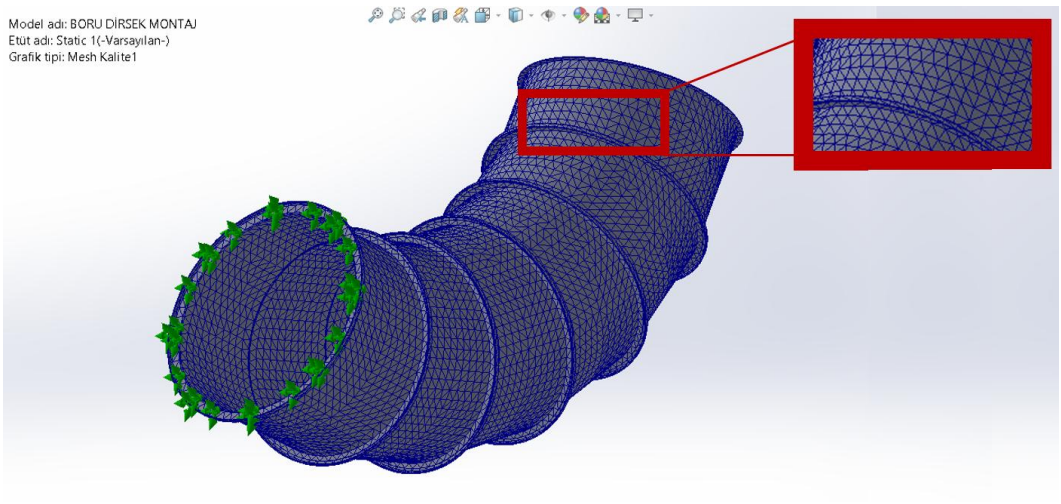


Şekil 7. Havalandırma borusunun sonlu elemanlarda modellenmesindeki iş akışı

4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

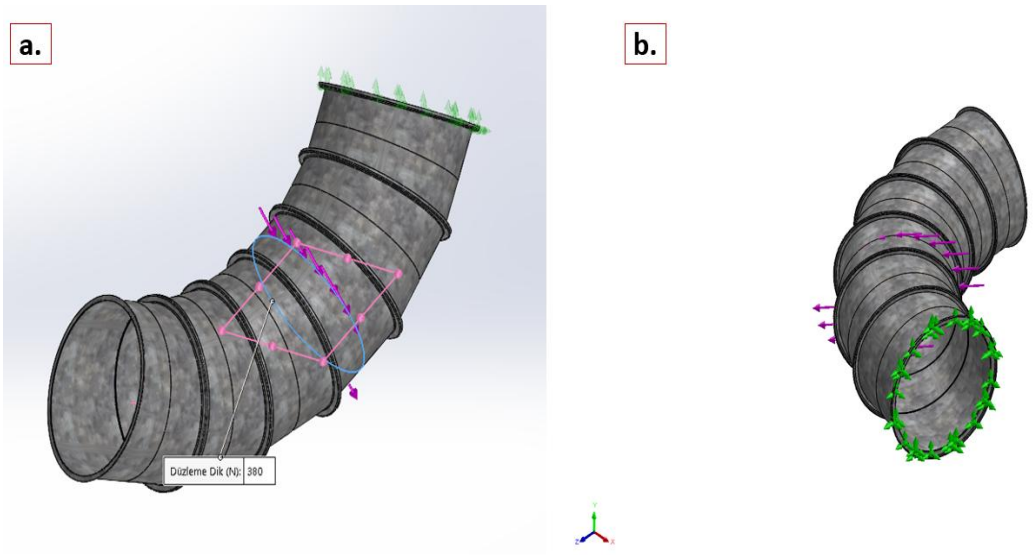
Tasarım süreci açısından sonlu eleman analizinin doğruluğu, meshleme işlemine bağlıdır. Boru dirsek montajının katı modeli önce ağ örgüsüne (mesh) dönüştürülmüştür (Şekil 8). Mesh işlemi, yüksek kaliteli çözüm elde etmek amacıyla uygulanmıştır. Mesh yapısı, altı yüzlü (hexahedral) elemanlardan oluşmaktadır. Altı yüzlü elemanlar, yüksek dereceli sayısal entegrasyon için yaygın olarak kullanılır ve daha fazla nokta içeren integral hesaplamaların çözüm doğruluğunu artırabilir. Sonlu eleman modelinde toplamda 86472 düğüm (node) ve 42790 eleman bulunmaktadır. Mesh kalitesi yüksek olarak seçilmiştir.

Oluşturulan katı model, basma kuvveti ve basınç yüküne maruz bırakılarak analiz edilmiştir. Altı yüzlü elemanlar, daha yüksek dereceli sayısal entegrasyon sağlayarak özellikle karmaşık geometrilerde ve düzensiz yüklemelerde çözümün doğruluğunu arttırmaktadır. Seçilen mesh tipi ve eleman sayısı, elde edilen statik analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini etkilemektedir.



Şekil 8. Montajlı havalandırma boru dirseğinin mesh ağ örgüsü

Şekil 8'de yeşil renkli görülen kısımda sabitleme noktaları verilmiştir. Statik gerilme için yerçekimi kuvveti programda tanımlanmıştır. Meshleme işleminden sonra Şekil 9a'da kuvvet yükü yüzeye uygulanmıştır. Sınır şartları belirlenmiştir. Statik yükler altında boru dirseğinin y ekseninde yaptığı harekete karşılık radyal bir dönme açısı oluşturmasından dolayı, dirsek üzerinde aynı zamanda basma kuvveti, tork ve basınç oluşmaktadır. Programda yüksek gerilme altındaki etkisini değerlendirmek için 380 N (38,75 Kg)'luk kuvvet boru dirseğinin tam ortasına uygulanmıştır (Şekil 9b). Bu analiz, boru dirseğinin yük altındaki davranışını incelemeye yardımcı olmuş ve basma kuvveti ile oluşan gerilme ve deformasyon incelenmiştir.



Şekil 9. Havalandırma boru dirseğinin sabit ve yükleme sınır şartları

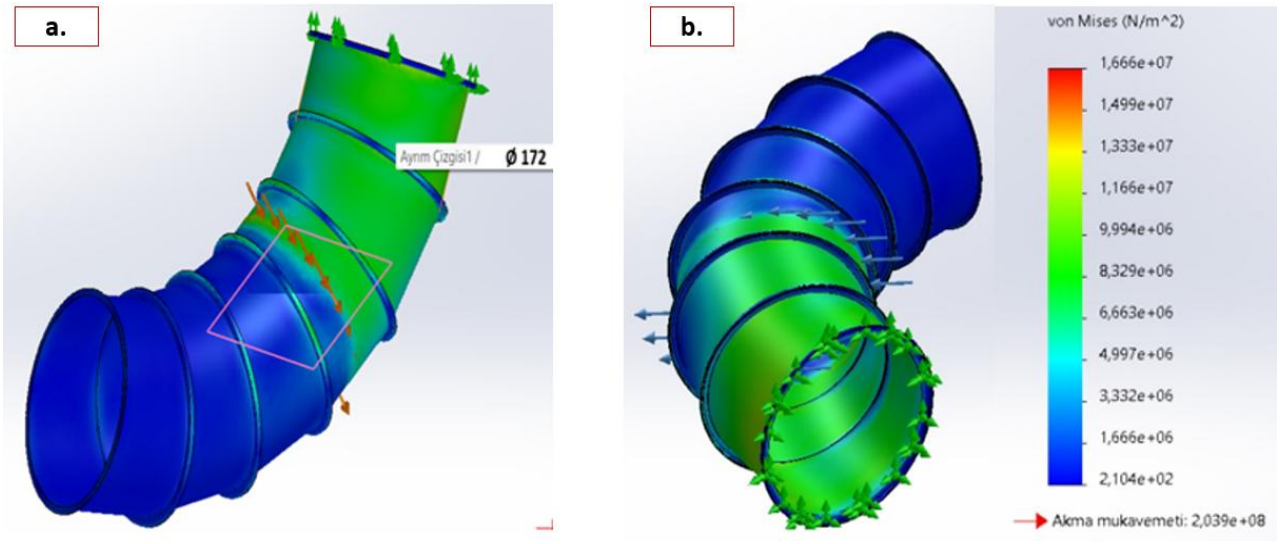
380 N yük altında galvanizli çelik sac malzemenin analizde kullanılan malzeme özelliği değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Galvaniz çeliğin analiz veri girdileri

Akma Dayanımı	2,03943e+08 N/m^2 = 203,94 MPa
Maksimum Gerilme Dayanımı	3,56901e+08 N/m^2 = 356,90 MPa
Elastiklik Modülü	2e+11 N/m^2 = 200 GPa
Poisson Oranı	0,29
Yoğunluk	7870 kg/m^3

5. Bulgular

Dirsek borunun eğrisel geometrisi nedeniyle, üzerine gelen yüklerin dağılımı homojen gerçekleşmemektedir. Bu durum, basınç kuvvetlerinin boru boyunca düzensiz şekilde yayılmasına neden olmaktadır. Genellikle montaj sırasında borunun üst kısmı bir destek yapısına sabitlenmektedir. Üst kısma sınır şartı uygulanması, yüklerin kontrol altına alınmasına ve daha az kritik bölgenin analize dâhil edilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmadaki amaç; üretim sonrasında uygulanan yük altında borunun dayanım sınırlarını analiz yöntemiyle öngörmek ve şekillendirme sırasında uygulanan yükün yapısal performans üzerindeki etkisini belirlemektir. Statik tekil yükler altında boru üzerinde oluşan maksimum gerilme ve yüzey üzerindeki deformasyon dağılımı incelenmiştir. Gerilme skalası incelendiğinde elde edilen maksimum gerilme değeri (σ_{maks}) 16,6 MPa'dır. Dolayısıyla bu değer, malzemenin 203,94 MPa akma dayanımı sınırına göre yaklaşık 12 kat daha düşük bir değerdir (emniyet katsayısı S=12). Yani, malzemenin kaynak bölgelerine uygulanan (F_{uyg}) 38,75 kg (≈ 38,75 kg x 9,81 = 380,74 N) yükü çok rahat bir şekilde taşıyabileceği değerlendirilmektedir. Uygulanan yükün malzeme üzerinde oluşturduğu gerilmeler, yüklerin malzeme yüzeyinde nasıl dağıldığı ve en yüksek gerilme noktaları Şekil 10'da görülmektedir. Borunun sabitlenen bölgesine yakın alanlarda en düşük gerilmeler oluşmuştur. Renk skalasında mavi, düşük gerilme bölgelerini temsil eder. Renk skalasında Yeşil, orta düzeyde gerilme bölgelerini ifade eder. Bu bölgeler, malzemenin nominal gerilme seviyelerine yakındır. Malzeme güvenli olabilir, ancak dikkatle değerlendirilmelidir. Bu bölgelerde malzeme üzerindeki gerilme etkisi azdır. Malzemenin akma sınırına ulaşma riski düşüktür ve bu alanlar genellikle güvenlidir.



Şekil 10. Kaynakla birleştirilen 6 adet dirsek bağlantı elemanının statik yük altında Von Mises gerilmesi (MPa): **a.** Ön görünüş, **b.** Üst görünüş

Boru dirseği üretiminde şekil verirken uygulanan yükleme miktarı; borunun malzemesine, şekillendirme yöntemine, borunun çapına, duvar kalınlığına ve şekillendirme işlemi sırasında kullanılan ekipmanlara bağlıdır. Ayrıca, bu yüklemenin borunun akma dayanımı, plastik deformasyon sınırı ve kaynak dikişlerinin dayanıklılığı göz önünde bulundurularak belirlenmesi gerekmektedir.

Boru dirseği üretimi sırasında, galvanizli çelik boru için akma dayanımı (σ_{akma}) = 203,94 MPa ve borunun çapı ($d_{dış}$)= 172 mm (0,172 m), duvar kalınlığı (t)= 0,7 mm (0,0007 m), boru uzunluğu= 1000 mm (1 m) ise, bu borunun en fazla dayanabileceği yük miktarı üç adımda şöyle bulunur [19, 20]:

a. İç Çapı ($d_{iç}$): Sac kalınlığı (t) ve dış çap ($d_{dış}$) değerlerinin bilinmesi önem arz etmektedir (Denklem 1) [15, 16]:

$$d_{iç} = d_{dış} - 2.t \quad (1)$$

$$d_{iç} = 0,172 - 2.\ 0,0007 = 0,1706 \text{ m}$$

b. Kesit Alanı (A): Borunun dış ve iç çapları arasındaki alan farkı, borunun kesit alanını vermektedir (Denklem 2) [19, 20]:

$$A = \frac{\pi}{4} . (d_{dış}^2 - d_{iç}^2) \quad (2)$$

$$A = \frac{3,1416}{4} . (0,172^2 - 0,1706^2) \approx 0,0002197 m^2$$

c. Maksimum Kuvvet (F_{max}): Akma dayanımını (σ_{akma}) ve kesit alanını (A) kullanarak maksimum kuvvet hesaplanır (Denklem 3) [19, 20]:

$$\mathbf{F_{max}} = \sigma_{akma} . A \quad (3)$$

$$\mathbf{F_{max}} = (203,94 \times 10^6) \cdot 0,0002197 \approx 44,81 \text{ N}$$

Newton'u kilograma çeviririz (Denklem 4) [19, 20]:

$$\text{kg cinsinden yük} = \frac{\text{Fmax}}{\text{g (yer çekim ivmesi)}} \quad (4)$$

$$\text{kg cinsinden yük} = \frac{44,813}{9,81} \approx 4,57 \text{ kg}$$

Boru bağlantı elemanları, akma dayanımına kadar yaklaşık 4,57 kg yük taşıyabilir. En fazla taşıyabileceği bu yüke kadar boruda plastik deformasyon olmaz. Statik analizde 38,75 kg kuvvet alınmasının nedeni ise 4,57 kg'a göre fazla yük bindirip model üzerindeki etkileri tespit etmektir.

Güvenlik faktörü (oranı), malzemenin akma dayanımının, yük altında oluşan maksimum gerilmeye oranıdır ve Denklem (5) verilmiştir. Şekil 10'da Von Mises en düşük gerilme değeri 0,0002104 MPa ve en yüksek gerilme değeri 16,66 MPa 'dir. Ortalama Von Mises gerilme değeri ise 8,33 MPa'dır.

$$\text{Güvenlik Faktörü (S)} = \frac{\text{Malzemenin akma mukavemeti } (\sigma \text{ akma})}{\text{Yük altında ortalama Von Mises gerilme mukavemeti } (\sigma)} \quad (5)$$

$$\text{Güvenlik Faktörü (S)} = \frac{203,943}{8,33} \approx 24,48 \text{ olur.}$$

Borunun üst kısmının mesnetlenmesi, diğer kısımlarda oluşan gerilmelerin ve deformasyonların daha belirgin hale gelmesini sağlayarak, kritik bölgelerdeki gerilmeleri, kaynak dikişlerindeki dayanıklılığı ve malzemenin akma sınırına yaklaşan noktalarını tespit edilebilme olanağı sağlamaktadır. Bu sınır şartı, borunun stabilitesini sağlarken kısmi hareket özgürlüğüne de sahip bir mesnet oluşturmaktadır. Gerilme, malzemenin birim alana uygulanan kuvvetidir. 172 mm'lik boru çapının olduğu bölgenin alanı 23223,44 mm^2 'dir. Bu simülasyon modelinde, 38,75 kg'lık yükün kaynak birleşim bölgeleri üzerindeki deformasyon etkileri analiz edilmiştir. Bu yükün alanda oluşturduğu basınç kuvveti yaklaşık 0,0000000161 MPa olarak hesaplanmıştır.

Havalandırma borusu üretiminde kullanılan galvaniz kaplamalı çelik sac malzemenin dayanıklılığının belirlenmesi, katalog değerindeki akma mukavemeti (203,94 MPa) doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Statik tekil yükler altında maksimum gerilme dayanımı ile bu gerilmenin yüzey üzerindeki dağılımı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, malzemenin kaynak bölgelerine uygulanan 38,75 kg'lık yükü rahatlıkla taşıyabildiği görülmüştür. Bu durum, borunun dayanıklılık açısından tasarım gerekliliklerini fazlasıyla karşıladığını göstermektedir. Firmada, büküm işlemi için 1 kg'dan daha yüksek yük bindirmesi yapılmamıştır.

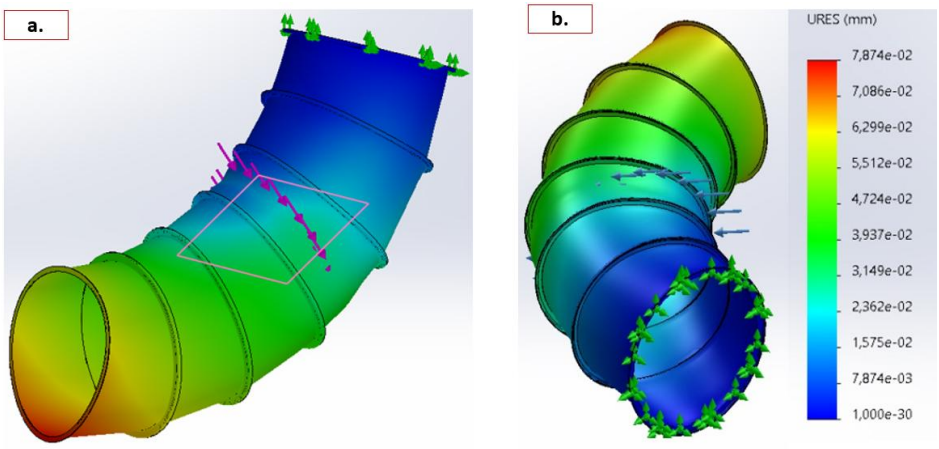
Uygulanan 38,75 kg yük, malzeme üzerinde yaklaşık 24,48 değerinde güvenlik katsayısı oluşturmaktadır. Bu değer, malzemenin 203,94 MPa akma sınırından yaklaşık 24,48 kat daha güvenli bir seviyede olduğunu gösterir. Bu durumda, uygulanan yükün oluşturduğu gerilme, malzemenin akma dayanımının çok altında bir değerdir. Malzemenin akma sınırının çok altında olduğundan, uygulanan yükün malzeme üzerinde plastik deformasyona neden olması mümkün değildir. Bu da malzemenin güvenli bir şekilde bu yükü taşıyabileceğini doğrulamaktadır. Havalandırma borusunun yüklenme sonucunda her noktasının mesafe olarak değişimi (deformasyonun büyüklüğünü ve yönünü), bu yapı elemanının hangi yönde hareket ettiğini görselleştirmiştir.

Deformasyon ölçeği, analizde hesaplanan gerçek deformasyonu görsel olarak daha belirgin hale getirmek için kullanılan bir büyütme katsayısıdır. Yer değiştirme ve gerinimde Şekil 11 ve 12 'de deformasyon ölçeği 725,62

alınmıştır. Bu ifade ise, deformasyonun yaklaşık 725,62 kat büyütüldüğünü ifade etmektedir. Eğer deformasyon ölçeği bu kadar yüksekse, modeldeki gerçek deformasyon miktarının çok küçük olduğu anlaşılmaktadır. Malzemenin rijitliği çok yüksektir ve dolayısıyla deformasyon miktarı gerçekte çok küçük kalmıştır. Yükler veya sınır koşulları model üzerinde küçük deformasyonlar oluşturmuştur.

Statik yüklenme sonucu boruda oluşan maksimum yer değiştirme 0,07874 mm olarak bulunmuştur. Maksimum yer değiştirme (mm), borunun uç kısmındaki iç bükey üst kavis bölgesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının geometrisi gereği gerilimin ve deformasyonun bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. Bağlantı noktaları, maksimum zorlamaya maruz kalan alanlar olarak değerlendirilmiştir, ancak uygulanan yük kaldırıldığında borunun eski formuna geri döneceği düşünülmektedir. Bu da malzemenin elastik davranışının bir kanıtıdır.

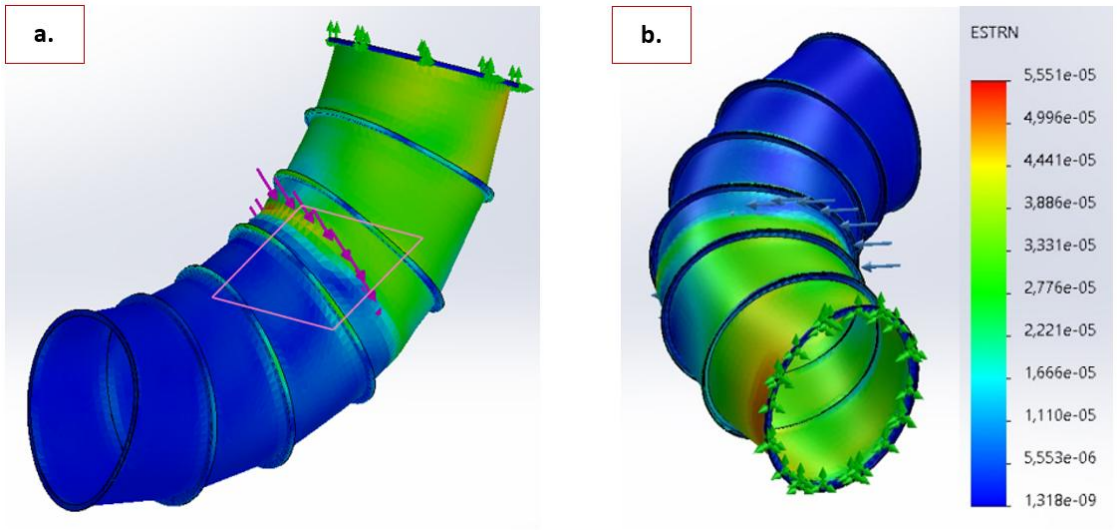
Mavi görünen yerler, destek noktaları (mesnetler) ya da yükten uzak alanlardır. Genellikle minimum yer değiştirmeyi veya hiçbir hareket olmayan alanları temsil etmektedir. Yeşil - sarı – turuncu bölgeler ise orta büyüklükteki yer değiştirme alanlarını göstermektedir. Yapının yükle temas eden ve gerilime maruz kalan kısımları bu renk ile gösterilmiştir. Kırmızı bölge ise maksimum yer değiştirmeyi temsil etmektedir. Genellikle, yükün en fazla etkilediği ve deformasyonun yoğun olduğu bölgelerdir. Kritik bölgelerin tespitinde **kırmızı alanlar** dikkatle incelenmiştir. Bu bölgeler, yapısal sorunların veya deformasyonun yoğun olduğu alanları göstermiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Statik yük altında malzemenin yer değiştirmesi (mm): **a.** Ön görünüş, **b.** Üst görünüş

Statik sonlu elemanlar analizinde gerinim, malzeme üzerindeki şekil değişim oranını ifade etmektedir. Genellikle deformasyonun büyüklüğü ile yükün malzeme üzerindeki etkisini anlamak için gerinim değeri kullanılmaktadır. Gerinim analizi, hem malzemenin davranışını anlamak, hem de güvenli tasarım parametrelerini oluşturmak için önemli bir araçtır. Gerinim statik yük altında bir birimsiz büyüklüktür. Bunun nedeni, gerinimin temel olarak bir uzunluk değişiminin (deformasyon) orijinal uzunluğa oranı olmasıdır. Renk skalası, elastik deformasyonun nerede bittiğini ve plastik deformasyonun başladığını görselleştirmeye yardımcı olmaktadır. Bu görselleştirme sayesinde yapısal güvenliği optimize etmek ve tasarımı iyileştirmek mümkün hale gelmektedir. Mavi kısım minumum gerinimi ve kırmızı olan bölge de maksimum gerinimi (kritik bölge) ifade etmektedir. Mavi ve yeşil alanlar güvenli bölgeleri temsil ederken, kırmızı alanlar dikkatle incelenmesi gereken kritik noktaları işaret etmektedir.

Şekil 12'de statik yük altında malzemenin gerinimi verilmiştir. Minumum gerinimi $1{,}318\times10^{-9}$ iken maksimum gerinimi de $5{,}551\times10^{-5}$'dir. Boru üzerindeki gerinim, sabit mesnetin bulunduğu bölgenin alt kısımlarında çok düşük seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Bu gerinimin, çalışan makine parçalarında görülebilen tipik bir gerinim miktarına yakın olduğu düşünülmektedir. Gerinim analizinde kullanılan renk skalası, elastik deformasyonun sona erdiği ve plastik deformasyonun başladığı bölgeleri görselleştirerek, deformasyon sürecinin sınırlarını daha net bir şekilde ortaya koymuştur. Yeşil alan (Orta düzey gerinim); $3{,}886 \times 10^{-5}$ - $2{,}221 \times 10^{-5}$ gerinim aralığını temsil etmektedir. İncelenen sistemde güvenlik faktörü 24,4 olarak hesaplanmıştır. Güvenlik faktörü 24,4 olan bir yüklemede plastik deformasyon gerçekleşmez. Uygulanan yük altında boruda plastik deformasyon meydana gelmeyeceğini ve tüm deformasyonların elastik sınırlar içinde gerçekleşmiştir. Özellikle havalandırma sistemleri gibi titreşim ve çevresel etkilere maruz kalan sistemlerde bu durum, hem sistem güvenliği hem de uzun vadeli dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 12. Statik yük altında malzemenin gerinimi: **a.** Ön görünüş, **b.** Üst görünüş

Deformasyon genellikle plastik şekil değişikliği ve gerilme ile ilişkilendirilirken, yer değiştirme daha çok elastik hareketler ve malzeme deformasyonu ile bağlantılıdır. Bu nedenle deformasyon, havalandırma borusunun geometrisindeki değişiklikleri ifade ederken, yer değiştirme malzemenin her noktasındaki konum değişikliğini göstermektedir.

6. Tartışma ve Sonuç

Galvanizli çelik boru dirseklerin üretim süreci ile sonlu elemanlar analizinin (yönteminin) amacı (SEY veya FEA); üretim sırasında oluşan malzeme özelliklerindeki değişimlerin ve geometrik tolerans sapmalarının, dirseklerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Bilgisayar ortamında 3D katı modelleme ile klasik bir havalandırma boru modeli tasarlanmıştır. Solidworks 2020 Simulation yazılımının statik analiz modülü kullanılmıştır. Yüksek mesh yapısına (yani eleman ve düğüm sayısının sık olması) sahip boru modeli analizinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen deformasyon $1{,}000\times10^{-30}$ - $7{,}874\times10^{-2}$ *mm* aralığında çıkmıştır. Şekil değiştirme $3{,}886 \times 10^{-5}$ - $2{,}221 \times 10^{-5}$ gerinim aralığındadır. Havalandırma boru dirseği modeli, maksimum Von Mises gerilme değeri olan 16.6 *MPa* altında çalıştığı için elastik deformasyon bölgesinde kalmıştır. Tasarımda ise mavi ve yeşil alanlar sıklıkla gözlenmiştir. Bu iki renk skalası da güvenli bölgeleri temsil etmiştir.

Elde edilen veriler, malzeme üzerinde oluşan gerinim yoğunluklarının bölgesel dağılımını ve yapısal açıdan riskli alanları hızlıca belirleme olanağı sağlamıştır. Yük altında boru veya malzemenin şekil değiştirdiği bölgeler belirlenmiştir. Ancak bu deformasyonlar kalıcı değildir, çünkü akma sınırına ulaşılmamıştır. Akma sınırına kadar olan deformasyon elastik olup, yük kaldırıldığında geri dönme eğilimindedir. Model üzerine uygulanan kuvvet ve belirtilen sınır şartlarına bakıldığında elde edilen sonuçların güvenilir olduğu görülmüştür. Malzemenin akma mukavemeti ile analiz sonucundan elde edilen Von Mises gerilme değeri karşılaştırıldığında, güvenlik faktörüne (emniyet katsayısına) uygun bir durumun söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan analizin güvenli bir tasarım için yeterli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, galvanizli çelik boru dirseğinin büküm noktasındaki dayanımı teorik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Statik analiz sonucunda, kaynak bölgelerindeki olası zayıf noktalar tespit edilmiş ve öneriler geliştirilmiştir. Üretimde, yüksek dayanımlı ve homojen bir mikro yapıya sahip galvanizli çelik malzemeler kullanılmalıdır. Kaynak sırasında kullanılan dolgu malzemesi, borunun malzemesiyle uyumlu ve yüksek mekanik dayanım özelliklerine sahip olmalıdır. Kaynak dikiş tasarımı, gerilme yoğunluğunu azaltacak şekilde optimize edilmelidir (örneğin, yuvarlatılmış köşe kaynaklar veya düzgün bindirme kaynaklar tercih edilebilir). Büküm açısı veya boru kalınlığı optimize edilerek kaynak bölgesine düşen gerilme azaltılabilir. Bu öneriler, kaynak bölgesinde zayıf noktaların oluşumunu önlemeye ve dirseğin büküm noktasındaki dayanımı artırmaya yönelik adımlar olarak değerlendirilebilir.

Üretim hatalarının azalması, maliyetlerin düşürülmesine de katkı sağlamıştır. Ayrıca, bu yöntem ile tasarım doğrulama süreçleri hızlanmış ve mühendislik süreçleri daha verimli hale getirilmiştir. Endüstriyel üretim

hattındaki kaynak ve şekillendirme işlemleri, analiz sonuçlarına göre optimize edilmelidir. Özellikle kaynak dikişlerinin dayanım kapasitesinin arttırılması, boru üretiminin güvenilirliğini artırabilir. Yapılan bu çalışmada elde edilen veri analiz sonuçları da gerçek üretim aşamasında kullanılmıştır. Solidworks ortamında tasarlanan 3D katı modellerin statik analizlerinin yapılması, özellikle çok parçalı ve maliyeti yüksek makinelerin prototip üretiminden önce, üreticilere ve tasarımcılara önemli ölçüde zaman kazandırmıştır. Benzer çalışmalara ve literatüre ışık tutacağını söylemek mümkündür. Analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar yeni bir ürünün tasarımında ve imalatında kullanabilir.

7. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine katkılarından dolayı Kahramanmaraş ilimizde bulunan Küçüksan Metal Makina Otomasyon A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

8. Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

9. Kaynakça

[1] Çitil Ş., Ayaz Y., Temiz Ş., Aydın M.D., 2017. Mechanical Behaviour of Adhesively Repaired Pipes Subject to Internal Pressure, International Journal of Adhesion and Adhesives, 75(1), 88–95. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.02.015

[2] Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Da Silva L.F.M., DeJesus A.M.P., 2011. Strength Prediction of Single- and Double-lap Joints by Standard and Extended Finite Element Modeling, International Journal of Adhesion & Adhesives, 31(5), 363–372. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2010.09.008

[3] Çetin, A. D., Bayer, İ. 2018. Buhar Devreleri Boru Tasarımı ve Boru Gerilme Analizi, Gemi ve Deniz Teknolojisi, 211(1), 63-72.

[4] Tambrallimath, V., Keshavamurthy, R., Saravanabavan D, Koppad, P.G., Pradeep Kumar, G.S., 2019. Thermal Behavior of PC-ABS Based Graphane Filled Polymer Nonocomposite Synthesized by FDM Process, Composites Communication. 15(2), 129-134. doi: 10.1016/j.coco.2019.07.009

[5] Altuncu, E., Eker, C., Kırmızıtepe, S., 2021. Havalandırma Kanalı Tasarımında Malzeme Seçimi ve Tasarımına Bağlı Ağırlık Optimizasyonu, Academic Perspective Procedia, 4(1), 161-170. doi: 10.33793/acperpro.04.01.26

[6] Kurniawan, R.N.A., Romahadi, D., Fitri, M., Karim, M.R., 2023. Implementation of The Finite Element Method In Solidworks to Optimize The Front Cast Wheel Design for Motorcycles, International Journal of Innovation in Mechanical Engineering & Advanced Materials (IJIMEAM), 4(3), 66-73. doi: 10.22441/ijimeam.v4i3.18794

[7] Ay, M., Hartomacıoğlu, S., Manav, M., Saraç, Ş., 2021. Çelik Dirsek Üretiminin Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi ile Modellenmesi ve Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed and Refereed, ISSN: 2667-6702, 8(16), 49-67. doi:10.38065/euroasiaorg.582

[8] Xie, P., Yue, Q., 2017. Onboard Monitoring System of Overbend Pipe During Deepwater S-Lay Installation, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 27 (2), 216-221. doi: 10.17736/ijope.2017.jc667

[9] Gok, A., Halil I., Gök, K., 2009. Sonlu Elemanlar Metodunun Gerçek Bir Sanayi Parçası Üzerinde Uygulanması. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs Karabük, 1-5.

[10] Tosyalı Toyo Çelik A.Ş. https://www.tosyalitoyo.com.tr (Erişim Tarihi: 02.08.2024).

[11] DX51D Markalı Çelik Ürünler, https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/dx51d (Erişim Tarihi: 03.08.2024).

[12] Tat-metal A.ş. Galvanizli Yassı Çelik, (Erişim Tarihi: 02.08.2024). https://www.tatmetal.com/uploads/file/d7d4e3d32d9f3852e642b8372bf2ca5c-1595421895205.pdf

[13] Gürsoy, Ö.K., Esener, E. 2019. Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(1), 1-11. doi: 10.35193/bseufbd.549657

[14] Sezer, Ç., Mekanik Tasarımda Emniyet Katsayısı, (Erişim Tarihi: 03.08.2024). https://www.sezercoban.com/mekanik-tasarimda-emniyet-katsayisi/

[15] TS EN 10346:2015, Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Mamuller — Teknik Teslim Şartları, Türk Standardları Enstitüsü, 2015, (Erişim Tarihi: 02.08.2024).

https://www.sincerelysteel.com/tr/hot-dipped-galvanized-steel-coil-hdgi-product/

[16] TS EN 1505:2023, Havalandırma Tesisatı — Kanal Sistemleri — Sac Kanal ve Bağlantı Elemanları İçin Boyutlar, Türk Standardları Enstitüsü, (Erişim Tarihi: 02.08.2024).

https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/havalandirma-ve-kl-ma-s-stemler--genel-tekn-k-sartname-taslagi-20230104101224.pdf

[17] EN 10143:2006, Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Ürünler için Toleranslar, European Committee for Standardization (CEN), (Erişim Tarihi: 02.08.2024).

https%3a%2f%2fcdn.standards.iteh.ai%2fsamples%2f23469%2f9655a722c817441388285d9f1a2a3c69%2fSIST-EN-10143-2006-en-.pdf/RK=2/RS=SVoqO1ELpsWa9IIqlDfjqPb6ogs-

[18] Baycık, H., 2013. Çeliklerin Sıcak Daldırmalı Galvaniz Kaplanması İçin Avrupa Standartları, Mühendis ve Makine, 47(555), 33-34.

[19] Beer, F.P., Johnston Jr.E.R., DeWolf, J.T., 2015. Mechanics of Materials, 8th Edition, Published by McGraw-Hill Education, New york/ United States of America, ISBN: 978-0-07-339823-5.

[20] Shames, I.H., Pitarresi, J.M., 2003. Introduction to Solid Mechanics 3rd Edition, Published by Pearson, United States of America, 792 pp. ISBN: 978-0132677585.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Designing Climate-Responsive Learning Environments: Rethinking Educational Buildings Across Türkiye's Diverse Climatic Zones

Dilan Kuranlıoğlu*[1], Gizem İzmir Tunahan[2]

Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Anabilim Dalı, İZMİR

(Alınış / Received: 20.02.2025, Kabul / Accepted: 19.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Climate-responsive design,
Cognitive performance,
Educational buildings,
Indoor comfort,
Türkiye,
Student health and well-being

Abstract: The design of educational buildings plays a crucial role in students' comfort, well-being, and the functionality of their learning environments, with climate-responsive design being critical for addressing global climate challenges, ensuring energy efficiency, sustainability and resilience to extreme weather conditions in addition to occupant comfort. In Türkiye, the impact of varying climatic conditions on school design is often disregarded, resulting in the use of uniform designs that may not meet regional climatic needs, potentially leading to concerns with indoor comfort, energy efficiency, air quality, and, ultimately, adversely impacting student health, well-being, and academic performance.

This study aims to investigate the uniformity of educational building designs across Türkiye's climatic regions evaluate their climate responsiveness and predict the potential short- and long-term impacts on student health, well-being, and academic performance in cases where climate-responsive design is insufficient. Köppen climate classification was used to categorise Türkiye's climatic zones and select pilot cities with extreme heat and cold conditions. The educational buildings in these cities were evaluated for design uniformity and climate responsiveness. Finally, the potential impacts of the identified uniformity and lack of climate-responsive design were synthesised from the literature.

The findings revealed that despite significant climatic differences, many schools in Türkiye share similar designs that do not adequately address regional climate needs, which could have important implications for both the learning environment and student equity, potentially exacerbating disparities between students in different regions. The study emphasises the critical need to incorporate climate-responsive design strategies in educational buildings to enhance not only the current indoor conditions but also to address future challenges posed by climate change, improve energy efficiency, and, most importantly, foster equitable and supportive learning environments for all students. Further experimental studies are recommended to assess the impact of climate-responsive design on students' health, well-being, and cognitive performance.

İklime Duyarlı Öğrenme Ortamları Tasarlamak: Türkiye'nin Çeşitli İklim Bölgelerinde Eğitim Binalarını Yeniden Düşünmek

Anahtar Kelimeler
İklime duyarlı tasarım,
Bilişsel performans,
Eğitim binaları,
İç mekan konforu,
Türkiye,
Öğrenci sağlığı ve iyi olma hali

Öz: Eğitim binalarının tasarımı, öğrencilerin konforu, refahı ve öğrenme ortamlarının işlevselliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. İklime duyarlı tasarım, küresel iklim zorluklarını ele almak, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve aşırı hava koşullarına dayanıklılığın yanı sıra kullanıcı konforunun sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Türkiye'de, değişen iklim koşullarının okul tasarımı üzerindeki etkisi genellikle göz ardı edilmekte ve bu da bölgesel iklim ihtiyaçlarını karşılayamayan tek tip tasarımların kullanılmasıyla sonuçlanmaktadır.

Bu durum iç mekan konforu, enerji verimliliği, hava kalitesiyle ilgili endişelere yol açabilmekte ve nihayetinde öğrenci sağlığını, refahını ve akademik performansını olumsuz etkileyebilmektedir.
Bu çalışma, eğitim binası tasarımlarının Türkiye'nin iklim bölgeleri genelinde tekdüzeliğini araştırmayı amaçlamaktadır. İklime duyarlılıklarını değerlendirmek ve iklime duyarlı tasarımın yetersiz olduğu durumlarda öğrenci sağlığı, refahı ve akademik performansı üzerindeki olası kısa ve uzun vadeli etkileri tahmin etmekte çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır. Köppen iklim sınıflandırması, Türkiye'nin iklim bölgelerini kategorize etmek ve aşırı sıcak ve soğuk koşullarına sahip pilot şehirleri seçmek için kullanılmıştır. Pilot şehirlerdeki eğitim binaları tasarım tekdüzeliği ve iklime duyarlılık açısından değerlendirilmiştir. Son olarak, belirlenen tekdüzeliğin ve iklime duyarlı tasarım eksikliğinin potansiyel etkileri literatürden sentezlenmiştir.
Bulgular, önemli iklim farklılıklarına rağmen, Türkiye'deki birçok okulun bölgesel iklim ihtiyaçlarını yeterince karşılamayan benzer tasarımlara sahip olduğunu ve bunun hem öğrenme ortamı hem de öğrenci eşitliği için önemli sonuçlar doğurabileceğini, farklı bölgelerdeki öğrenciler arasındaki eşitsizlikleri daha da kötüleştirebileceğini, ortaya koymuştur. Çalışma, yalnızca mevcut iç mekan koşullarını iyileştirmek için değil, aynı zamanda iklim değişikliğinin oluşturduğu gelecekteki zorlukları ele almak, enerji verimliliğini artırmak ve en önemlisi tüm öğrenciler için eşit ve destekleyici öğrenme ortamları yaratmak için eğitim binalarına iklime duyarlı tasarım stratejilerinin dahil edilmesinin kritik ihtiyacını vurgulamaktadır. İklime duyarlı tasarımın öğrencilerin sağlığı, refahı ve bilişsel performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için daha fazla deneysel çalışma önerilmektedir.

*İlgili Yazar, email: kuranliogludilan@gmail.com

1. Introduction

Educational environments have a crucial role in students' learning outcomes [1] by influencing their motivation, academic performance, health and well-being [2]. These environments involve a range of elements, including physical, social and psychological factors that can be used to positively impact students' sense of belonging in the school environment, improve their engagement and support students with diverse learning needs [3]. A critical aspect of these environments consists of physical conditions such as air quality, temperature, lighting, and noise level. The optimum physical conditions in educational environments are achieved with climate-responsive design, referring to architectural strategies to design buildings to respond to local climatic conditions, considering both buildings' energy performance against both current and future climatic challenges and students' environmental needs and expectations [4].

Future climate projections for 2030, 2050, and 2070 predict an average global temperature increase of 2.7 °C, intensifying the challenges faced by existing educational buildings. Rising temperatures and shifting climatic conditions contribute to increased energy consumption for heating, cooling, and ventilation, alongside straining resources and exacerbating environmental impacts [5]. To address these challenges, improving energy efficiency through advanced building design strategies, such as high-performance insulation, upgraded windows, and optimised building envelopes, has become a priority. These measures can reduce a school building's energy consumption by 50% to 57% annually while enhancing resilience to future climatic variability [6]. Anticipatory educational buildings, designed with future climate conditions in mind, are essential for maintaining safe, comfortable, and effective learning environments [7]. Beyond reducing energy consumption, climate-responsive design of learning environments plays a critical role in promoting educational equity by creating inclusive and adaptable spaces. These designs support student engagement and equip learners with effective coping strategies to address climate-related challenges. Ensuring that all students, regardless of their geographical location or local climate, have access to equitable and inclusive learning environments reflects a global commitment to inclusivity. Providing equal education opportunities, where no physical differences in built environment conditions or climate-related challenges hinder learning outcomes, contributes to a more resilient and informed future generation.

Creating a comfortable indoor environment requires assessing the climatic comfort conditions and understanding the perceived climatic needs of students at an early stage of the architectural design process [8]. Although considerable attention is given to climate-responsive design for enhancing indoor environments in effective learning environments, this consideration is often overlooked in the architectural designs of educational buildings in certain countries, such as Türkiye.

Despite the diverse climatic conditions in Türkiye, educational institutions are usually constructed based on similar typological design standards [9], which may pose a significant challenge to developing educational buildings that promote equality in the learning environment.
Typological approaches to educational building design often result in homogeneous learning environments that fail to meet the diverse needs of students in different contexts [10]. These uniform designs typically emerge during rapid expansion phases driven by administrative organisations, as they are considered both economically and practically advantageous for addressing the increasing demand for educational facilities. While such designs are recognised for their affordability and efficiency, they often fall short of indoor comfort and energy efficiency [11]. Research indicates that optimising indoor comfort strategies is crucial, especially in educational settings where the well-being of users directly influences learning outcomes [12]. These deficiencies, therefore, may exacerbate educational inequalities, inadvertently disadvantaging students in certain regions.

This study aims to examine whether educational buildings in Türkiye are designed uniformly across different climatic regions, evaluate their climate responsiveness, and, in cases where climate responsiveness is lacking, predict the potential short and long-term adverse impacts on student health and well-being and academic performance, to promote equitable learning environments. This research utilised the Köppen climate classification as the most widely used global climate classification system [13] to categorise Türkiye's climatic zones and selected pilot cities representing regions with extreme heat and cold conditions. The application of this classification to examine educational buildings in Türkiye, where such an analysis has not been previously conducted, highlights the significance of this research [14]. Following this, the educational buildings in these cities were assessed for design uniformity through architectural planning and overlapping analysis. In the next phase, the climate responsiveness of the selected buildings is evaluated based on key design parameters, including orientation, spatial layout, window-to-wall ratio, and other climate-responsive features, to determine how well these buildings adapt to their local environmental conditions. After identifying the uniformity of educational buildings across various climatic conditions and evaluating their lack of climate-responsive design, in the final phase, the potential short- and long-term impacts of this situation were synthesised using insights from the literature. This research highlights the often-overlooked intersection of climate, design, and education, contributing to the ongoing discourse on creating equitable learning environments. It offers valuable insights for administrative bodies, ministries of education, architects, and educators to rethink and redesign school building infrastructure in ways that foster equitable learning opportunities and support academic success for all students.

2. Background

2.1. The role of the physical environment in the learning environment

Educational environments play a critical role in shaping the students' learning experience, positively influencing both cognitive performance and emotional well-being [15]. Numerous studies have consistently shown that indoor environmental quality (IEQ) factors, such as lighting, thermal comfort, air quality, and noise levels, directly affect students' concentration, classroom participation and overall academic success [16]. For instance, classrooms with sufficient daylight and proper ventilation enhance students' cognitive performance during lessons, whereas poor thermal conditions or inadequate acoustics interfere with the learning process of students and increase their stress levels [17]. Evidence suggests that low lighting levels and poor air quality in learning environments can reduce cognitive performance by up to 36%, whereas optimal indoor comfort conditions, such as good lighting and optimum air quality, enable 90% of students to complete given tasks effectively and on time [18]. Additionally, high lighting levels have a booster impact on the time students spend on task completion by 41.7%. Similarly, maintaining the classroom temperatures between the optimum range of 22.4°C and 24.7°C significantly improves students' cognitive performance [19]. Excessive noise levels, on the other hand, adversely impact students' hearing and comprehension abilities, thereby disrupting functional learning [20]. For this reason, designing learning environments that adequately address students' physical and cognitive requirements is crucial to guiding them toward achieving successful educational outcomes. Therefore, in countries like Türkiye, with diverse and extreme climatic conditions, it is essential to prioritise indoor environmental quality (IEQ) and adapt educational buildings to local climates using climate-responsive design strategies, not only supporting environmental sustainability but also ensuring student comfort, promoting equitable and effective learning environments across all regions.

Standard projects primarily function as models utilised by the state to deliver rapid and cost-effective solutions while also being preferred for their ability to reduce planning errors [21]. They are typically designed and implemented by architects in a pilot region, often without considering critical factors such as land, climate, context, and topography related to the specific function of the project, whether it be for health, education, or other public structures [22]. Consequently, these standard educational designs overlook significant factors that are critical for countries with diverse climatic conditions, such as Türkiye, which experiences a range of climates from the hot, dry summers of the Mediterranean and Aegean regions to the cold winters of Eastern Anatolia.

Despite the significance of climate-responsive design, public school buildings in Türkiye are typically constructed using standardised architectural projects that rely on repetitive organisational layouts, neglecting to account for climatic conditions [23]. The standard educational structures are revised based on heat calculations and ground survey characteristics specific to the regions where they will be implemented. However, these revisions do not incorporate a building design approach that considers the local climate [24].

Educational building designs must prioritise user comfort both in the short and long term while also being mindful of the local climate conditions. The climate of the area where a building is constructed is a crucial factor that should not be overlooked when considering indoor thermal comfort. Additionally, school buildings should be designed with a flexible planning approach that not only addresses the needs of the current time but also considers the future requirements of upcoming generations of students. The typical one-size-fits-all strategy can adversely impact the quality of indoor comfort in educational spaces, particularly in areas with extreme climatic conditions [25]. For instance, schools located in hot climates often face challenges with excessive heat accumulation and insufficient cooling. In contrast, those in colder climates may not have the necessary insulation to keep temperatures comfortable [26]. Such deficiencies in the built environment can result in discomfort, reduced cognitive performance, and negatively impact students' overall well-being. In conclusion, the design of upcoming school buildings should be tailored to ensure they are conducive to education and provide a comfortable indoor environment. In this regard, there is an urgent need to reconsider the architectural design of educational facilities in Türkiye better to address the environmental requirements of various climate zones.

2.2. Climate-responsive educational building design

Climate-responsive building design has gradually emerged as a vital strategy for creating sustainable and comfortable learning environments, effectively addressing the urgent need for energy efficiency and improved indoor comfort in educational facilities. Key parameters of climate-responsive building design include optimising natural ventilation, thermal mass, shading, and orientation to adapt to climatic conditions, enhancing comfort and energy efficiency [27] [28]. The climate responsiveness of this study was evaluated using the architectural drawings of school buildings in the predefined pilot cities. Consequently, the parameters for the climate-responsive design were limited to the information obtained from these drawings, such as building orientation, insulation, shading, and the ratios of window-to-floor area (WFR) and window-to-wall area (WWR). These design parameters can be further elaborated as follows;

Building Orientation: There is no universally correct building orientation that applies across all climatic conditions. For instance, in warm climates, a southern orientation is preferred to maximise solar gain during the winter while minimising it in the summer. Benharchache et al. (2023) have shown that southern, northern, and eastern orientations are optimal for building placement in various regions of Algeria, significantly enhancing energy conservation.

Insulation material and thickness: The application of insulation is influenced by regional conditions, the type of materials utilised, and their thicknesses. Research conducted by Amani (2024) indicated that insulation materials such as polystyrene and bio-composite fibers have substantially reduced energy consumption in specific regions, resulting in savings that exceed 45%. Researchers also showed that effective thermal insulation can reduce heat loss from roofs by 14.2% and from walls by 26.5%, resulting in significant energy savings in warm and humid climates.

Window-to-Wall Area Ratio (WWR): The window-to-wall area ratio (WWR) refers to the proportion of window area to the total exterior wall area of a building. An optimised window-to-wall area ratio (WWR) can provide substantial energy savings; for instance, a recommended WWR of 65% is suggested for south and east-facing facades in Mediterranean climates [31]. Conversely, A WWR exceeding 70% should be avoided in hot climates unless adequate shading is provided to prevent excessive heat gain [32].

Window-to-Floor Area Ratio (WFR): The window-to-floor area ratio (WFR) is another crucial parameter for optimising natural light, enhancing indoor comfort, and improving energy efficiency. Mirrahimi et al. (2013) suggested that a WFR of 15% to 20% is ideal for classrooms in Malaysia, providing sufficient daylight considering the temperature and humidity of the tropical climate. On the other hand, a higher WFR of approximately 20% is generally recommended in temperate regions like Europe, where sunlight is less intense, to ensure adequate daylighting [34].

Sun-Shading Elements: Integrating practical sun-shading elements, such as overhangs and shutters in building facades can significantly reduce cooling energy consumption, particularly in regions with high solar radiation, while improving thermal comfort [35].

Future Considerations: As climate change increases the demand for cooling, building designers are encouraged to incorporate future climate scenarios into their design processes to ensure comfort and efficiency in hotter regions [36].

Global examples illustrate that climate-responsive design strategies, such as optimising building orientation and enhancing thermal comfort, can yield significant energy savings.

Studies showed that these strategies have achieved up to 12% greater energy efficiency compared to traditional methods in India [37], whereas educational buildings in hot-dry and hot-humid regions, like Iran, have also benefited from optimal building orientation and the incorporation of green areas for shading, leading to improved energy efficiency and user comfort [38].
These diverse climate examples underscore the potential advantages of climate-responsive design in creating learning environments that prioritise both student comfort and energy efficiency, offering valuable insights for Türkiye. Achieving a balance among climate-responsive design parameters is crucial for developing equitable educational environments that align with optimal building performance and occupant comfort in various climate conditions. Thus, this research has developed design recommendations to provide maximum occupant comfort and equitable learning environments across various climates, particularly focusing on these key parameters.

2.3. The role of learning environment on educational equity

The physical conditions of educational environments typically depend on a standardised design, which often fails to meet the unique needs of different regions, leading to issues of equity [39]. Research indicates that over 90% of educational institutions suffer more damage from disasters, particularly those in communities with limited funding or adverse climate conditions [40]. This situation highlights that students in regions facing challenging climate conditions are more vulnerable to harmful environmental factors, which can negatively impact their academic performance and overall health and well-being.
In Türkiye, disparities in educational infrastructure between central and peripheral regions and changing climate conditions exacerbate existing inequalities. Infrastructure damage during the winter season can result in extended class cancellations, leading to a loss of productive class hours. The cancelled classes each day due to environmental factors can also cause missed opportunities for students to learn and issues of equity among students in various climatic conditions [41]. Conversely, students in well-funded or temperate regions benefit from climate-appropriate and comfortable learning environments, whereas those in harsher climates encounter numerous challenges that undermine their motivation to learn, including health issues and anxiety related to natural disasters [42].

Educational equity encompasses not only access to education but also the right of all students to learn in physically suitable and comfortable environments that promote their well-being. In regions with extreme climate conditions, students encounter additional obstacles such as thermal discomfort and poor air quality in educational settings, as school buildings are often not designed to meet the specific climatic needs of the area. Although governments have implemented various policies to address these challenges, such as adjusting school timetables and developing heat response plans, significant gaps remain in effectively addressing posed by climate change [43]. Despite the implementation of various policies by governments to address these challenges, such as adjusting school timetables and developing heat response plans, significant gaps persist in effectively addressing the issues posed by climate change. Consequently, the climatic suitability of learning environments has emerged as a critical area of research, given its profound impact on students' motivation, health, and academic performance.

2.4. Aim and hypotheses

School environments, where students spend the majority of their time, are essential not only for energy efficiency and sustainability but also for their physical, cognitive, and psychological health, as well as their academic performance [44]. The literature indicates that deficiencies in comfort, such as inadequate heating, cooling, and ventilation, within educational environments adversely affect students' motivation, concentration, and overall health [45]. For instance, insufficient natural lighting diminishes visual comfort and cognitive performance [46], while a lack of thermal comfort poses risks to physical health in the learning environment [47]. Therefore, the widespread adoption of standardised project designs, often implemented for economic and practical reasons, overlooks local climate differences, which may lead to school buildings in various climatic zones, such as those in Türkiye, failing to meet user needs and neglecting crucial factors like indoor comfort, energy efficiency, air quality, and the principle of equitable education.

Despite a substantial body of research on the impact of environmental factors on learning [48], relatively few studies in Türkiye have specifically explored the role of climate-responsive design in enhancing educational equity [49]. Current research on educational buildings in the country has mainly focused on standardised project design, frequently neglecting the unique challenges presented by specific climatic conditions in various regions, as well as the discomfort stemming from the inequitable environments in which students learn [50]. Moreover, the relationship between climate-responsive building design and students' cognitive performance remains an under-explored area within the Turkish context.

This study aims to examine whether educational buildings in Türkiye are designed uniformly across different climatic regions, evaluate their climate responsiveness, and, in cases where climate responsiveness is lacking, predict the potential short- and long-term adverse impacts on student health, well-being, and academic performance. This research utilised the Köppen climate classification to categorise Türkiye's climatic zones and selected pilot cities representing extreme heat and cold regions. Following this, the educational buildings in these cities were assessed for design uniformity through architectural plan analysis and overlapping analysis. In the next phase, the climate responsiveness of the selected buildings is assessed based on key design parameters, including orientation, spatial layout, window-to-wall ratio, and other climate-responsive features, to determine how well these buildings adapt to their local environmental conditions. After identifying the uniformity of educational buildings across various climatic conditions and evaluating their lack of climate-responsive design, in the final phase, the potential short- and long-term impacts of this situation were synthesised using insights from the literature.

The key hypotheses guiding this study are as follows:
Hypothesis 1: Educational buildings in Türkiye are designed uniformly across different climatic regions, regardless of local climate conditions.
Hypothesis 2: The climate responsiveness of educational buildings in Türkiye is insufficient to meet the specific needs of students in varying climatic zones.
This study explores how climate-responsive design strategies can advance equity in education by enhancing indoor comfort, fostering supportive learning environments for all students, and improving energy efficiency. It seeks to deepen the understanding of the relationship between architecture, climate, and educational outcomes, providing valuable insights for future design practices and policies that prioritise sustainability and equity. Furthermore, the research emphasises the necessity of a flexible planning approach in designing educational facilities to address future climate comfort needs resulting from climate change.

3. Material and Method

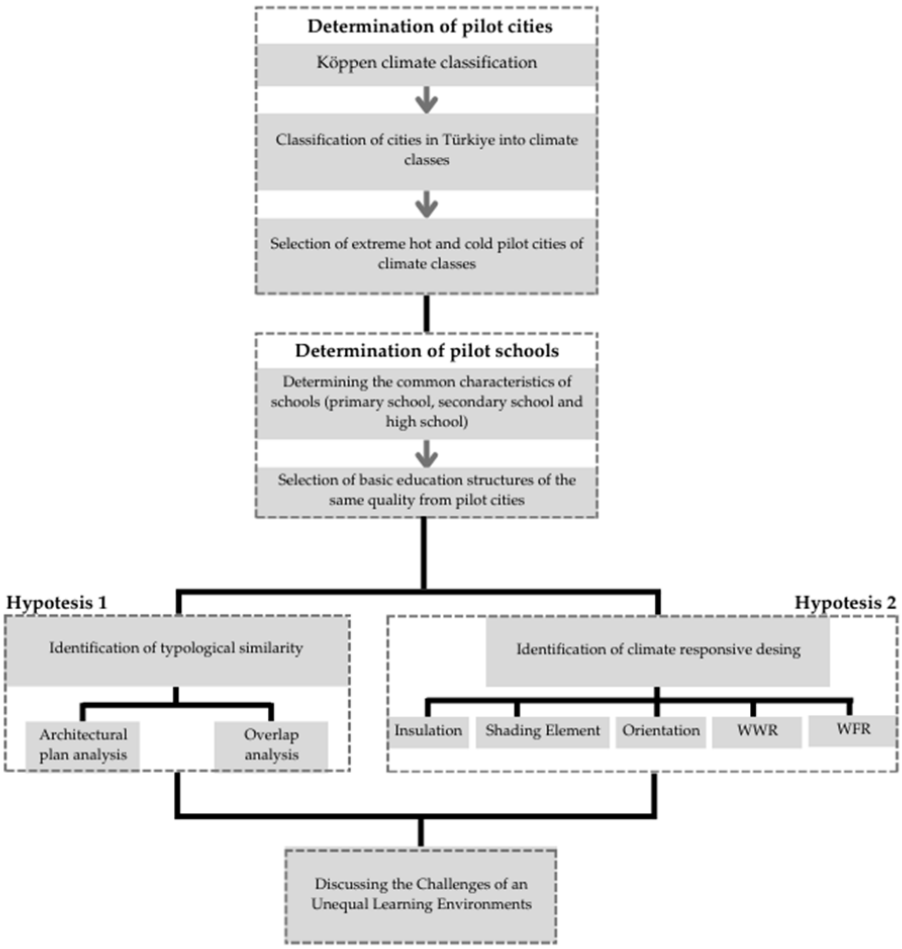


Figure 1. Methodology Flow Diagram

The accompanying diagram (**Figure 1**) illustrates the methodology flow, which visualises the methodology's narrative. It was observed that educational structures concerning standard projects focused on thermal comfort and the Köppen Climate Classification across different climate types had not been analysed. This gap highlights one of the study's originality. Considering its global recognition, the Köppen Climate Classification was selected for its validity and applicability in this research. Data on provinces and districts were sourced from the tables titled "Climate Type and Climate Characteristics of Our Provinces and Some Districts According to Köppen," obtained from the General Directorate of Meteorology [51]. Additionally, the annual average temperature, as well as the average highest and lowest temperatures for each province in Türkiye classified by climate type, were visualised using information from the "Seasonal Normals of Our Provinces (1991-2020)" table published by the General Directorate of Meteorology [52]. Since districts are not included in this publication, their annual average temperatures were accessed through the Weather Spark website [53]. In light of this information, tables were created for each climate type, presenting annual average temperature, average maximum temperature and average minimum temperature data in the context of the Köppen Climate classification of cities in Türkiye (**see Appendix 1**).

The produced data was transformed into three stages of graphs to clarify the climate data of Türkiye, and define pilot cities and schools for analysis. In the first stage, the general average temperatures of Türkiye, including the average highest and lowest temperatures, were converted into graphs (see **Figures 2, 3, and 4**). Secondly, ten Köppen climate types seen in Türkiye were compared through graphs of average, highest, and lowest temperatures, highlighting pilot cities that exemplify each climate type (see **Figures 5,6,7**). Lastly, predefined pilot cities with extreme temperature characteristics were compared with each other, focusing on extremely hot and cold cities (see **Figures 8 and 9**). The similar characteristics of primary, secondary and high schools to address the changing needs of users across different age groups were then tested based on two following hypotheses;

The first hypothesis of this study was whether educational buildings in Türkiye are designed uniformly across different climatic regions, regardless of local climate conditions. Firstly, educational buildings in Türkiye were compared regarding their architectural layouts using the pilot schools' drawings obtained from the EKAP (Electronic Public Procurement Platform), which provides architectural drawings of public school buildings in Türkiye. For each pilot region experiencing different climate types, plan diagrams were developed for primary, secondary, and high school buildings, with one representing extremely hot conditions and another depicting extremely cold conditions. Secondly, the Mean Absolute Deviation Percentage (MDAP) analysis [54] was utilised to evaluate the degree of overlapping among these designs. This analysis revealed the extent to which the sizes of schools, particularly in spaces such as classrooms and corridors, varied in their architectural design.

The second hypothesis was whether the climate responsiveness of educational buildings in Türkiye is insufficient to meet the specific needs of students in varying climatic zones. In order to test this hypothesis, accessible parameters in the architectural drawings obtained from the EKAP platform were considered as indicators of climate-responsive building design. These parameters were insulation material and thickness, shading elements, building orientation, window and floor area ratio (WFR), and window and wall area ratio (WWR). The examination focused on primary, secondary, and high school buildings located in extremely hot and cold pilot cities representing each climate type.

Afterwards, the parameters were assessed against the guideline values specified for that region. Orientation, shading elements, and window-to-floor areas (WFR) of classrooms were evaluated using the guidelines prepared by the Ministry of National Education [55]. The suitability of insulation materials was assessed based on degree day regions [56]. Furthermore, window-to-wall areas (WWR) and window-to-floor areas (WFR) [57] were analysed based on the optimal values provided in the literature. In the final stage, the discussion focused on whether a lack of climate responsiveness in educational buildings negatively impacts student health and well-being, drawing on the findings from Hypotheses 1 and 2. The subsequent stage of this study, which is not included in this manuscript, will focus on real-world applications, anticipating that the design of typical buildings in different climates will lead to unequal learning environments, as indicated by both students' feedback and measurement results. In this stage, specific schools in various climates will be visited, and students' comfort levels and cognitive performance in that specific environment will be tested, considering instantaneous environmental parameters such as daylight, temperature, noise level, etc.

4. Results

This study explores the typological similarities and climate responsiveness of school designs across Türkiye's diverse climatic regions, explicitly examining how these designs adapt to local environmental conditions. In addition, it addresses the need for equality among students whose learning environments are influenced by varying climates and the challenges they encounter.

By understanding these adaptations, the research aims to contribute to more equitable educational experiences for all students, regardless of their geographic and climatic contexts.

4.1. Determination of pilot cities

The Köppen climate classification evaluated Türkiye's diverse climatic regions by analysing average, maximum, and minimum temperatures. The study examined variations among these categories, presenting results through a series of graphs ranging from broad to specific insights. **Figure 2** shows that the mean annual temperature in Türkiye varies significantly, from approximately 6°C in the eastern provinces to 18°C in the southern coastal regions, with middle areas falling in between. **Figure 3** illustrates that average maximum temperatures can exceed 40°C in southeastern provinces like Şanlıurfa during the summer, while northern coastal areas experience temperatures of 30°C or lower. Conversely, **Figure 4** indicates that average minimum temperatures can drop to -15°C in eastern provinces such as Erzurum during winter, whereas western and coastal regions rarely fall below 5°C. These graphs highlight Türkiye's climatic diversity, aiding in the selection of pilot provinces, Şanlıurfa and Erzurum, representing extreme heat and cold, respectively, to assess the adaptability of school designs to local climates.

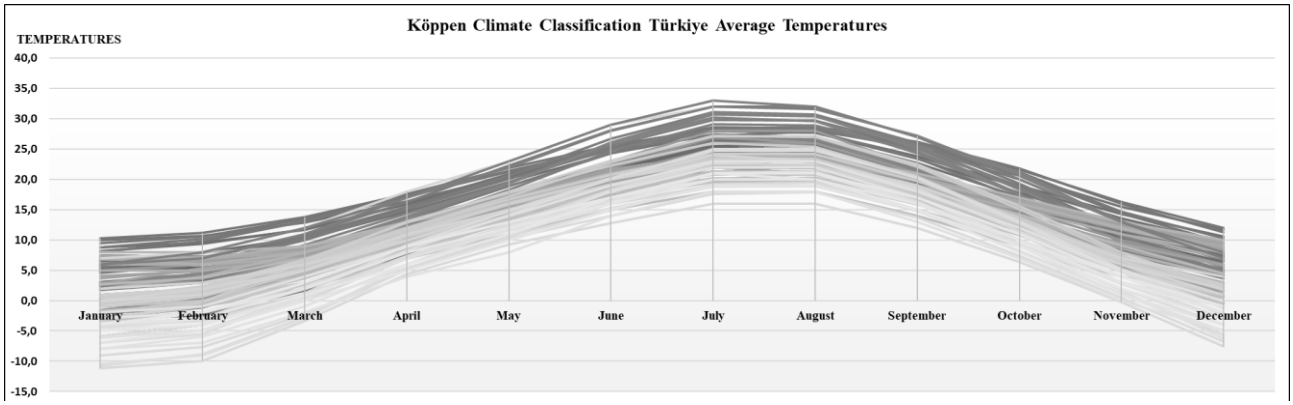


Figure 2. Köppen Climate Classification Türkiye Average Temperatures

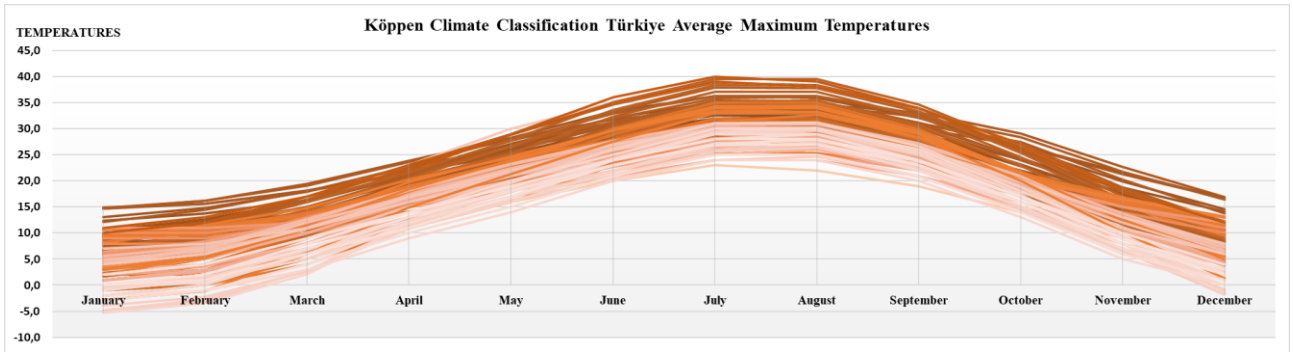


Figure 3. Köppen Climate Classification Türkiye Average Maximum Temperatures

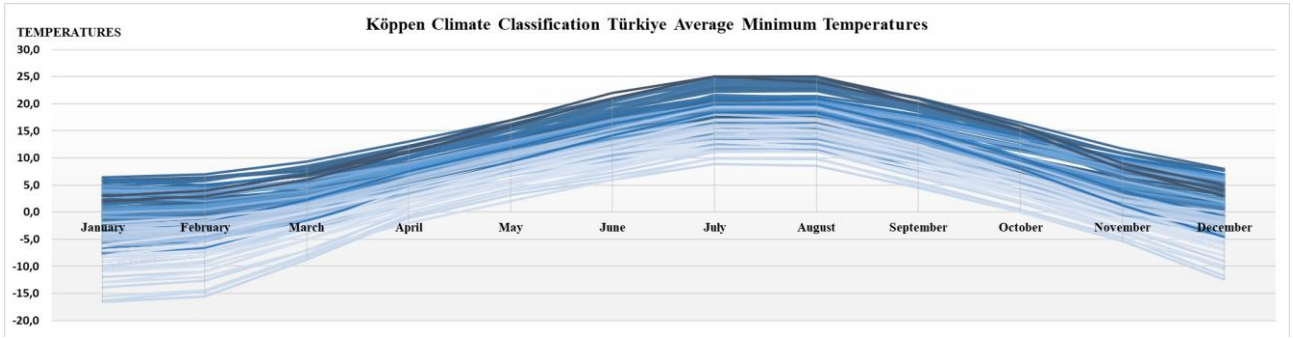


Figure 4. Köppen Climate Classification Türkiye Average Minimum Temperatures

As illustrated in the graphs, temperature differences within a single province in Türkiye can range between 15°C and 20°C even during the same month, underscoring the inadequacy of relying on typological similarity for such diverse climatic conditions. The Köppen climate classification categorises climate groups using a three-letter system.

The first letter identifies the general climate type: A (Equatorial Region), B (Arid Region), C (Warm Temperate Region), D (Snow Region), and E (Polar Region). The second letter specifies precipitation patterns, while the third details temperature variations [58].

The study analysed the average highest and lowest temperatures across the 10 Köppen climate types in Türkiye, along with the overall temperature averages. **Figure 5** indicates that the annual average temperature ranges from 18°C in the colder D climate type to 33°C in the hotter B climate type. **Figure 6** highlights that average summer temperatures exceed 40°C in southeastern provinces like Şanlıurfa, whereas other provinces typically see peaks below 30°C. In contrast, **Figure 7** illustrates that average lows can drop to -17°C or lower in eastern provinces such as Ardahan, while in other areas like Ceylanpınar, winter temperatures rarely fall below 5°C. These numerical variations were essential for identifying pilot cities where specific climate types were most prominent. The findings are presented graphically to offer a more precise visual representation of the significant climate changes across Türkiye.

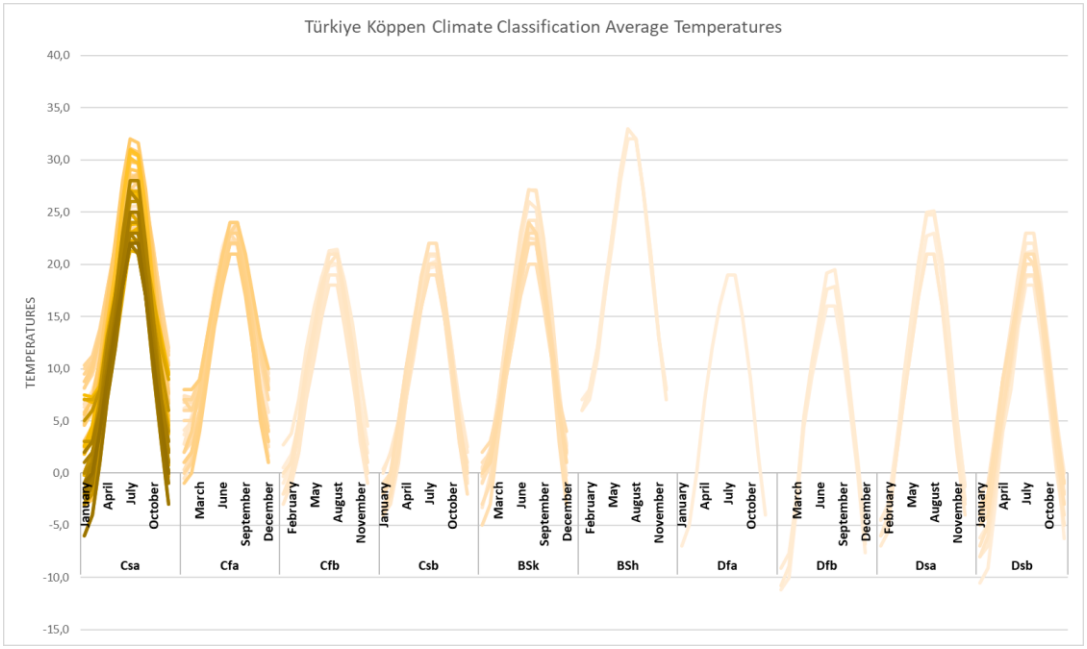


Figure 5. Türkiye Köppen Climate Classification Average Temperatures

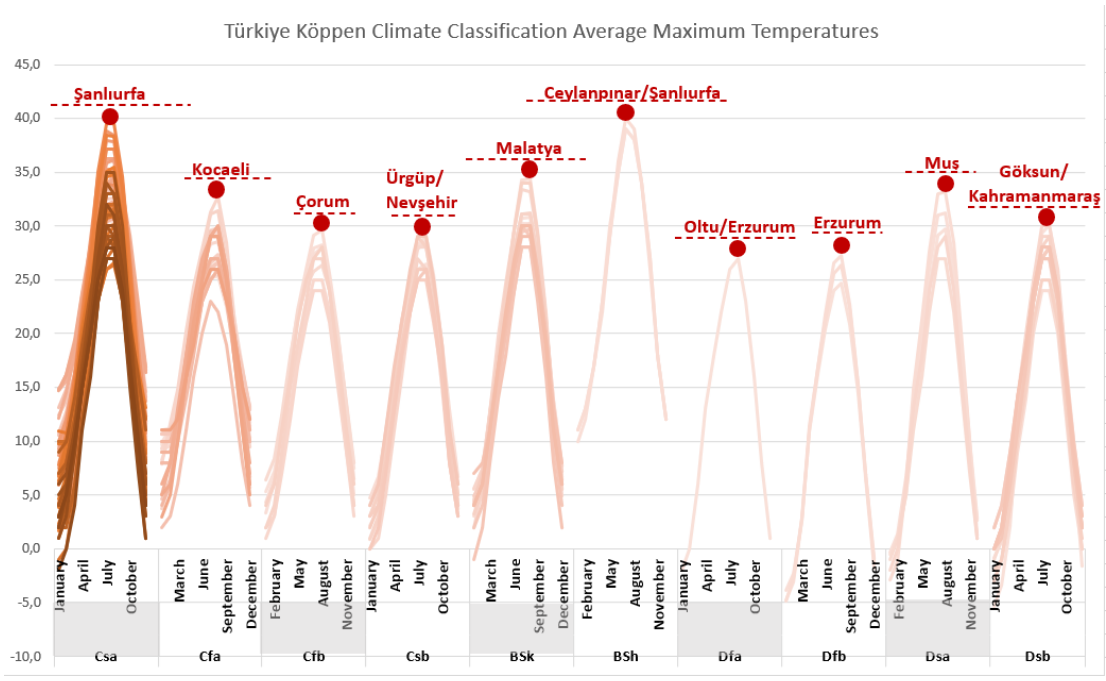


Figure 6. Türkiye Köppen Climate Classification Average Maximum Temperatures

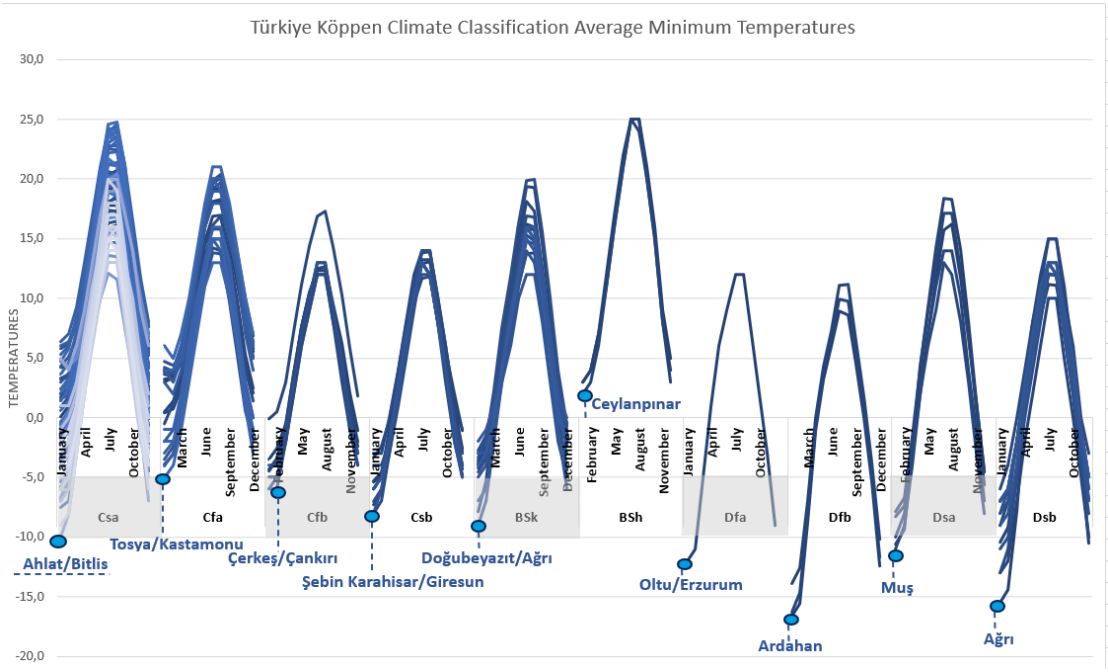
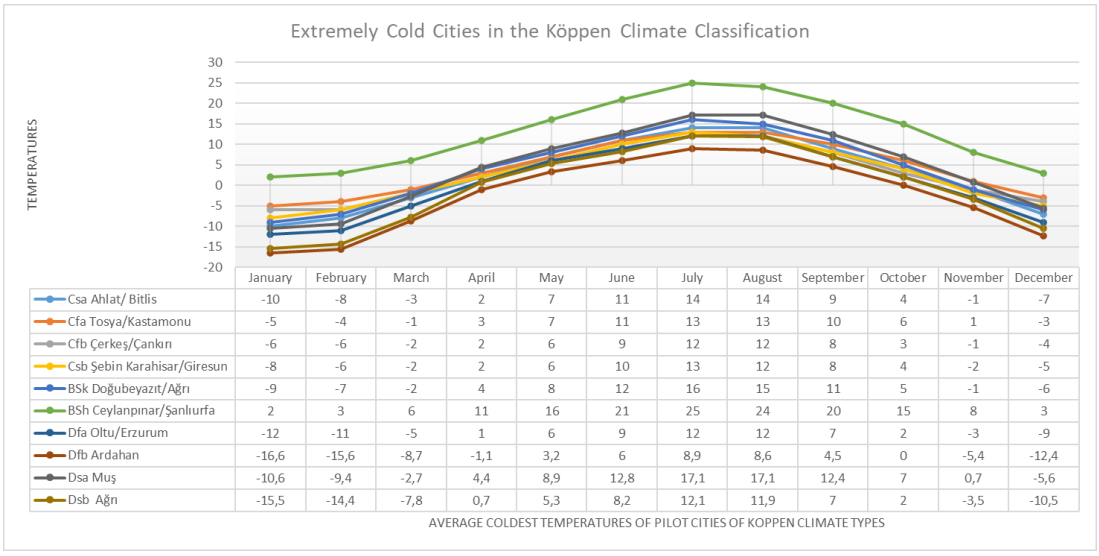


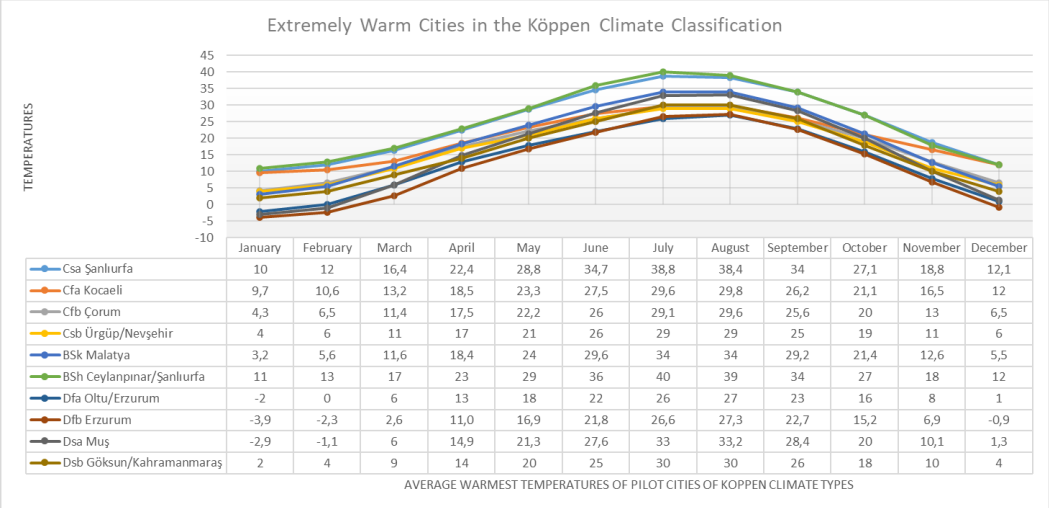
Figure 7. Türkiye Köppen Climate Classification Average Minimum Temperatures

In the context of the Köppen climate classification, the climate types of Türkiye, along with the differences between them and the extreme hot and cold pilot cities associated with each type, have been analyzed. The coldest pilot cities, represented in **Figure 8**, include Ceylanpınar and Ardahan, where average winter temperatures range from 2°C to -16°C. In contrast, the warmest pilot cities, depicted in **Figure 9**, experience summer temperatures often reaching between 25°C and 35°C, with extreme highs approaching 40°C. These significant differences highlight the inadequacy of typologically designed educational structures in providing equitable learning environments across regions. For example, schools in Ardahan may struggle to maintain thermal comfort during harsh winters, while those in Şanlıurfa face challenges in cooling during the intense summer heat. This inability to adapt to diverse climatic conditions emphasizes the urgent need for climate-responsive design tailored to the specific environmental demands of each region.



	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Csa Ahlat/ Bitlis	-10	-8	-3	2	7	11	14	14	9	4	-1	-7
Cfa Tosya/Kastamonu	-5	-4	-1	3	7	11	13	13	10	6	1	-3
Cfb Çerkeş/Çankırı	-6	-6	-2	2	6	9	12	12	8	3	-1	-4
Csb Şebin Karahisar/Giresun	-8	-6	-2	2	6	10	13	12	8	4	-2	-5
BSk Doğubeyazıt/Ağrı	-9	-7	-2	4	8	12	16	15	11	5	-1	-6
BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	2	3	6	11	16	21	25	24	20	15	8	3
Dfa Oltu/Erzurum	-12	-11	-5	1	6	9	12	12	7	2	-3	-9
Dfb Ardahan	-16,6	-15,6	-8,7	-1,1	3,2	6	8,9	8,6	4,5	0	-5,4	-12,4
Dsa Muş	-10,6	-9,4	-2,7	4,4	8,9	12,8	17,1	17,1	12,4	7	0,7	-5,6
Dsb Ağrı	-15,5	-14,4	-7,8	0,7	5,3	8,2	12,1	11,9	7	2	-3,5	-10,5

Figure 8. The differences observed among the coldest pilot cities



	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Csa Şanlıurfa	10	12	16,4	22,4	28,8	34,7	38,8	38,4	34	27,1	18,8	12,1
Cfa Kocaeli	9,7	10,6	13,2	18,5	23,3	27,5	29,6	29,8	26,2	21,1	16,5	12
Cfb Çorum	4,3	6,5	11,4	17,5	22,2	26	29,1	29,6	25,6	20	13	6,5
Csb Ürgüp/Nevşehir	4	6	11	17	21	26	29	29	25	19	11	6
BSk Malatya	3,2	5,6	11,6	18,4	24	29,6	34	34	29,2	21,4	12,6	5,5
BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	11	13	17	23	29	36	40	39	34	27	18	12
Dfa Oltu/Erzurum	-2	0	6	13	18	22	26	27	23	16	8	1
Dfb Erzurum	-3,9	-2,3	2,6	11,0	16,9	21,8	26,6	27,3	22,7	15,2	6,9	-0,9
Dsa Muş	-2,9	-1,1	6	14,9	21,3	27,6	33	33,2	28,4	20	10,1	1,3
Dsb Göksun/Kahramanmaraş	2	4	9	14	20	25	30	30	26	18	10	4

Figure 9. The differences observed among the warmest pilot cities

4.1. Hypothesis 1: Identification of typological similarity

The first hypothesis evaluated the degree of uniformity in school designs across pilot cities with varying climate types through an overlap analysis of plan schemes. The results indicated a high level of typological similarity among schools in these regions. To determine whether schools in pilot provinces with extreme climate values were designed as uniform projects, detailed data were collected from EKAP. Plan schemes, building sizes, and the percentage overlap of spaces for primary, secondary, and high school projects of the same quality were analysed in a typological context using MADP analysis.

The findings revealed significant overlap: primary schools exhibited a 69% typological overlap, secondary schools had the highest at 92%, and high schools also showed a 69% overlap. Furthermore, variations in building sizes across different provinces were minimal, with differences averaging only 5-8% between regions.

These results demonstrate that educational buildings are predominantly uniform in design despite being situated in provinces with distinct climatic conditions. For example, schools in Erzurum (cold snow climate, D) and Şanlıurfa (hot arid climate, B) share nearly identical layouts and building dimensions, highlighting the inadequacy of current typological designs in meeting climate-specific needs.

4.1.1. Plan schemes analysis

4.1.1.1. Primary schools

The analysis of primary school projects in pilot provinces with varying climatic conditions revealed that the plan schemes were predominantly similar and linear. As illustrated in **Figure 10**, most schools followed a linear design, with classrooms and administrative spaces organised along central corridors. For instance, primary schools in Ardahan (climate D) and Şanlıurfa (climate B), representing two extremes in temperature differences, exhibited nearly identical layouts, featuring average corridor widths of 2.5 meters and classroom sizes of approximately 50 square meters. These findings underscore the lack of adaptation to regional climate needs, as the same linear layouts are employed despite significant variations in temperature and environmental conditions between the provinces.

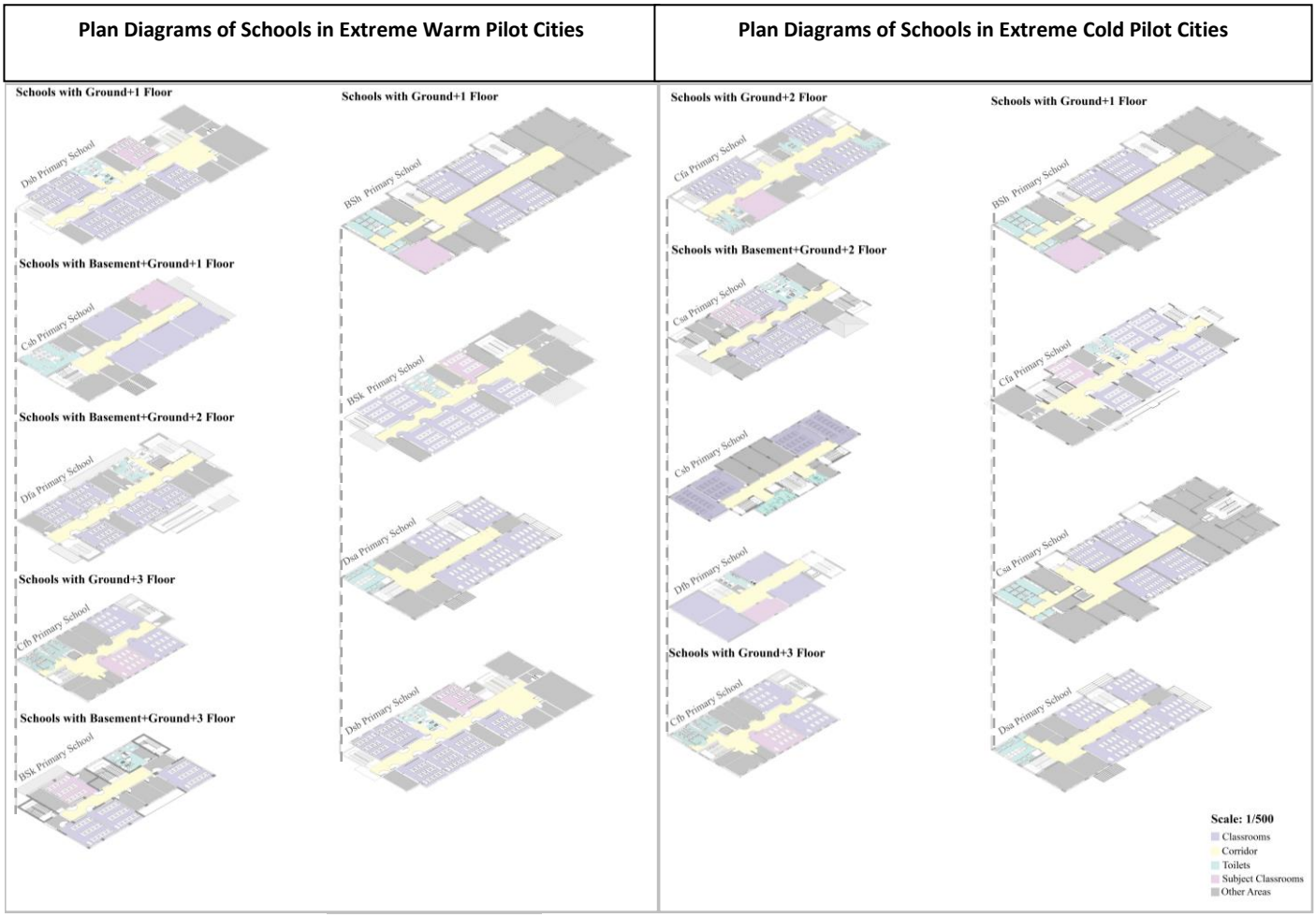


Figure 10. Primary school project plan schemes

4.1.1.2. Secondary schools

Secondly, the analysis of secondary school projects in pilot provinces with varying climate conditions revealed that the layout schemes were predominantly similar and followed a linear pattern, as depicted in **Figure 11**. Notably, a striking resemblance was observed between the designs of secondary and primary schools. For instance, corridor widths and classroom sizes in secondary schools closely align with those in primary schools, averaging 2.5 meters and 50 square meters, respectively. This homogeneity underscores the lack of climate-responsive and user-specific considerations in the design process. The standardised layouts fail to address the unique needs of secondary school users, particularly older students who require differentiated spatial arrangements to enhance their learning environments. Consequently, the findings highlight that secondary schools, much like primary schools, are designed without specific adaptations to their users' diverse climatic and educational needs.



Figure 11. Secondary school project plan schemes

4.1.1.3. High schools

Finally, the analysis of high school projects in pilot provinces with varying climates revealed that the architectural plan schemes displayed a notably similar and predominantly linear design, as illustrated in **Figure 12**. It was emphasised that there was consistent adherence to standard layouts across regions. When comparing the architectural plans of basic educational buildings (primary schools, secondary schools, and high schools), a high degree of similarity was observed, regardless of climate type or user group. In particular, the architectural designs of these schools did not reflect significant adjustments to accommodate the differing needs of user groups. This lack of differentiation becomes especially problematic as the average age of the user groups increases. [59] noted that metabolic rates change with age, directly impacting comfort standards, particularly thermal comfort. For instance, younger students in primary schools may have lower thermal comfort requirements, while older students in high schools need different environmental conditions to maintain comfort and focus. However, the design uniformity across educational structures fails to consider these metabolic and comfort differences, further underscoring the inadequacy of typological designs in providing equitable and climate-responsive learning environments.

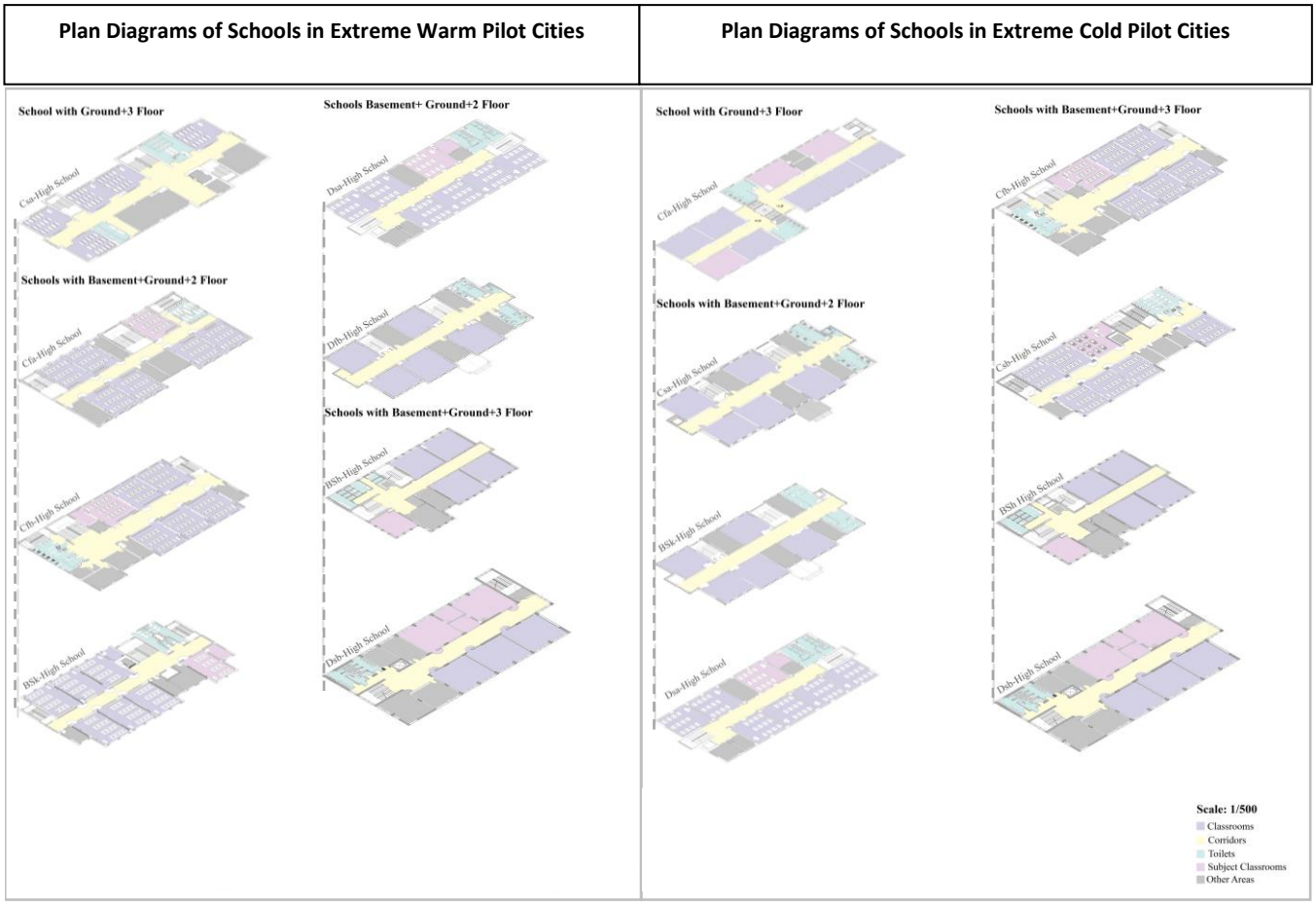


Figure 12. High school project plan schemes

4.2.2. Overlap analysis

The study conducted a comprehensive analysis to evaluate the typological similarity of school architectural designs by calculating the overlap percentages of various spaces. The classroom, being the primary space where students spend most of their time and crucial for cognitive performance, was prioritised in the analysis. Following the classroom, corridor spaces and other areas were also included in the overlap calculations, providing a thorough understanding of how different spaces in schools compare. As seen in **Table 1**, a significant finding was that middle schools exhibited an impressive 92% overlap in their architectural plans, indicating a strong similarity in design across various middle schools. Additionally, both primary and high schools showed a 69% overlap, highlighting notable similarities in their architectural plans despite differences in educational levels. Furthermore, the MADP value, particularly for classrooms, remained below 5, reflecting minimal differentiation. These results emphasise the importance of considering not only the plan schemes but also the actual spatial configurations when evaluating the typological similarities of schools. The findings indicate that while there are distinct characteristics in school designs, there is a significant level of uniformity, especially among primary, secondary, and high schools, suggesting a need for more climate-responsive and user-specific design approaches.

Table 1. Overlap analysis

	Primary School	Secondary School	High School
MADP	Classrooms: 4,6 Corridors: 3,4 Other Areas: 6,6	Classrooms: 3,9 Corridors: 2,4 Other Areas: 3,9	Classrooms: 4,1 Corridors: 5,5 Other Areas: 8,2
Standard Deviation	Classrooms: 6,6 Corridors: 4,9 Other Areas: 9,4	Classrooms: 5,0 Corridors: 3,0 Other Areas: 4,7	Classrooms: 5,3 Corridors: 7,7 Other Areas: 12,5
Overlapping Percentage	**69%**	**92%**	**69%**

The analysis revealed that the architectural plans of primary, secondary, and high schools across various climate types in Türkiye exhibit a high degree of similarity. Notably, the study confirmed significant typological similarity among these educational structures, with a 69% overlap for primary and high schools and an impressive 92% for secondary schools. This indicates that the designs remain largely uniform despite differing climatic conditions. Moreover, there is no substantial variation in the architectural designs of these schools across different user groups. Therefore, it is crucial to emphasise the need for schools to be designed in a manner that adapts to the evolving needs of their users.

4.3. Hypothesis 2: Identification of climate responsive design

The second hypothesis of this study posits that the climate responsiveness of educational buildings in Türkiye is insufficient to meet the specific needs of students across varying climatic zones. To test this hypothesis, accessible parameters from the EKAP platform, such as insulation material and thickness, shading elements, building orientation, window floor area ratio (WFR), and window wall area ratio (WWR), were considered as indicators of climate-responsive design. These parameters were examined in primary, secondary, and high school buildings located in regions characterised by extremely hot and cold climates. Subsequently, these parameters were evaluated against the guideline values specified for each region.

4.3.1. Insulation

Insulation was analysed due to its crucial role in ensuring thermal comfort within buildings [60]. The window floor area ratio was also considered, as it impacts both thermal and lighting comfort in relation to the depth and façade of a space [61]. The window wall ratio is another important parameter influencing comfort, particularly through façade design and orientation, and should vary according to climate [62]. Building orientation inherently affects all these window and façade ratios [63]. Additionally, shading elements are essential design features that must be integrated into façade design to meet climate requirements [64]. Upon examining the insulation parameters of primary school projects (**Table 2**), secondary school projects (**Table 3**), and high school projects (**Table 4**), it becomes evident that, despite attention to insulation, there is a noticeable tendency to overuse materials, which adversely impacts cost-effectiveness. For instance, primary schools typically employ 8 cm of Stone Wool wall insulation thickness in 3rd Degree day zones, while the recommended insulation for these zones is only 5 cm, suggesting potential material overuse. Similarly, secondary schools utilise 10 cm of XPS wall insulation, whereas the recommended insulation for 4th Degree day zones is just 6 cm. In high school projects, insulation also tends to exceed recommended parameters, with instances of using up to 5 cm of Stone Wool when only 4 cm of insulation is necessary for 2nd Degree zones. This overuse can result in unnecessary costs without significantly enhancing thermal comfort.

Table 2. Investigation of insulation parameters of primary schools

PRIMARY SCHOOL TYPE PROJECTS						
Köppen Climate Classification	**Köppen Climate Classification Codes**	**MEB Climate Classification**	**Degree Day Regions**	**Existing Insulation**	**Recommended Insulation**	**Control**
COLD	**Csa** Van	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	**Hot Humid**	**3. Degree**	Wall: 5 cm EPS	Wall: 5 cm	✓
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	**4. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	X
	Csb Sivas	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 7 cm EPS	Wall: 6 cm	✓✓
	BSk Konya	**Cold**	**3. Degree**	Wall: 8 cm Rock Wool	Wall: 5 cm	✓✓
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall : 5 cm Glass Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Dfb Ardahan	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 5 cm EPS	Wall: 6 cm	X
	Dsa Muş	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Dsb Ağrı	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 3 cm XPSX5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓
WARM	**Csa** Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 4 cm XPS	Wall: 4 cm	✓
	Cfa Afyonkarahisar	**Hot Humid**	**3. Degree**	Wall: 6 cm EPS	Wall: 5 cm	✓✓
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	**4. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	X
	Csb Gümüşhane	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 7 cm XPS	Wall: 6 cm	✓✓
	BSk Malatya	**Cold**	**3. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 5 cm	✓
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Glass Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Dfb Erzurum	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 8 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓
	Dsa Muş	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Dsb Ağrı	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 3 cm XPSX5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓

Table 3. Investigation of insulation parameters of secondary schools

SECONDARY SCHOOL TYPE PROJECTS						
Köppen Climate Classification	**Köppen Climate Classification Codes**	**MEB Climate Classification**	**Degree Day Regions**	**Existing Insulation**	Recommended Insulation	**Control**
COLD	**Csa** Van	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	**Hot Humid**	**3. Degree**	Wall: 5 cm EPS	Wall: 5 cm	✓
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Csb Sivas	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 7 cm XPS	Wall: 6 cm	✓✓
	BSk Konya	**Cold**	**3. Degree**	Wall: 5 cm XPS	Wall: 5 cm	✓
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Glass Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Dfb Ardahan	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 5 cm EPS	Wall: 6 cm	X
	Dsa Muş	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Dsb Ağrı	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 8 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓
WARM	**Csa** Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Glass Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Cfa Afyonkarahisar	**Hot Humid**	**3. Degree**	Wall: 6 cm EPS	Wall: 5 cm	✓✓
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Csb Gümüşhane	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 10 cm XPS	Wall: 6 cm	✓✓
	BSk Malatya	**Cold**	**3. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 5 cm	✓
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Glass Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Dfb Erzurum	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	X
	Dsa Muş	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Dsb Ağrı	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 8 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓

Table 4. Investigation of insulation parameters of high schools

HIGH SCHOOL TYPE PROJECTS						
Köppen Climate Classification	**Köppen Climate Classification Codes**	**MEB Climate Classification**	**Degree Day Regions**	**Existing Insulation**	Recommended Insulation	**Control**
COLD	**Csa** Van	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 5 cm XPS	Wall: 6 cm	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	**Hot Humid**	**3. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 5 cm	✓✓
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Csb Sivas	**Hot Dry**	**4. Degree**	Wall: 5 cm XPS	Wall: 6 cm	X
	BSk Konya	**Cold**	**3. Degree**	Wall: 5 cm XPS	Wall: 5 cm	✓
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Dsa Muş	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Dsb Ağrı	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 8 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓
WARM	**Csa** Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Cfa Afyonkarahisar	**Hot Humid**	**3. Degree**	Wall: 6 cm EPS	Wall: 5 cm	✓✓
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	BSk Malatya	**Cold**	**3. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 5 cm	✓✓
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	**2. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 4 cm	✓✓
	Dfb Erzurum	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 5 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	X
	Dsa Muş	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 6 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓
	Dsb Ağrı	**Cold**	**4. Degree**	Wall: 8 cm Rock Wool	Wall: 6 cm	✓✓

4.3.2. Orientation and shading elements

It is evident that shading elements and orientation parameters are largely overlooked in various educational projects. In the primary school projects (**Table 5**), it is particularly notable that the shading elements mandated by the Ministry of National Education are absent in 85% of the analysed schools located in hot and dry regions, such as Şanlıurfa and Van. Additionally, none of the 18 primary schools examined implemented orientations correctly, with an average deviation of 15° from the recommended angles. A similar trend is observed in secondary school projects (**Table 6**), where 78% of the schools lacked appropriate shading elements, and the orientation was incorrectly implemented in 12 out of 18 schools, deviating by an average of 12° from optimal orientations. In contrast, high school projects (**Table 7**) demonstrate a more favourable situation, as shading elements were present in 3 out of 5 schools in the hot and dry region, where they are required, indicating a positive shift toward climate-responsive design. However, even in these cases, the average deviation of orientation from the recommended angles is 10°, suggesting that further improvements are necessary across all levels of education.

Table 5. Investigation of shading element and orientation parameters of primary schools

Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	MEB Climate Classification	Shading Element (Existing)	Shading Element (Recommended)	Shading Element (Control)	Orientation (Existing)	Orientation (Recommended)	Orientation (Control)
COLD	**Csa** Van	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	5° Southeast	25° South-Southeast	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	**Hot Humid**	EPS Jamb	Recommended	✓	40° Southwest	5° South-Southeast	X
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	-	Recommended	X	49° Southwest	5° South-Southeast	X
	Csb Sivas	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	23° Southwest	25° South-Southeast	X
	BSk Konya	**Cold**	-	Not Necessary	✓	9° Southeast	12° South-Southeast	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	27° Southeast	25° South-Southeast	X
	Dfb Ardahan	**Cold**	Jamb	Not Necessary	X	37° Southwest	12° South-Southeast	X
	Dsa Muş	**Cold**	EPS Jamb	Not Necessary	X	46° Southeast	12° South-Southeast	X
	Dsb Ağrı	**Cold**	-	Not Necessary	✓	45° Southwest	12° South-Southeast	X
WARM	**Csa** Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	5° Southeast	25° South-Southeast	X
	Cfa Afyonkarahisar	**Hot Humid**	EPS Jamb	Recommended	✓	33° Southwest	5° South-Southeast	X
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	-	Recommended	X	49° Southwest	5° South-Southeast	X
	Csb Gümüşhane	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	76° Southeast	25° South-Southeast	X
	BSk Malatya	**Cold**	EPS Jamb	Not Necessary	X	46° Southeast	12° South-Southeast	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	27° Southeast	25° South-Southeast	X
	Dfb Erzurum	**Cold**	EPS Jamb	Not Necessary	X	2° Southwest	12° South-Southeast	X
	Dsa Muş	**Cold**	EPS Jamb	Not Necessary	X	46° Southeast	12° South-Southeast	X
	Dsb Ağrı	**Cold**	-	Not Necessary	✓	45° Southwest	12° South-Southeast	X

Table 6. Investigation of shading element and orientation parameters of secondary schools

Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	MEB Climate Classification	Shading Element (Existing)	Shading Element (Recommended)	Shading Element (Control)	Orientation (Existing)	Orientation (Recommended)	Orientation (Control)
COLD	**Csa** Van	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	57° Southwest	25° South-Southeast	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	**Hot Humid**	EPS Jamp	Recommended	✓	24° Southeast	5° South-Southeast	X
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	EPS Jamp	Recommended	✓	75° Southeast	5° South-Southeast	X
	Csb Sivas	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	5° Southwest	25° South-Southeast	X
	BSk Konya	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	6° Southeast	12° South-Southeast	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	4° Southeast	25° South-Southeast	X
	Dfb Ardahan	**Cold**	-	Not Necessary	✓	74° Southeast	12° South-Southeast	X
	Dsa Muş	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	North-South	12° South-Southeast	X
	Dsb Ağrı	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	15° Southeast	12° South-Southeast	X
WARM	**Csa** Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	15° Southeast	25° South-Southeast	X
	Cfa Afyonkarahisar	**Hot Humid**	EPS Jamp	Recommended	✓	10° Southeast	5° South-Southeast	X
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	EPS Jamp	Recommended	✓	75° Southeast	5° South-Southeast	X
	Csb Gümüşhane	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	7° Southwest	25° South-Southeast	X
	BSk Malatya	**Cold**	-	Not Necessary	✓	2° Southwest	12° South-Southeast	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	4° Southeast	25° South-Southeast	X
	Dfb Erzurum	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	14° Southwest	12° South-Southeast	X
	Dsa Muş	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	North-South	12° South-Southeast	X
	Dsb Ağrı	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	15° Southeast	12° South-Southeast	X

Table 7. Investigation of shading element and orientation parameters of high schools

Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	MEB Climate Classification	Shading Element (Existing)	Shading Element (Recommended)	Shading Element (Control)	Orientation (Existing)	Orientation (Recommended)	Orientation (Control)
COLD	**Csa** Van	**Hot Dry**	Jamp	Obligatory	✓✓	30° Southwest	25° South-Southeast	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	**Hot Humid**	-	Recommended	X	Vaziyet yok	5° South-Southeast	X
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	EPS Jamp	Recommended	✓	10° Southwest	5° South-Southeast	X
	Csb Sivas	**Hot Dry**	XPS Jamp	Obligatory	✓✓	North-South	25° South-Southeast	X
	BSk Konya	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	9° Southwest	12° South-Southeast	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	20° Southwest	25° South-Southeast	X
	Dsa Muş	**Cold**	-	Not Necessary	✓	44° Southeast	12° South-Southeast	X
	Dsb Ağrı	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	9° Southwest	12° South-Southeast	X
WARM	**Csa** Şanlıurfa	**Hot Dry**	Jamp	Obligatory	✓✓	19° Southwest	25° South-Southeast	X
	Cfa Afyonkarahisar	**Hot Humid**	-	Recommended	X	24° Southwest	5° South-Southeast	X
	Cfb Kastamonu	**Hot Humid**	EPS Jamp	Recommended	✓	10° Southwest	5° South-Southeast	X
	BSk Malatya	**Cold**	EPS Jamp	Not Necessary	X	17° Southeast	12° South-Southeast	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	**Hot Dry**	-	Obligatory	X	20° Southwest	25° South-Southeast	X
	Dfb Erzurum	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	8° Southeast	12° South-Southeast	X
	Dsa Muş	**Cold**	-	Not Necessary	✓	44° Southeast	12° South-Southeast	X
	Dsb Ağrı	**Cold**	Jamp	Not Necessary	X	9° Southwest	12° South-Southeast	X

4.3.3. Window-to-wall area ratio (WWR)

Regarding the window-to-wall area ratio (WWR) parameter, some harmony is observed in the facades of primary school buildings, with 11 out of 18 schools showing consistent design (**Table 8**). However, there are no instances where every facade is harmonised. In analysing selected classrooms, this lack of compatibility can negatively impact interior comfort conditions. Additionally, it was found that 55.5% of the classrooms are situated on the east and west facades. In secondary schools (**Table 9**), only 7 out of 18 projects—approximately half—were designed in accordance with the recommended ratio, and no classrooms met the appropriate ratio criteria. Furthermore, in secondary school projects, 50% of the schools are also located on the east and west facades. In high school projects (**Table 10**), appropriate values for the WWR are more frequently observed compared to primary and secondary schools. In these projects, at least one facade (13 out of 15) falls within the recommended ratio range in nearly all schools. Another noteworthy observation is that, unlike primary and secondary schools, almost all high school classroom facades (13 out of 15) are oriented toward the south and north.

However, the classroom arrangements do not align with climate zone recommendations, as observed in the primary and secondary schools.

Table 8. Investigation of window-wall area ratio (WWR) parameters of primary school

PRIMARY SCHOOL TYPE PROJECTS		Window-Wall Area Ratio (%)								Sample Classrooms		
Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	North Facade	Recommended %5-10	South Facade	Recommended %10-22.5	East Facade	Recommended %10-15	West Facade	Recommended %10-15	Orientation	Degree	Control
COLD	Csa Van	8,48	✓	7,58	X	18,18	X	19,3	X	East West	30,6	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	5,5	✓	7,2	X	17,2	X	21,4	X	East West	29	X
	Cfb Kastamonu	9,9	✓	2,6	X	17,4	X	23,4	X	East West	28,5	X
	Csb Sivas	15	X	24,8	X	15,8	X	17,3	X	South East West	S: 34,8 E: 28,6 W: 25,1	X
	BSk Konya	0,35	X	4,66	X	28,28	X	23,06	✓	East West	54,83	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	24,7	X	20,2	✓	5,2	X	5,4	X	North South	35,8	X
	Dfb Ardahan	10,88	X	9,51	X	0,45	X	34,13	X	South North West	S: 20 N: 27 W: 34,29	S ✓ N X W X
	Dsa Muş	16,3	X	19,4	✓	13	✓	3,4	X	North South	30	X
	Dsb Ağrı	0,3	X	2,5	X	25,4	X	20,3	X	East West	39,8	X
		North Facade	Recommended %5-10	South Facade	Recommended %15-22	East Facade	Recommended %10-15	West Facade	Recommended %10-15	Sample Classrooms		
WARM	Csa Şanlıurfa	4,2	X	6,2	X	26,5	X	24	X	East West	36,1	X
	Cfa Afyonkarahisar	2,8	X	0,9	X	28,2	X	24,5	X	East West	26,6	X
	Cfb Kastamonu	9,9	✓	2,6	X	17,4	X	23,4	X	East West	28,5	X
	Csb Gümüşhane	26,1	X	29,4	X	24,6	X	7,8	X	North South	31	X
	BSk Malatya	28,93	✓	32,23	X	16,42	✓	16,85	✓	North South	41,77	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	24,7	X	20,2	✓	5,2	X	5,4	X	North South	35,8	X
	Dfb Erzurum	21,6	✓	24,82	X	4,94	X	3,29	X	North South	43	X
	Dsa Muş	16,3	X	19,4	✓	13	✓	3,4	X	North South	30	X
	Dsb Ağrı	0,3	X	2,5	X	25,4	X	20,3	X	East West	39,8	X

Table 9. Investigation of window-wall area ratio (WWR) parameters of secondary school

SECONDARY SCHOOL TYPE PROJECTS		Window-Wall Area Ratio (%)								Sample Classrooms		
Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	North Facade	Recommended %5-10	South Facade	Recommended %10-22.5	East Facade	Recommended %10-15	West Facade	Recommended %10-15	Orientation	Degree	Control
COLD	Csa Van	19	X	16,9	✓	24,3	X	20,9	X	East West	40,4	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	5,4	✓	7,2	X	16,9	X	19,5	X	East West	28,6	X
	Cfb Kastamonu	9,6	✓	12,4	✓	26,2	X	25,6	X	East West	44,5	X
	Csb Sivas	3,8	X	3,8	X	21,7	X	28,2	X	East West	35,2	X
	BSk Konya	4,7	X	4,7	X	26	X	27,2	X	East West	43,6	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	26,4	X	26,1	X	4	X	4,3	X	North South	37,3	X
	Dfb Ardahan	24,2	X	0,4	X	7,3	X	5,9	X	East West North	E - W: 20 N: 34,2	X
	Dsa Muş	3,6	X	10,6	✓	22,9	X	16,3	X	East West	30,9	X
	Dsb Ağrı	28,9	X	24,9	X	2,3	X	4,4	X	North South	42,7	X
		North Facade	Recommended %5-10	South Facade	Recommended %10-22.5	East Facade	Recommended %10-15	West Facade	Recommended %10-15	Sample Classrooms		
WARM	Csa Şanlıurfa	11,1	X	4,3	X	27,2	X	26,3	X	East West	36,1	X
	Cfa Afyonkarahisar	36,8	X	30,8	X	27	X	22,2	X	North South	38,7	X
	Cfb Kastamonu	9,6	✓	12,4	✓	26,2	X	25,6	X	East West	44,5	X
	Csb Gümüşhane	27,4	X	42,1	X	0	X	20,4	X	North South	31	X
	BSk Malatya	31	X	23,7	X	12,3	✓	2,5	X	North South	43,4	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	26,4	X	26,1	X	4	X	4,3	X	North South	37,3	X
	Dfb Erzurum	22,5	X	23,2	X	6,7	X	6,7	X	North South	N: 37,5 S: 42,2	X
	Dsa Muş	3,6	X	10,6	✓	22,9	X	16,3	X	East West	30,9	X
	Dsb Ağrı	28,9	X	24,9	X	2,3	X	4,4	X	North South	42,7	X

Table 10. Investigation of window-wall area ratio (WWR) parameters of high school

HIGH SCHOOL TYPE PROJECTS		Window-Wall Area Ratio (%)								Sample Classrooms		
Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	North Facade	Recommended %5-10	South Facade	Recommended %10-22.5	East Facade	Recommended %10-15	West Facade	Recommended %10-15	Orientation	Degree	Control
COLD	**Csa** Van	24,7	X	23,2	✓	6,7	X	6,7	X	North South	**N: 38 S: 42,8**	X
	Cfb Kastamonu	27,6	X	30,7	X	11	✓	3,7	X	North South	**36,3**	X
	Csb Sivas	31,7	X	40,8	X	16,7	X	18,4	X	North South	**41,1**	X
	BSk Konya	6,7	✓	4,7	X	22	X	23,2	X	East West	**E: 36,6 W: 27,4**	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	25,1	X	37	X	11,4	✓	19	X	North South	**38,9**	X
	Dsa Muş	16	X	18,2	✓	2,5	X	20,1	X	North South	**23,3**	X
	Dsb Ağrı	19,2	X	18,5	✓	4,3	X	11,2	✓	North South	**25,5**	X
		North Facade	Recommended %5-10	South Facade	Recommended %10-22.5	East Facade	Recommended %10-15	West Facade	Recommended %10-15	Sample Classrooms		
WARM	**Csa** Şanlıurfa	22,4	X	16,5	✓	5,7	X	5,7	X	North South	**26**	X
	Cfa Afyonkarahisar	43	X	16,1	✓	3,9	X	3,1	X	North South	**43**	X
	Cfb Kastamonu	27,6	X	30,7	X	11	✓	3,7	X	North South	**36,3**	X
	BSk Malatya	17,5	X	26,2	X	9,6	X	9,6	X	North South	**34**	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	25,1	X	37	X	11,4	✓	19	X	North South	**38,9**	X
	Dfb Erzurum	7,2	✓	7,1	X	23,7	X	21,5	X	East West	**E: 27 W: 36,6**	X
	Dsa Muş	16	X	18,2	✓	2,5	X	20,1	X	North South	**23,3**	X
	Dsb Ağrı	19,2	X	18,5	✓	4,3	X	11,2	✓	North South	**25,5**	X

4.3.4. Window-to-floor area ratio (WFR)

The window-to-floor area ratio (WFR) shows appropriate values on at least one facade in 7 out of 18 primary schools (**Table 11**). Additionally, 4 out of 18 classrooms meet the appropriate WFR criteria. However, none of the classrooms achieved the 25% rate the Ministry of National Education recommended. In secondary schools (**Table 12**), none of the 18 schools in extremely cold cities fall within the appropriate value range, while 3 schools in extremely hot pilot cities meet the criteria. When examining the optimal WFR value range for classrooms, it is observed that only 6 out of 18 schools achieve this standard. In high school projects (**Table 13**), none of the 15 schools in extremely cold cities meet the appropriate value range, while 3 schools in extremely hot pilot cities comply. The same pattern is evident in classrooms, as the 25% WFR rate recommended by the Ministry of National Education is absent in all high schools, similar to the findings in secondary and primary schools.

Table 11. Investigation of window-floor area ratio (WFR) parameters of primary school

PRIMARY SCHOOL TYPE PROJECTS		Window-Floor Area Ratio (%)								Sample Classrooms			
Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	North Facade	Recommended %24.5-29	South Facade	Recommended %24.5-29	East Facade	Recommended %20-25	West Facade	Recommended %20-25	Orientation	Degree	Control	MEB Recommended %25
COLD	**Csa** Van	9,9	X	6,5	X	12,7	X	16,3	X	East West	**16,5**	X	X
	Cfa Tosya/Kastamonu	3,6	X	4,7	X	16,3	X	15,9	X	East West	**14,6**	X	X
	Cfb Kastamonu	10,2	X	7,1	X	10,5	X	14,4	X	East West	**13,3**	X	X
	Csb Sivas	16,5	X	14,3	X	15,6	X	17,5	X	South East West	**S: 15,9 E: 16,7 W:16,7**	X	X
	BSk Konya	5,9	X	3,7	X	21,7	✓	21,7	✓	East West	**24**	✓	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	16,3	X	13,4	X	3,7	X	8,3	X	North South	**16,7**	X	X
	Dfb Ardahan	11,1	X	12,2	X	4,7	X	12,3	X	South North West	**S: 10,9 N: 15,1 W:49,8**	X	X
	Dsa Muş	14	X	13,7	X	11,6	X	20	✓	North South	**14,4**	X	X
	Dsb Ağrı	3,2	X	2,9	X	18,6	X	19	X	East West	**10**	X	X
		North Facade	Recommended %13.5-16.3	South Facade	Recommended %13.5-16.3	East Facade	Recommended %15-20	West Facade	Recommended %15-20	Sample Classrooms			MEB Recommended %25
WARM	**Csa** Şanlıurfa	10	X	11,4	X	15,2	✓	16,2	✓	East West	**16,7**	✓	X
	Cfa Afyonkarahisar	3	X	31,3	X	18,3	✓	18,6	✓	East West	**20**	✓	X
	Cfb Kastamonu	10,2	X	7,1	X	10,5	X	14,4	X	East West	**13,3**	X	X
	Csb Gümüşhane	10,5	X	13,4	✓	13,4	X	4	X	North South	**13,6**	✓	X
	BSk Malatya	24,3	X	19,8	X	14,1	X	14,1	X	North South	**21,6**	X	X
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	16,3	X	13,4	X	3,7	X	8,3	X	North South	**16,7**	X	X
	Dfb Erzurum	15,6	✓	20,4	X	4,2	X	2,4	X	North South	**20,3**	X	X
	Dsa Muş	14	X	13,7	X	11,6	X	20	✓	North South	**14,4**	X	X
	Dsb Ağrı	3,2	X	2,9	X	18,6	X	19	X	East West	**10**	X	X

Table 12. Investigation of window-floor area ratio (WFR) parameters of secondary school

SECONDARY SCHOOL TYPE PROJECTS		Window-Floor Area Ratio (%)								Sample Classrooms			
Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	North Facade	Recommended %24.5-29	South Facade	Recommended %24.5-29	East Facade	Recommended %20-25	West Facade	Recommended %20-25	Orientation	Degree	Control	MEB Recommended %25
COLD	**Csa** Van	7,2	x	10,4	x	18,4	x	14,9	x	East West	17,9	x	x
	Cfa Tosya/Kastamonu	3,4	x	3,4	x	14,3	x	11,8	x	East West	14,2	x	x
	Cfb Kastamonu	4,9	x	6,1	x	15,8	x	14,9	x	East West	20	✓	x
	Csb Sivas	1,8	x	1,8	x	14,5	x	18,2	x	East West	19,2	x	x
	BSk Konya	5,3	x	3,6	x	12,3	x	13,8	x	East West	20,2	✓	x
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	14,7	x	16,4	x	3	x	9,8	x	North South	16,7	x	x
	Dfb Ardahan	11,6	x	0,04	x	13,1	x	12,2	x	East West North	E: 11,1 W: 11,1 N: 34,2	x	x
	Dsa Muş	18,4	x	8,7	x	15,1	x	13,4	x	East West	14,4	x	x
	Dsb Ağrı	14,1	x	18,2	x	2,4	x	2,9	x	North South	17,9	x	x
		North Facade	Recommended %24.5-29	South Facade	Recommended %24.5-29	East Facade	Recommended %20-25	West Facade	Recommended %20-25	Sample Classrooms			MEB Recommended %25
WARM	**Csa** Şanlıurfa	13,8	✓	9,7	x	17	✓	15,9	✓	East West	16,7	✓	x
	Cfa Afyonkarahisar	15,8	✓	18	x	21,5	x	15,8	✓	North South	18,2	x	x
	Cfb Kastamonu	4,9	x	6,1	x	15,8	x	14,9	x	East West	20	✓	x
	Csb Gümüşhane	10,9	x	11,7	x	0	x	10	x	North South	13,6	✓	x
	BSk Malatya	21,5	x	33,4	x	9,8	x	2,2	x	North South	16	✓	x
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	14,7	x	16,4	x	3	x	9,8	x	North South	16,7	x	x
	Dfb Erzurum	13,5	✓	15,1	✓	3,6	x	3,6	x	North South	N: 18,3 S: 20,2	x	x
	Dsa Muş	18,4	x	8,7	x	15,1	x	13,4	x	East West	14,4	x	x
	Dsb Ağrı	14,1	x	18,2	x	2,4	x	2,9	x	North South	17,9	x	x

Table 13. Investigation of window-floor area ratio (WFR) parameters of high school

HIGH SCHOOL TYPE PROJECTS		Window-Floor Area Ratio (%)								Sample Classrooms			
Köppen Climate Classification	Köppen Climate Classification Codes	North Facade	Recommended %24.5-29	South Facade	Recommended %24.5-29	East Facade	Recommended %20-25	West Facade	Recommended %20-25	Orientation	Degree	Control	MEB Recommended %25
COLD	**Csa** Van	15,8	x	14,3	x	2,8	x	2,8	x	North Güney	N: 18,9 S: 18,1	x	x
	Cfb Kastamonu	18,8	x	22,1	x	10	x	4	x	North South	16,6	x	x
	Csb Sivas	19,8	x	23,6	x	10,6	x	10,7	x	North South	21,1	x	x
	BSk Konya	2,8	x	4,7	x	12,6	x	14,7	x	East West	E: 18 W: 13,5	x	x
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	15,9	x	16	x	14	x	14,2	x	North South	17,9	x	x
	Dsa Muş	11,8	x	10,7	x	7,2	x	9,9	x	North South	11,4	x	x
	Dsb Ağrı	9	x	10,4	x	2,5	x	13,1	x	North South	11,2	x	x
		North Facade	Recommended %24.5-29	South Facade	Recommended %24.5-29	East Facade	Recommended %20-25	West Facade	Recommended %20-25	Sample Classrooms			MEB Recommended %25
WARM	**Csa** Şanlıurfa	15,7	✓	13,4	x	3,9	x	3,9	x	North South	15,3	✓	x
	Cfa Afyonkarahisar	19,4	x	16,1	✓	3,9	x	3,1	x	North South	16	✓	x
	Cfb Kastamonu	18,8	x	22,1	x	10	x	4	x	North South	16,6	x	x
	BSk Malatya	9,4	x	12,4	x	11	x	11	x	North South	14,5	✓	x
	BSh Ceylanpınar/Şanlıurfa	15,9	x	16	x	14	x	14,2	x	North South	17,9	x	x
	Dfb Erzurum	2,6	x	2,9	x	15,2	✓	12,4	x	East West	E: 13,3 X W: 18 ✓	x ✓	x
	Dsa Muş	11,8	x	10,7	x	7,2	x	9,9	x	North South	11,4	x	x
	Dsb Ağrı	9	x	10,4	x	2,5	x	13,1	x	North South	11,2	x	x

Notably, at least one facade of primary schools meets the recommended window-to-floor area ratio (WFR) of 38%, while this ratio is only 16% in secondary and high schools. Schools' responsiveness to climate is compromised by inappropriate orientation choices disregarding climatic conditions. For instance, the orientation of classrooms to the west—55.5% in primary schools and 50% in secondary schools—results in excessive heat gain during the afternoon, diminishing overall comfort. Furthermore, it is important to highlight that the optimal WFR value of 25%, as recommended by the Ministry of National Education for educational buildings, was not achieved in any of the schools examined. This discrepancy underscores a critical area for improvement and emphasises the necessity of aligning architectural design with established standards to enhance the learning environment. The findings suggest that the typological design of educational structures across various climates fails to adequately address specific climatic needs, indicating a significant opportunity for improvement in future school designs.

5. Discussion

5.1. Hypothesis 1: Public schools are typical in Türkiye

Buildings for primary, secondary and high school education in Türkiye mostly employ standardized architectural platforms which seek to reduce project costs and construction time and minimize errors through linear layouts and repetitive facade details. The standardized architectural approach for school buildings tends to disregard location-specific factors which makes the educational delivery less effective for different cultural needs of students throughout the country. Some research has shown that many schools in Türkiye are built from reinforced concrete building materials and that the architectural appearance of the majority of schools does not reflect regional characteristics [65]. Moreover, such standardised designs that are common in designing learning environments fail to create learning environments that appropriately enhance the educational processes of diverse students by incorporating relevant characteristics such as local climates, cultural identity, or values of communities [66].

Working with standard school building types causes both students' affiliation to their educational setting as well as flexible learning environment development to be overlooked in traditional school architecture [67].

5.2. Hypothesis 2: Schools are not constructed in alignment with local climate

The study has discovered that Turkish educational buildings contain insufficient architectural structures which produces spaces with poor quality and creates problems with shading and ventilation systems along with heating and insulation needs. The combination of high WWR ratios in southern Türkiye creates buildings that absorb too much heat while exposing themselves to direct sunlight and lacking proper insulation which results in detrimental effects on student health. The implementation of buildings that do not respond to local climates leads to significant unpleasantness for students in educational spaces resulting in lower student performance through increased health-related absences in hot areas and respiratory issues from cold drafts and humidity in colder climates. [68]. Studies have demonstrated that students exposed to uncomfortable learning environments negatively affect student concentration, reduce academic performance, and increase anxiety [69]. Unsuitable school designs based on climate lead to unpleasant indoor environments which reduces learning quality as heat from the sun impedes learning though it improves academic results up to 7% to 18% and cold temperatures make students tired. [70]. These results confirm the importance of seriously considering climate-responsive approaches and concepts in the planning of educational institutions in order to improve students' comfort and, therefore, their health and success.

5.3. Equity and educational inequality

The complex link between educational building standardization and climate-unresponsive school designs forms the basis of two main hypotheses (Hypothesis 1 and Hypothesis 2). The first hypothesis indicates that standardized school building designs might create uniformity which ignores building context along with failing to support students with different learning requirements. Various climatic zones demonstrate non-compliance with window-to-wall and window-to-floor ratios standards that exist for educational building design. The second hypothesis demonstrates how unresponsive educational building designs create adverse outcomes when applied to climate-responsive features such as shading elements and insulation material. Climate-unresponsive design produces learning spaces which discomfort students physically thus reducing their ability to concentrate [71].

Accurate research reveals primary educational facilities with appropriate shading elements decrease their cooling requirements by 40% within hot dry conditions [72]. Homes that lack proper heating and insulation systems in cold regions become uncomfortably cold which creates adverse study conditions for students [73]. Children facing environmental stressors experience negative effects on their education particularly when they come from low socioeconomic areas [74]. The way classrooms handle climate changes can result in unfair distribution of benefits which affects educational equity between different zones. Students learn less effectively when their classrooms lack sufficient ventilation and air conditioning in regions with extreme climate conditions thus creating learning benefit disparities between students. Equity in education matters more because countries operate distinct school education systems. Heat adversely affects student mental processing capabilities along with academic performance and increases their stress levels [75]. Modern insulation systems are missing from older schools located in cold climate zones which negatively affects student learning conditions [76]. Academic differences emerge because of this situation and create persistent disadvantage patterns between students [77]. Educational settings need to establish climate adaptation plans together with equality-focused initiatives that give children equal education opportunities.

5.4. Policy and practice recommendations

The current educational structures of Türkiye must adopt diverse building solutions to serve the target population. An extensive solution requires alignment between policy development and design approaches together with public relations strategies. The Ministry of National Education must adapt their policies through financial backing and community engagement for implementation success. Natural cooling elements should be integrated into sustainable building designs. A classroom design that incorporates operable windows acts to improve ventilation and comfort levels along with reducing building energy consumption rate [78]. Quality insulation materials work to block both heat loss as well as heat intake when temperatures become extreme. Orientation plans for buildings must facilitate the maximum entry of natural light along with the reduction of solar rays hitting buildings directly [79]. The installation of large windows coming from north or south directions produces beneficial effects for both lighting conditions and energy conservation. These windows improve comfort levels and efficiency performance of the building [80]. The improvement of education in Türkiye requires future projects to integrate climate responsibility into their extensive design specifications.

The specifications should integrate environmental elements together with materials and energy-efficient technological components. School building evaluation regarding performance together with energy consumption data can guide current and future design principles and policy development. Educational facilities that address student needs result from partnership work between policymakers with educators and architects.

5.5. Limitations and challenges

The research examined educational buildings across pilot areas in Türkiye through temperature assessment within ten different climatic zones. The research did not include private educational institutions because they differed in their construction designs and operational methods and some climate-responsive design data were unavailable from architectural plans.

5.6. Suggestions for future research

The research team in Türkiye studies educational architecture through historical political and economic factors that caused school variety to decrease. The researchers want to understand the effects that development policies along with funding mechanisms and architectural trends have on education. The analysis of climate-adaptive school designs across countries provides governmental institutions and architects with a sustainable approach to develop educational buildings that respect cultural patterns as well as social requirements and climatic conditions.

6. Conclusions

This study focuses on the importance of educational building design in students' learning spaces, particularly in Türkiye, a region where the effects of climate variations on educational building projects are neglected. The research, which supports the argument of the necessity of climate-responsive design approaches, analysed Türkiye's climate zones according to the Köppen climate classification and evaluated educational buildings in the pilot cities of each climate zone. The study showed that educational buildings have many similarities and that common architectural design may be inadequate in some respects because the local climate is not considered. A critical evaluation of some key design parameters, such as orientation and spatial layout, revealed major limitations in climate responsivity that may hinder student learning and equity across regions.

The climate-responsive design analysis of school environments pointed out that today's school designs increase our awareness of the discourse of inequality in educational environments and the demand for climate-responsive architecture. The research highlights the importance of considering climate-responsive approaches to designing educational buildings with effective indoor conditions for learning environments designed in the context of concepts of equity and sustainability. In addition, this research forms a basis for other studies that aim to further expand the framework of more inclusive and equitable learning environments in Türkiye. Experimental research is suggested to examine the short- and long-term effects of climate-responsive design on students' health, well-being, and achievement.

Acknowledgments

This study is produced from the master's thesis titled "The Effect of Building Design on Indoor Thermal Comfort in Educational Buildings in Different Climatic Regions of Türkiye," conducted within the Department of Architecture at Dokuz Eylül University, Institute of Science, under the supervision of Assistant Professor Dr. Gizem İzmir Tunahan. I would like to express my sincere gratitude to Dr. İzmir Tunahan for her invaluable guidance and support throughout the thesis process. I also extend my thanks to the Ministry of National Education for providing essential data and supporting the research.

References

[1] E. Firman and K. S. Dedy Sandiarsa, "The Effect of Learning Environment on Students' Motivation in Learning," *Jurnal Ilmiah Mandala Education (JIME)*, vol. 10, no. 4, pp. 1046–1051, 2024, doi: 10.58258/jime.v9i1.7614/http.

[2] J. E. Baluyos, A. C. Canastra, J. Dionio, H. Ilusorio, C. C. Jimenez, and G. R. Baluyos, "Influence of Environmental Conditions and The Students' Health," *ARRUS Journal of Social Sciences and Humanities*, vol. 4, no. 2, pp. 255–269, 2024, doi: 10.35877/soshum2507.

[3] I. B. Chrzanowska, "Educational Space in Inclusive Education – Challenges in Working witha Diverse Group/Class," *Lubelski Rocznik Pedagogiczny*, vol. 42, no. 4, pp. 59–75, 2024, doi: 10.17951/lrp.2023.42.4.59-75.

[4] O. Ndimako, O. Babalola, and U. Ugah, "Students' Wellness and Mindfulness in School Designs," 2024. doi: 10.20944/preprints202408.1518.v1.

[5] G. Akkose, C. Meral Akgul, and I. G. Dino, "Educational building retrofit under climate change and urban heat island effect," *Journal of Building Engineering*, vol. 40, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102294.

[6] C. Lops, F. Serpilli, V. D'Alessandro, and S. Montelpare, "Climate Change and Building Renovation: The Impact of Historical, Current, and Future Climatic Files on a School in Central Italy," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2024, doi: 10.3390/app14199067.

[7] C. Baglivo, "Dynamic evaluation of the effects of climate change on the energy renovation of a school in a mediterranean climate," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13116375.

[8] Y. Yaşar, A. Pehlevan, and E. Altıntaş, "İlköğretim dersliklerinde termal konfor araştırması," in *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 2007, pp. 199–208.

[9] Y. Afacan, "Impact of Climate Zone and Orientation Angle on the Recurring Massing School Typologies in Turkey," in *Sustainability in Energy and Buildings 2021*, vol. 263, J. R. Littlewood, R. J. Howlett, and L. C. Jain, Eds., Springer, 2022, pp. 11–27. [Online]. Available: http://www.springer.com/series/8767

[10] J. M. Evans and S. Schiller, "Bridging the gap between climate and design: A bioclimatic design course for architectural students in Argentina," *Energy Build*, vol. 15, no. 1–2, pp. 43–50, 1990.

[11] E. Ş. Özen and Ö. Sümengen, "Türkiye'nin Farklı İklim Bölgelerinde 'Binalarda Gün ışığı Kullanımı' Standartı Çerçevesinde Değerlendirilmesi," *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 38, no. 2, pp. 292–313, 2022.

[12] P. Gaonkar, A. Nakkeeran, J. Bapat, and D. Das, "Air quality and thermal comfort management for energy-efficient large public buildings," *Architecture, Structures and Construction*, vol. 3, no. 1, pp. 25–40, Apr. 2023, doi: 10.1007/s44150-022-00059-4.

[13] A. Chazarra Bernabé, B. Lorenzo Mariño, R. Romero Fresneda, and J. V. M. G. Moreno García, "Observed Changes of Köppen Climate Zones in Spain since 1951," *Espacio Tiempo y Forma. Serie VI, Geografía*, no. 16, pp. 133–144, 2023, doi: 10.5944/etfvi.16.2023.38777.

[14] Kuranlıoğlu, D. and İzmir Tunahan, G. "Türkiye'nin İklimsel Çeşitliliği Bağlamında Mimari Tasarımda Tek Tip Proje Yaklaşımının Değerlendirilmesi," in *1. Bilsel International Midas Scientific Researches Congress*, G. Yaldız, Ed., Eskişehir, Türkiye: Bilsel Publishing, Mar. 2025, pp. 206–219.

[15] T. Glaves and M. Talpade, "An Exploration of The Types of Educational Environments Deemed Optimal for Learning by Students," *International Journal of Arts, Humanities & Social Science*, vol. 5, no. 6, pp. 31–37, 2024, doi: 10.56734/ijahss.v5n6a5.

[16] P. Cardellino and P. Woolner, "Designing for transformation – a case study of open learning spaces and educational change," *Pedagogy Culture and Society*, vol. 28, no. 1, pp. 1–20, 2019.

[17] L. Wang, "Relationships between Acoustics, Thermal, Indoor Air Quality, and Lighting Conditions on Student Achievement in K-12 Classrooms," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Glasgow, Scotland: Institute of Noise Control Engineering, Feb. 2023, pp. 260–263.

[18] T. Cătălina and T. Banu, "Impact of indoor environmental conditions on students intellectual performance," *Buletinul Institutului Politehnic Din Iaşi*, vol. 64, no. 3, pp. 23–35, 2014.

[19] R. E. C. Lucas, L. B. da Silva, E. L. de Souza, W. K. dos S. Leite, and J. M. N. da Silva, "Influence of environmental variables on students' cognitive performance in indoor higher education environments," *Work*, vol. 79, pp. 351–360, 2024, doi: 10.3233/wor-220055.

[20] G. I. Earthman, "School Facility Conditions and Student Academic Achievement," 2002. Accessed: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: https://escholarship.org/uc/item/5sw56439

[21] S. Gölemen, N. Taş, and M. Taş, "The changes of sustainable primary school buildings," in *Eco-Architecture VI: Harmonisation between Architecture and Nature*, WIT Press, Jul. 2016, pp. 11–22. doi: 10.2495/arc160021.

[22] J. Gu and F. Bal Koçyiğit, "Zero Consumption Monotype Education Buildings," 2018. [Online]. Available: http://dergipark.gov.tr/gujs

[23] F. N. Aksin and S. A. Selçuk, "Energy performance optimization of school buildings in different climates of Turkey," *Future Cities and Environment*, vol. 7, no. 1, 2021, doi: 10.5334/fce.107.

[24] H. D. Arslan, "Evaluation of a School Building in Turkey According to the Basic Sustainable Design Criteria," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Sep. 2017. doi: 10.1088/1755-1315/83/1/012026.

[25] T. Ashrafian, "Enhancing school buildings energy efficiency under climate change: A comprehensive analysis of energy, cost, and comfort factors," *Journal of Building Engineering*, vol. 80, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107969.

[26] R. Afren, M. Benabbas, N. Zemmouri, and D. Djaghrouri, "Impact of the typology of school buildings on the internal thermal conditions, in a hot and dry climate," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 505–510. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.305.

[27] A. Kaihoul, E. Pitzali, and L. Sriti, "An Exploration of Climate-Responsive Design Strategies Employed by El-Miniawy Brothers in Southern Algeria," *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 32–54, 2024, doi: 10.5755/j01.sace.35.3.36863.

[28] D. Maučec, M. Premrov, and V. Ž. Leskovar, "Use of sensitivity analysis for a determination of dominant design parameters affecting energy efficiency of timber buildings in different climates," *Energy for Sustainable Development*, vol. 63, pp. 86–102, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.esd.2021.06.003.

[29] H. Benharchache, F. Khaldi, and M. Hanfer, "The Effect of External Walls on Energy Performance of Algerian Rural Building in Different Climatic Zones," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 107, no. 2, pp. 171–190, Jul. 2023, doi: 10.37934/arfmts.107.2.171190.

[30] N. Amani, "Simulation-based design: minimizing energy consumption in residential buildings through optimal thermal insulation," *World Journal of Engineering*, 2024, doi: 10.1108/WJE-04-2024-0188.

[31] H. Tawfeeq and A. M. A. Qaradaghi, "Optimising Window-to-Wall Ratio for Enhanced Energy Efficiency and Building Intelligence in Hot Summer Mediterranean Climates," *Sustainability*, vol. 16, no. 17, p. 7342, Aug. 2024, doi: 10.3390/su16177342.

[32] A. Kabanshi, G. Choonya, A. Ameen, W. Liu, and E. Mulenga, "Windows of Opportunities: Orientation, Sizing and PV-Shading of the Glazed Area to Reduce Cooling Energy Demand in Sub-Sahara Africa," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/en16093834.

[33] S. Mirrahimi, N. Lukman, N. Ibrahim, and M. Surat, "Estimation Daylight to Find Simple Formulate Based on the Ratio of Window Area to Floor Area Rule of Thumb for Classroom in Malaysia," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 6, no. 5, pp. 931–935, 2013.

[34] Y. V. Perez and I. G. Capeluto, "Climatic considerations in school building design in the hot-humid climate for reducing energy consumption," *Appl Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 340–348, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.05.007.

[35] P. Kr. Chaturvedi, N. Kumar, R. Lamba, and K. Mehta, "Multi-objective optimization of glazing and shading configurations for visual, thermal, and energy performance of cooling dominant climatic regions of India," Sep. 27, 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4983831/v1.

[36] K. Wehrli *et al.*, "Building design in a changing climate – Future Swiss reference years for building simulations," *Clim Serv*, vol. 34, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cliser.2024.100448.

[37] D. Satpal, A. Kalpana, and B. Kumar, "Optimizing Energy Efficiency to Design IGBC Green Schools in Composite Climate," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1326/1/012045.

[38] M. Salameh and B. Touqan, "Designing Climate-Adaptive Buildings: Impact of Courtyard Geometry on Microclimates in Hot, Dry Environments," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 10, no. 8, pp. 2698–2718, Aug. 2024, doi: 10.28991/CEJ-2024-010-08-017.

[39] S. C. Asha and M. A. Blessing, "Environment Modifying in Inclusive Education," *Shanlax International Journal of Arts, Science and Humanities*, vol. 11, no. Special Issue 1, pp. 5–9, 2023, doi: 10.34293/sijash.

[40] T. Vinsela Jeev, "Causes and Effects of Climate Change in Education," *Shanlax International Journal of Arts, Science and Humanities*, vol. 11, no. Special Issue 2, pp. 65–68, 2024, doi: 10.34293/sijash.

[41] S. Venegas Marin, L. Schwarz, and S. Sabarwal, "Impacts of Extreme Weather Events on Education Outcomes: A Review of Evidence," *World Bank Res Obs*, vol. 39, no. 2, pp. 177–226, 2024.

[42] M. H. AL Hussaini, "Impact of Climate on Student Education and Their Future Development," *International Journal of Integrative Sciences*, vol. 2, no. 4, pp. 525–534, May 2023, doi: 10.55927/ijis.v2i4.3951.

[43] E. M. Preña and C. P. Labayo, "Policy responses to extreme heat and its impact on education: The Philippine experience," *Policy Futures in Education*, 2024, doi: 10.1177/14782103241288276.

[44] Y. K. Juan and Y. Chen, "The influence of indoor environmental factors on learning: An experiment combining physiological and psychological measurements," *Build Environ*, vol. 221, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109299.

[45] H. W. Brink, M. G. L. C. Loomans, M. P. Mobach, and H. S. M. Kort, "Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review," *Indoor Air*, vol. 31, no. 2, pp. 405–425, Mar. 2021, doi: 10.1111/ina.12745.

[46] A. Michael and C. Heracleous, "Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus," *Energy Build*, vol. 140, pp. 443–457, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.087.

[47] Z. S. Zomorodian, M. Tahsildoost, and M. Hafezi, "Thermal comfort in educational buildings: A review article," Jun. 01, 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.033.

[48] Y. P. Villarreal Arroyo, R. Peñabaena-Niebles, and C. Berdugo Correa, "Influence of environmental conditions on students' learning processes: A systematic review," Mar. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110051.

[49] P. Sarıcıoğlu and İ. Ayçam, "A framework for the evaluation of buildings in the context of climate change for Turkey," *GRID - Architecture, Planning and Design Journal*, Jul. 2021, doi: 10.37246/grid.934644.

[50] Y. Yildiz and M. Kocyigit, "Energy consumption analysis of education buildings: The case study of balikesir university," *Gazi University Journal of Science*, vol. 34, no. 3, pp. 665–677, 2021, doi: 10.35378/gujs.722746.

[51] E. Bölük, O. Eskioğlu, Y. Çalık, and S. Yağan, "Köppen İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi," Jan. 2023.

[52] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, "İllere Ait Mevsim Normalleri (1991-2020)," https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H. Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H

[53] Weather Spark, "The Weather Year Round Anywhere on Earth," https://weatherspark.com/. Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: https://weatherspark.com/

[54] Z. Qin, "Credibilistic Mean-Absolute Deviation Model," in *Uncertainty and Operations Research Uncertain Portfolio Optimization*, Beijing, China: Springer, 2016, ch. 3, pp. 53–67. [Online]. Available: http://www.springer.com/series/11709

[55] Milli Eğitim Bakanlığı, "Eğitim Yapıları Asgari Tasarım Standartları Kılavuzu," 2015.

[56] U. Atmaca, "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardındaki Güncellemeler," *Tesisat Mühendisliği*, no. 154, pp. 21–35, 2016.

[57] Vstarenergy, "Building Thermal Rating Assessors," Vstarenergy. Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: https://vstarenergy.com.au/2024/08/19/window-to-wall-ratio/#:~:text=Ideal%20WWR%3A%2020%2D40%25,enhance%20energy%20efficiency%20and%20comfort

[58] E. Bölük, O. Eskioğlu, Y. Çalık, and S. Yağan, "Köppen İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi," Jan. 2023.

[59] A. Caporale, F. Gabriele Galizia, L. Botti, and C. Mora, "Thermal comfort prediction of aged industrial workers based on occupants' basal metabolic rate," in *Social and Occupational Ergonomics*, AHFE International, 2022. doi: 10.54941/ahfe1002666.

[60] U. Unver, E. Adigüzel, E. Adıgüzel, and S. Çivi, "Türkiye'deki İklim Bölgelerine Göre Binalarda Isı Yalıtım Uygulamaları Application of Thermal Insulation in Buildings by Climate Zones in Turkey," *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, vol. 1, no. 2, pp. 171–187, 2020, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/348371986

[61] T. K. P. Nguyen and E. V. Korkina, "Connectivity of the Window to Floor Area Ratio and the Daylighting Assessment Criteria," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 2035–2045, Sep. 2021, doi: 10.1007/s40996-021-00681-0.

[62] M. M. Hassieb, A. Ragab, and A. F. Mohamed, "Quantifying the Influence of Window-to-Wall Ratio (WWR) on Indoor Air Quality and Thermal Comfort: Classroom Study in Hot Arid Climates," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1396/1/012025.

[63] E. Garcia-Nevado, B. Beckers, H. C. Roura, and I. Crespo, "Façade design and energy demand: fenestration indexes from an urban approach," 2017.

[64] S. A. Olaniyan, I. I. Adebisi, and O. O. . Onigbogi, "Between Fancy and Functionality: Comparative Thermal Performance Analyses of Selected External Building Shading Elements in Tropical Building Design," *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*, vol. 11, no. 1, Sep. 2023, doi: 10.36108/laujoces/3202.11.0140.

[65] F. Işıker and M. F. Bölük, "Okul tasarımlarında mekansal olasılıklar," in Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul Bilim ve Akademisyenler Derneği, 2016, pp. 142–152.

[66] K. Çelik, "Eğitim yapıları tasarım kılavuzları bağlamında dersliklerin görsel konfor ve enerji kullanımı değerlendirilmesi," Journal of International Social Research, vol. 12, no. 63, pp. 441–447, Apr. 2019, doi: 10.17719/jisr.2019.3241.

[67] C. Demir Yıldız and B. Dönmez, "Anadolu Liseleri Tip Projelerinin Milli Eğitim Bakanlığı Eğitim Yapıları Asgari Tasarım Standartları Açısından Değerlendirilmesi," in Eğitim Yönetimi Araştırmaları, 1st ed., S. Altun, D. Örücü, K. Beycioğlu, Y. Kondakçı, and S. Koşar, Eds., Pegem Akademi, 2017, pp. 204–221. doi: 10.14527/9786052411551.

[68] G. Özer, P. Çulun, and F. Kürüm Varolgüneş, "Assessment and improvement of thermal comfort conditions in educational buildings: an example of a secondary school," *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, vol. 13, no. 4, pp. 91–106, Dec. 2024, doi: 10.46810/tdfd.1525408.

[69] S. Sadrizadeh *et al.*, "Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment," *Journal of Building Engineering*, vol. 57, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104908.

[70] A. Baba, I. Shahrour, and M. Baba, "Indoor Environmental Quality for Comfort Learning Environments: Case Study of Palestinian School Buildings," *Buildings*, vol. 14, no. 5, May 2024, doi: 10.3390/buildings14051296.

[71] S. Okçu, E. Ryherd, and C. Bayer, "The role of physical environment on student health and education in green schools," *Rev Environ Health*, vol. 26, no. 3, pp. 169–179, 2011.

[72] S. Aghamohammadiha and N. Dehghan, "Optimum Geometry of Double-skin Self-Shading Facade of Classrooms with the Aim of Creating Energy Saving and Visual Comfort in Isfahan Province, Iran," *Journal of Daylighting*, vol. 11, no. 2, pp. 372–389, Nov. 2024, doi: 10.15627/jd.2024.25.

[73] P. Singh, "Indoor Environmental Quality & Student Health and Performance: A Conceptual Review," 2013. [Online]. Available: http://www.ijmra.us

[74] S. Mathiarasan and A. Hüls, "Impact of environmental injustice on children's health—interaction between air pollution and socioeconomic status," Jan. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ijerph18020795.

[75] B. Lala and A. Hagishima, "Impact of Escalating Heat Waves on Students' Well-Being and Overall Health: A Survey of Primary School Teachers," *Climate*, vol. 11, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/cli11060126.

[76] P. Alamdari, "Primary School Buildings Renovation in Cold Climates: Optimizing Window Size and Opening for Thermal Comfort, Indoor Air Quality, and Energy Performance," 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/365747113

[77] A. Altassan, "Sustainable Integration of Solar Energy, Behavior Change, and Recycling Practices in Educational Institutions: A Holistic Framework for Environmental Conservation and Quality Education," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 20, Oct. 2023, doi: 10.3390/su152015157.

[78] J. Kim, H. Naganathan, S. Moon, and D. Jang, "Optimizing Comfort and Sustainability: The Impact of Passive Cooling and Eco-Friendly Materials on Indoor Temperature Reduction—A Case Study," *Buildings*, vol. 14, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/buildings14103218.

[79] G. Lamberti, G. Salvadori, F. Leccese, F. Fantozzi, and P. M. Bluyssen, "Advancement on thermal comfort in educational buildings: Current issues and way forward," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/su131810315.

[80] S. Jaouaf, B. Bensaad, and M. Habib, "Passive strategies for energy-efficient educational facilities: Insights from a mediterranean primary school," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 3653–3683, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.03.040.

Appendices

Appendix 1

Table 1. Annual temperature data of cities belonging to the Csa climate type

CSA / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Şanlıurfa Average Temperature	5,6	7,1	10,9	16,3	22,3	28,1	32	31,6	27,2	20,6	13,2	7,6
Average maximum temperature	10	12	16,4	22,4	28,8	34,7	38,8	38,4	34	27,1	18,8	12,1
Average minimum temperature	2,1	2,9	5,8	10,3	15,3	20,6	24,3	24	20,1	14,6	8,5	4,1
Batman Average Temperature	2,5	4,6	9,2	14,4	19,4	26	30,2	29,6	24,3	17,4	9,7	4,4
Average maximum temperature	7,8	10,7	15,9	21,7	27,8	35,1	39,5	39,5	34,6	26,7	17	9,7
Average minimum temperature	-1,5	0	3,7	7,9	11,4	15,9	20,3	19,7	15	10,1	4,2	0,5
Diyarbakır Average Temperature	1,8	3,7	8,3	13,8	19,3	26,1	31	30,5	25,1	17,6	9,8	4,1
Average maximum temperature	6,8	9,2	14,5	20,5	26,6	33,6	38,4	38,3	33,4	25,4	16,4	9,2
Average minimum temperature	-2,2	-1	2,5	7	11,3	16,6	21,7	21,1	16	10,1	4,2	-0,1
Aydın Average Temperature	8,2	9,4	11,8	16	20,9	25,6	28,3	27,7	23,8	18,7	13,6	9,6
Average maximum temperature	13,1	14,8	17,9	22,8	28,3	33,4	36,3	35,9	32,1	26,3	19,9	14,6
Average minimum temperature	4,3	5,1	6,7	10,1	14,3	18,2	20,6	20,4	16,9	12,8	8,9	5,8
Adıyaman Average Temperature	4,6	6	10	15,1	20,6	26,7	31,1	30,7	26	19,3	11,8	6,7
Average maximum temperature	8,7	10,5	15	20,7	26,8	33,3	37,9	37,8	33,2	25,7	17,1	10,8
Average minimum temperature	1,4	2,5	5,6	10	14,4	19,8	23,8	23,5	19,2	13,8	7,7	3,5
Kilis Average Temperature	5,8	7,1	10,7	15,5	20,7	25,3	28,2	28,1	25,2	20	13	7,7
Average maximum temperature	9,8	11,8	16,1	21,6	27,7	32,9	36,3	36,3	32,8	26,5	18,3	11,8
Average minimum temperature	2,4	3,3	6,1	10,1	14,4	18,4	21,3	21,4	18,7	14,4	8,4	4,2
Siirt Average Temperature	2,7	4,3	8,4	13,9	19,5	26	30,7	30,4	25,6	18,3	10,6	4,9
Average maximum temperature	6,7	8,9	13,4	19,3	25,3	32,3	37,1	37,1	32,3	24,5	15,5	8,9
Average minimum temperature	-0,5	0,6	4,1	9	13,7	19,1	23,5	23,3	18,9	12,8	6,5	1,7
Manisa Average Temperature	6,6	7,9	10,5	15,1	20,3	25,2	28	27,7	23,4	17,8	12,2	8,1
Average maximum temperature	10,8	12,7	16,2	21,5	27,1	32,1	35	34,9	30,8	24,4	17,6	12,3
Average minimum temperature	3	3,7	5,3	8,9	13,4	17,6	20,5	20,4	16,2	11,8	7,6	4,5
Kahramanmaraş Average Temp.	4,8	6,2	10,4	15,1	20,1	24,9	28,3	28,5	25	18,9	11,9	6,7
Average maximum temperature	9,3	11,2	15,9	21,3	26,8	32	35,8	36,2	32,7	26,1	17,9	11,3
Average minimum temperature	1,4	2,5	5,8	9,9	14,1	18,7	22,2	22,3	18,5	13	7,2	3,4
Adana Average Temperature	9,5	10,6	13,5	17,6	21,9	25,6	28,3	28,7	26,2	21,8	16	11,3
Average maximum temperature	14,8	16,2	19,4	23,8	28,3	31,7	33,9	34,7	33,1	29,1	22,7	16,9
Average minimum temperature	5,3	6	8,3	11,9	15,8	19,8	23	23,5	20,2	15,8	10,8	7
Denizli Average Temperature	5,9	7,2	10,2	14,7	19,6	24,3	27,4	27	22,7	17,1	11,7	7,7
Average maximum temperature	10,6	12,4	16	21	26,5	31,3	34,7	34,6	30,2	24	17,5	12,3
Average minimum temperature	2,4	3,1	5,4	9,2	13,4	17,5	20,3	20	16	11,5	7,2	4,2
Osmaniye Average Temperature	8,8	10,2	13,1	17,2	21,4	25,2	28	28,6	25,8	21,2	14,7	10,3
Average maximum temperature	14,7	16,2	19,1	23,6	27,9	31,2	33,7	34,4	32,3	28,4	21,8	16,4
Average minimum temperature	3,6	4,6	7,3	10,9	15	19	22,5	23,2	19,5	14,5	8,5	5,2
Gaziantep Average Temperature	3,1	4,5	8,2	13,4	18,9	24,3	28,1	27,9	23,5	16,8	9,9	5,1
Average maximum temperature	7,5	9,5	13,9	19,7	25,6	31,2	35,3	35,3	31,2	24,3	16,3	9,8
Average minimum temperature	-0,6	0,2	3,1	7,3	12	17,2	21,2	21,1	16,3	10,2	4,6	1,2
İzmir Average Temperature	8,8	9,6	11,7	15,9	20,8	25,4	28	27,7	23,8	19	14,3	10,6
Average maximum temperature	12,4	13,7	16,3	20,9	26,1	30,7	33,3	33	29,2	24,1	18,7	14,1
Average minimum temperature	5,8	6,2	7,7	11,2	15,5	19,9	22,5	22,4	18,7	14,7	10,8	7,6
Antalya Average Temperature	10	10,7	12,9	16,4	20,6	25,3	28,6	28,4	25,3	20,6	15,5	11,7
Average maximum temperature	14,9	15,6	18	21,4	25,7	30,7	34,2	34,1	31,2	26,6	21,3	16,7
Average minimum temperature	6	6,4	8,1	11,3	15,3	19,7	22,8	22,8	19,5	15,3	10,9	7,7
Mardin Average Temperature	3,1	4,2	8	13,5	19,5	25,6	29,8	29,7	25,4	18,7	11,1	5,5
Average maximum temperature	5,9	7,4	11,6	17,4	24	30,6	35,1	34,8	30,2	22,9	14,6	8,2
Average minimum temperature	0,6	1,4	4,7	9,8	15,1	20,3	24,6	24,8	20,9	14,7	8,1	3
Tunceli Average Temperature	-1,9	-0,1	5,6	11,8	16,8	22,4	27,1	26,8	21,6	14,6	6,9	1,1
Average maximum temperature	3,1	5,2	11,4	18,3	24,1	30,1	35,1	35,5	30,7	22,9	13,7	5,8
Average minimum temperature	-5,4	-4	1,1	6,2	10,1	14,5	18,9	18,5	13,4	8,2	2,1	-2,2
Palu/Elazığ Average Temperature	-1	1	6	12	17	23	28	28	22	15	7	2
Average maximum temperature	3	5	11	17	23	30	35	35	30	21	12	6
Average minimum temperature	-4	-3	1	6	10	15	20	19	14	8	3	-2
Balıkesir Average Temperature	4,7	6,1	8,8	12,8	17,8	22,6	25,5	25,6	21,3	16	10,4	6,4
Average maximum temperature	9,2	11,3	15	19,8	25,3	29,9	32,5	32,6	28,8	22,8	16,8	10,9
Average minimum temperature	0,9	1,7	3,3	6,3	10,5	15,1	18	18,6	14,3	10	5,4	2,6
Muğla Average Temperature	5,3	6,1	8,5	12,7	17,7	22,8	26,4	26,3	21,9	16,2	10,8	7
Average maximum temperature	9,8	11	14,1	18,9	24,3	29,6	33,5	33,6	29,3	23,2	16,7	11,6
Average minimum temperature	1,6	1,9	3,5	7	11,4	16,1	19,7	19,6	15,3	10,3	5,9	3,2
Şırnak Average Temperature	2,5	3,7	7,4	12,5	18,3	24,7	29,1	28,9	24,6	17,5	9,9	4,9
Average maximum temperature	6	7,4	11,3	16,6	22,6	29,4	33,9	33,8	29,4	21,8	13,7	8,3
Average minimum temperature	-0,7	0,3	3,7	8,3	13,5	19,6	23,9	23,9	19,7	13,2	6,2	1,6
Bingöl Average Temperature	-2,2	-1,1	4,2	10,8	16,2	22	26,7	26,5	21,3	14,3	6,8	0,8
Average maximum temperature	2,4	3,9	9,6	16,8	22,9	29,4	34,6	34,8	29,8	21,7	12,7	5,3
Average minimum temperature	-5,8	-4,9	-0,1	5,8	10,2	14,8	19	18,7	13,7	8,3	2,3	-2,7
Hatay Average Temperature	8,1	9,8	13,1	17,2	21,3	24,8	27,2	27,9	25,8	20,8	14,4	9,6
Average maximum temperature	12,1	14,5	18,1	22,6	26,6	29,2	31,2	32	31	27,4	20,2	13,7
Average minimum temperature	4,7	5,8	8,5	12,2	16,3	20,8	23,9	24,6	21,1	15,2	9,6	6
Edirne Average Temperature	2,7	4,4	7,6	12,8	18	22,2	24,7	24,5	20,1	14,5	9,2	4,6
Average maximum temperature	6,7	9,4	13,4	19,3	24,8	29,2	32	32	27,4	20,8	14,2	8,6
Average minimum temperature	-0,5	0,5	2,9	7,1	11,7	15,5	17,4	17,3	13,5	9,3	5,3	1,4

Ağın/ Elazığ Average Temperature	0	1	7	13	17	23	27	27	21	14	7	2
Average maximum temperature	3	6	12	18	23	29	33	33	28	20	12	5
Average minimum temperature	-4	-2	2	7	11	15	19	19	14	8	3	-1
Maden/Elazığ Average Temperature	-1	0	5	11	16	22	27	26	21	14	6	1
Average maximum temperature	2	5	10	16	22	29	34	33	28	20	11	5
Average minimum temperature	-5	-4	0	5	9	14	18	18	13	8	2	-3
Amasya Average Temperature	2,6	4,5	8,3	13,4	17,6	21,3	23,8	23,9	20	14,7	8,6	4,6
Average maximum temperature	7	9,8	14,5	20,4	25,1	28,7	31,1	31,6	27,9	21,9	14,7	8,9
Average minimum temperature	-0,8	0,3	3,1	7,2	11,1	14,5	16,7	16,8	13	8,7	4	1,4
Bursa Average Temperature	5,4	6,2	8,4	12,9	17,7	22	24,5	24,4	20,3	15,6	11,1	7,4
Average maximum temperature	9,6	10,9	13,8	19	23,9	28,3	30,9	31,1	27,2	22	16,6	11,7
Average minimum temperature	1,7	2,2	3,6	7,2	11,4	15	17,3	17,3	13,8	10,2	6,4	3,6
Mersin Average Temperature	10,3	11,2	13,8	17,6	21,4	25,1	27,9	28,4	25,9	21,6	16,3	12
Average maximum temperature	14,7	15,6	18,2	21,7	25	28,2	30,8	31,6	30,1	26,8	21,6	16,6
Average minimum temperature	6,4	7	9,3	13	17	21	24,1	24,4	21,1	16,5	11,7	8
Karakoçan/Elazığ Average Temp.	-2	-1	5	11	16	22	26	26	21	14	6	0
Average maximum temperature	2	4	10	16	22	28	33	33	28	20	11	4
Average minimum temperature	-6	-4	0	5	9	14	18	18	13	7	2	-3
Kırklareli Average Temperature	2,9	4,1	6,9	12	17,1	21,4	23,8	23,6	19,4	14,1	9,3	5,1
Average maximum temperature	6,9	8,6	12,2	17,9	23,5	28	30,7	30,7	26,2	20	13,9	8,8
Average minimum temperature	0,1	1	3	7,1	11,6	15,6	17,8	17,8	14,1	9,8	5,9	2,3
Burdur Average Temperature	2,6	3,8	6,9	11,7	16,5	21	24,6	24,6	20,2	14,5	8,9	4,3
Average maximum temperature	6,8	8,8	12,6	17,8	23,1	28	32	32,3	27,9	21,5	14,5	8,5
Average minimum temperature	-0,9	-0,3	1,9	6,1	10,2	14	17	17	12,9	8,4	4,1	0,9
Dinar/Afyonkarahisar Average Temp.	2	3	6	11	16	21	24	24	19	13	7	3
Average maximum temperature	6	8	12	17	22	28	31	31	27	20	13	8
Average minimum temperature	-2	-1	1	5	9	13	16	16	12	7	2	-1
Çanakkale Average Temperature	6,3	6,7	8,4	12,6	17,6	22,3	25,1	25,1	21,1	16,3	12,2	8,5
Average maximum temperature	9,6	10,3	12,5	17,3	22,7	27,8	30,8	30,7	26,5	20,9	16	11,8
Average minimum temperature	3,2	3,4	4,8	8,3	12,7	16,7	19,4	19,7	16,1	12,2	8,6	5,4
Erzincan Average Temperature	-2,9	-1,2	4,1	10,7	15,5	19,9	23,8	24	19,2	12,5	5,7	-0,1
Average maximum temperature	1,7	3,7	9,5	16,8	22,3	27,1	31,5	32,1	27,5	20	11,7	4,5
Average minimum temperature	-6,9	-5,3	-0,7	4,8	8,8	12,2	15,6	15,5	10,9	5,9	0,8	-3,9
Doğanşehir/Malatya Average Temp.	-1	0	5	10	15	21	25	25	20	13	6	1
Average maximum temperature	2	4	9	15	21	27	31	31	26	18	10	4
Average minimum temperature	-4	-3	1	5	9	14	18	18	13	8	2	-2
Geyve/Sakarya Average Temp.	5	6	8	13	17	21	23	23	20	15	10	6
Average maximum temperature	9	10	14	19	24	27	30	30	27	21	16	11
Average minimum temperature	1	1	3	7	11	14	17	17	13	10	5	2
Sivrice/Elazığ Average Temperature	-3	-1	4	10	15	20	25	25	19	12	5	-1
Average maximum temperature	1	3	9	15	21	27	32	31	26	18	9	3
Average minimum temperature	-6	-5	-1	4	8	13	17	17	12	6	0	-4
Arapgir/Malatya Average Temp.	-2	-1	5	11	15	20	25	24	19	12	5	0
Average maximum temperature	2	4	10	16	22	27	32	32	27	19	10	4
Average minimum temperature	-6	-4	0	4	8	13	16	16	11	6	0	-3
Baskil/Elazığ Average Temperature	-3	-1	4	10	15	20	24	24	19	12	5	0
Average maximum temperature	1	3	9	16	21	27	31	31	26	18	9	3
Average minimum temperature	-6	-5	-1	4	8	13	16	16	11	6	0	-4
Divriği/Sivas Average Temperature	-2	-1	5	11	15	20	23	23	19	12	5	0
Average maximum temperature	2	4	10	16	21	27	31	31	26	19	10	4
Average minimum temperature	-6	-5	0	4	8	12	15	15	10	6	0	-4
İstanbul Average Temperature	6,7	6,9	8,4	12,8	17,6	22,2	24,6	24,7	21,2	16,7	12,6	8,9
Average maximum temperature	9,6	10,2	12,3	17,3	22,2	26,9	29,6	29,6	25,9	20,6	16	11,8
Average minimum temperature	4,2	4,2	5,4	9,2	13,6	18	20,4	20,7	17,6	13,7	9,8	6,4
Tokat Average Temperature	1,9	3,6	7,4	12,5	16,4	19,7	22,1	22,4	18,9	13,8	8	3,8
Average maximum temperature	6,3	8,5	13,2	19,2	23,6	26,9	29,1	29,9	26,7	20,8	13,8	8
Average minimum temperature	-1,6	-0,6	2,5	6,6	10,2	13,3	15,6	15,8	12,3	8,3	3,5	0,4
Kayseri Average Temperature	-1,6	0,3	4,8	10,6	15,1	19	22,3	22,1	17,5	11,9	5,6	0,8
Average maximum temperature	4,2	6,3	11,5	17,8	22,6	26,9	30,7	30,9	26,7	20,5	13,1	6,6
Average minimum temperature	-6,7	-5,1	-1,3	3,2	6,9	9,9	12,1	11,6	7,5	3,6	-0,8	-4,3
Ankara Average Temperature	0,3	1,7	5,7	11,3	16,1	20	23,4	23,5	19	13,2	7,3	2,6
Average maximum temperature	4,3	6,5	11,5	17,4	22,4	26,6	30,3	30,5	26,1	20	13,1	6,6
Average minimum temperature	-3,2	-2,2	0,7	5,4	9,7	13	15,9	16,1	11,9	7,2	2,6	-0,7
Isparta Average Temperature	1,8	3	6	10,8	15,5	19,9	23,5	23,4	18,9	13,4	7,9	3,7
Average maximum temperature	6,3	7,8	11,6	16,7	21,9	26,6	30,4	30,7	26,6	20,6	14	8,3
Average minimum temperature	-1,9	-1,2	1	4,8	8,7	12,4	15,4	15,3	11,1	6,8	2,8	-0,1
Uşak Average Temperature	2,3	3,3	6,1	10,9	15,6	19,9	23,4	23,5	19,2	13,7	8,4	4,3
Average maximum temperature	6,9	8,3	11,7	16,8	21,9	26,5	30,4	30,7	26,4	20,3	14,2	8,9
Average minimum temperature	-1,2	-0,6	1,3	5,2	9,2	12,7	15,5	15,7	12	8	3,9	0,8
Kırşehir Average Temperature	-0,2	1,4	5,3	10,8	15,5	19,7	23,1	23,1	18,6	12,8	6,6	2,2
Average maximum temperature	4,6	6,7	11,3	17,2	22,1	26,3	29,9	30,1	26,1	20,1	13,1	7
Average minimum temperature	-4,2	-3,1	-0,2	4,4	8,6	12,4	15,7	15,7	11,1	6,1	1,2	-1,8

Gediz/Kütahya Average Temp.	3	3	7	11	16	20	24	24	20	14	8	4
Average maximum temperature	7	8	12	16	22	26	30	30	26	20	13	8
Average minimum temperature	-1	0	2	6	10	14	16	16	13	8	4	1
Kulu/Konya Average Temperature	0	1	5	11	15	20	23	23	18	12	5	1
Average maximum temperature	4	6	11	17	22	26	30	29	25	19	11	6
Average minimum temperature	-4	-4	-1	4	9	13	16	15	11	5	0	-3
Ilgın/Konya Average Temperature	0	2	5	11	15	20	23	23	19	13	6	2
Average maximum temperature	4	6	11	16	21	26	29	29	25	19	11	6
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	13	16	16	12	7	2	-2
Simav/Kütahya Average Temp.	2	3	6	10	15	20	23	23	19	13	7	3
Average maximum temperature	6	7	11	16	21	26	30	30	26	19	12	7
Average minimum temperature	-2	-1	1	5	9	12	15	16	12	7	3	0
Bolvadin/Afyonkarahisar Average T.	0	2	5	11	15	19	23	22	18	12	6	2
Average maximum temperature	4	6	10	16	21	26	29	29	25	18	11	6
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	12	15	15	11	7	2	-2
Yalova Average Temperature	6,6	7	8,4	12,2	16,8	21,1	23,5	23,5	20,1	16,1	12,1	8,8
Average maximum temperature	10	10,7	12,6	16,9	21,4	25,9	28,4	28,5	25,1	20,7	16,4	12,3
Average minimum temperature	3,3	3,6	4,6	8	12,2	16	18,1	18,4	15,2	12	8,3	5,5
Bilecik Average Temperature	2,5	3,7	6,4	11,5	16,1	19,9	22,1	22,1	18,5	13,9	9,2	4,7
Average maximum temperature	6	7,9	11,4	17,1	22	25,8	28,4	28,7	24,9	19,4	13,6	8,1
Average minimum temperature	-0,3	0,4	2,4	6,7	10,9	14,2	16,3	16,5	13,2	9,6	5,6	1,9
Tekirdağ Average Temperature	4,9	5,5	7,3	11,7	16,7	21,1	23,7	23,9	20,3	15,7	11,3	7,3
Average maximum temperature	8,1	9	11	15,7	20,6	25,3	28,1	28,3	24,5	19,5	14,8	10,5
Average minimum temperature	2	2,5	4,1	8,1	12,7	16,7	19,1	19,4	16,2	12,1	8,2	4,4
Akşehir/Konya Average Temp.	0	2	6	11	15	20	23	23	18	13	6	2
Average maximum temperature	4	6	10	15	20	25	29	29	25	18	11	6
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	13	16	16	12	7	2	-1
Beyşehir/Konya Average Temp.	0	1	5	10	14	19	22	22	18	12	6	2
Average maximum temperature	4	6	10	15	20	25	28	28	25	18	11	6
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	13	16	15	11	7	2	-2
Seydişehir/Konya Average Temp.	1	2	5	10	14	19	23	22	18	12	6	2
Average maximum temperature	5	6	10	15	20	25	28	29	25	19	12	6
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	13	16	16	11	7	2	-1
Yunak/Konya Average Temperature	-1	0	4	9	14	18	22	22	17	11	5	0
Average maximum temperature	3	5	10	15	20	25	28	28	24	17	10	4
Average minimum temperature	-5	-4	-1	3	7	11	15	14	10	5	0	-3
Sivrihisar/Eskişehir Average Temp.	-2	0	4	9	14	18	22	21	17	11	4	0
Average maximum temperature	2	5	10	15	20	25	28	28	24	17	10	4
Average minimum temperature	-5	-4	-2	3	7	11	14	14	9	4	-1	-4
Keskin/Kırıkkale Average Temp.	-2	0	4	9	14	18	22	21	17	11	4	0
Average maximum temperature	3	5	10	15	20	25	29	28	24	18	11	5
Average minimum temperature	-6	-6	-3	2	6	10	13	13	8	3	-2	-5
Nevşehir Average Temperature	-0,2	0,9	4,9	10,1	14,5	18,3	21,3	21,2	17,3	12,1	6,7	2,1
Average maximum temperature	3,9	5,5	10,2	15,9	20,6	24,8	28,5	28,6	24,5	18,3	11,8	6,2
Average minimum temperature	-3,7	-2,7	0,6	5,1	8,8	11,6	13,6	13,5	10,4	6,8	2,4	-1,3
Bafra/Samsun Average Temp.	7	7	8	12	16	21	24	24	21	17	12	9
Average maximum temperature	10	10	12	15	19	24	27	27	24	19	15	12
Average minimum temperature	5	4	6	9	13	17	20	20	17	14	9	6
Van Average Temperature	-3,1	-2,5	1,7	7,8	13,2	18,3	22,3	22,2	17,9	11,4	4,9	-0,3
Average maximum temperature	2	2,7	6,6	12,9	18,6	24	28,3	28,5	24,4	17,4	10,3	4,6
Average minimum temperature	-7,5	-7	-2,7	2,7	7,1	10,9	14,7	14,7	10,8	5,7	0,4	-4,5
Trabzon Average Temperature	7,5	7,3	8,4	11,8	15,9	20,2	23	23,5	20,5	16,7	13,1	9,6
Average maximum temperature	10,9	10,8	12	15,6	19,2	23,2	26	26,6	23,8	20,1	16,6	13,1
Average minimum temperature	4,7	4,4	5,5	8,7	12,9	17,1	20	20,5	17,4	13,7	10,1	6,8
Sinop Average Temperature	7,1	6,8	7,5	10,7	15	19,9	23	23,4	20,2	16,4	12,7	9,4
Average maximum temperature	9,8	9,7	10,6	14,1	18,3	23,1	26	26,4	23,2	19,3	15,6	12,2
Average minimum temperature	4,7	4,3	5	8	12,2	16,9	19,9	20,4	17,4	13,8	10,1	6,9
Edremit/Van Average Temperature	-3	-2	2	8	13	18	22	22	18	12	5	0
Average maximum temperature	2	2	6	12	17	23	27	27	23	16	9	4
Average minimum temperature	-7	-6	-2	4	8	12	16	16	11	6	1	-4
Tatvan/Bitlis Average Temperature	-6	-4	1	7	12	18	22	22	17	10	3	-3
Average maximum temperature	-2	0	4	11	16	23	27	27	23	15	7	1
Average minimum temperature	-9	-8	-3	2	7	11	15	15	10	5	-1	-6
Ahlat/ Bitlis Average Temperature	-6	-4	1	7	12	17	22	21	17	10	3	-3
Average maximum temperature	-1	0	5	12	17	23	27	28	23	16	8	1
Average minimum temperature	-10	-8	-3	2	7	11	14	14	9	4	-1	-7

Table 2. Annual temperature data of cities belonging to the Cfa climate type

CFA / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Kocaeli Average Temperature	6,2	6,7	8,5	13	17,6	21,7	23,8	24	20,5	16,2	12,2	8,4
Average maximum temperature	9,7	10,6	13,2	18,5	23,3	27,5	29,6	29,8	26,2	21,1	16,5	12
Average minimum temperature	3,2	3,4	4,8	8,5	12,8	16,6	19	19,3	16,1	12,5	8,8	5,5
Karabük Average Temperature	2,8	5,4	7,8	12,1	16,6	20,2	23,1	24	19,7	14,3	8,6	4,5
Average maximum temperature	7,9	11,6	14,8	20,2	24,4	27,8	31,3	32,7	28,4	21,7	15,3	9,5
Average minimum temperature	-0,5	1,2	2,8	5,8	10,6	14,5	16,1	16,9	13,2	9,2	4,1	1,4
Sakarya Average Temperature	6,2	6,8	8,7	12,9	17,4	21,4	23,5	23,4	19,8	15,6	11,8	8,3
Average maximum temperature	9,9	11,2	13,8	19	23,6	27,6	29,5	29,6	26,4	21,5	16,9	12,1
Average minimum temperature	3	3,4	4,6	8,2	12,3	16	18	18,1	14,6	11,2	7,7	5,1
Düzce Average Temperature	3,7	5,2	7,6	12,2	16,5	20,3	22,4	22,3	18,7	14,2	9,5	5,8
Average maximum temperature	8,3	10,5	13,6	19	23,4	27,1	29,1	29,3	26	20,9	15,7	10,4
Average minimum temperature	0,5	1,4	3,5	7,2	11,3	14,8	16,9	17	13,5	9,8	5,3	2,5
Çankırı Average Temperature	-0,5	1,2	5,6	11,2	15,8	19,7	23,1	22,9	18,1	12,2	5,8	1,6
Average maximum temperature	3,7	6,3	11,9	18	23	27,1	31,1	31,4	26,7	20,3	12,4	5,7
Average minimum temperature	-3,9	-3,1	-0,1	4,5	8,7	11,9	14,2	14	9,7	5,2	0,6	-1,8
Pazar/Tokat Average Temp.	2	4	8	13	16	20	23	23	19	14	8	4
Average maximum temperature	6	8	13	18	23	27	29	30	26	20	13	8
Average minimum temperature	-1	-1	2	6	10	13	16	16	13	8	3	0
Bartın Average Temperature	4,1	4,9	7,3	11,4	15,8	19,8	22	21,9	18	13,9	9,3	5,9
Average maximum temperature	9,4	10,7	13,4	18,1	22,4	26,2	28,3	28,5	25,2	20,7	16,1	11,4
Average minimum temperature	0,4	0,7	2,5	6	10	13,6	15,8	15,8	12,2	8,9	4,7	2,1
Osmancık/Çorum Average Temp.	1	2	6	11	16	20	23	23	19	13	7	3
Average maximum temperature	5	8	12	18	22	26	29	30	26	20	12	7
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	12	15	15	11	7	2	-1
Emirdağ/Afyonkarahisar Average	0	1	5	10	15	19	22	22	18	12	6	1
Average maximum temperature	4	6	11	16	21	26	29	29	25	18	11	6
Average minimum temperature	-4	-3	0	4	8	12	15	14	10	6	1	-2
Afyonkarahisar Average Temp.	0,3	1,8	5,2	10,4	15	18,9	22,2	22,2	17,9	12,5	7	2,5
Average maximum temperature	4,6	6,5	10,9	16,4	21,3	25,6	29,5	29,7	25,3	19,4	12,9	6,7
Average minimum temperature	-3,5	-2,4	0,1	4,2	8,2	11,3	13,8	13,7	9,9	5,9	1,8	-1,3
İnebolu/Kastamonu Average Tem	7	6	8	12	17	21	23	24	20	16	12	8
Average maximum temperature	9	9	12	16	20	25	27	27	24	20	15	11
Average minimum temperature	4	4	5	9	13	17	20	19	17	13	9	6
Akçakoca/Düzce Average Temp.	7	7	9	13	17	21	23	23	20	16	12	8
Average maximum temperature	10	10	12	17	21	25	27	27	24	20	15	12
Average minimum temperature	4	4	5	9	13	17	19	19	16	12	9	6
Tavşanlı/Kütahya Average Temp.	1	2	5	10	15	19	22	22	18	12	6	3
Average maximum temperature	5	6	10	16	21	25	29	29	25	19	12	6
Average minimum temperature	-2	-2	0	4	8	12	15	15	11	7	2	-1
Tosya/Kastamonu Average Temp.	-1	0	4	9	14	18	21	21	17	12	5	1
Average maximum temperature	3	5	10	16	21	25	29	29	25	18	11	5
Average minimum temperature	-5	-4	-1	3	7	11	13	13	10	6	1	-3
Ordu Average Temperature	7	7	8,2	11,5	15,7	20,4	23,2	23,5	20,3	16,2	12,3	9,1
Average maximum temperature	11	11,1	12,2	15,3	19,3	24,1	26,8	27,4	24,4	20,3	16,6	13,2
Average minimum temperature	4	4	5,2	8,4	12,5	16,8	19,6	20,1	17	13,1	8,9	6
Ünye/Ordu Average Temp.	8	8	9	13	17	21	24	24	21	17	13	10
Average maximum temperature	11	11	12	16	19	24	26	26	23	20	15	12
Average minimum temperature	6	5	7	10	14	18	21	21	18	14	10	7
Bozkurt/Kastamonu Average T.	5	5	7	11	15	20	23	23	19	15	11	7
Average maximum temperature	8	8	11	15	19	24	27	27	23	19	14	10
Average minimum temperature	3	2	4	7	12	16	18	18	15	12	7	4
Samsun Average Temperature	7,2	7,2	8	11,3	15,6	20,3	23,2	23,7	20,3	16,5	12,8	9,5
Average maximum temperature	10,8	11	12,1	15,3	19,1	23,7	26,6	27,2	24	20,4	16,8	13,1
Average minimum temperature	4,2	3,9	4,7	7,8	12,1	16,3	19,2	19,7	16,6	13	9,4	6,4
Rize Average Temperature	6,8	6,8	8,1	11,7	16	20,3	22,9	23,3	20,3	16,4	12,3	8,8
Average maximum temperature	10,7	10,8	11,9	15,4	19,4	23,6	26,0	26,6	24,0	20,4	16,5	12,9
Average minimum temperature	3,8	3,7	4,9	8,4	12,7	16,8	19,6	20,1	17	13,1	9,1	5,8
Giresun Average Temperature	7,4	7,2	8,1	11,3	15,6	20,2	22,9	23,4	20,3	16,5	12,9	9,6
Average maximum temperature	10,7	10,7	11,8	15,1	19	23,5	26,2	26,7	23,7	20	16,4	13
Average minimum temperature	4,7	4,4	5,3	8,5	12,8	17,1	19,9	20,4	17,4	13,8	10,1	6,9
Zonguldak Average Temperature	6,2	6,4	7,5	11,3	15,4	19,6	21,9	22	19	15,4	11,9	8,5
Average maximum temperature	9,3	9,6	10,9	14,9	18,9	23,1	25,2	25,4	22,5	18,8	15,3	11,7
Average minimum temperature	3,6	3,5	4,6	8,1	12,2	16	18,1	18,3	15,5	12,3	8,9	5,8
Amasra/Bartın Average Temp.	7	7	8	12	16	21	23	23	20	16	12	9
Average maximum temperature	9	9	11	15	19	23	26	26	23	19	15	11
Average minimum temperature	4	4	6	9	13	17	20	20	17	13	9	6
Hopa/Artvin Average Temp.	7	7	9	12	16	20	23	23	20	16	12	8
Average maximum temperature	10	10	12	16	19	23	25	26	23	20	15	12
Average minimum temperature	4	4	6	9	13	17	20	20	17	13	9	6
Cide/Kastamonu Average Temp.	6	6	7	11	16	20	23	23	19	15	11	8
Average maximum temperature	8	8	10	14	18	23	25	26	23	18	14	10
Average minimum temperature	4	3	5	9	13	17	19	19	16	12	8	5
Boyabat/Sinop Average Temp.	2	3	6	11	16	20	23	22	19	14	8	4
Average maximum temperature	2	3	6	11	16	20	23	22	19	14	8	4
Average minimum temperature	-2	-1	1	5	9	13	15	15	12	8	3	0

Table 3. Annual temperature data of cities belonging to the Cfb climate type

CFB / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Çorum Average Temperature	-0,3	1,2	5	10,5	15	18,5	21,3	21,4	17,4	12,2	6,4	1,9
Average maximum temperature	4,3	6,5	11,4	17,5	22,2	26	29,1	29,6	25,6	20	13	6,5
Average minimum temperature	-4,3	-3,4	-0,7	3,7	7,6	10,4	12,5	12,7	9,3	5,3	1	-2
Merzifon/Amasya Average T.	0	1	5	10	14	18	20	21	17	12	5	1
Average maximum temperature	4	6	11	16	21	25	27	28	24	18	11	6
Average minimum temperature	-4	-4	-1	3	7	10	13	13	9	5	0	-3
Kastamonu Average Temp.	-1	0,8	4,4	9,6	14,1	17,5	20,2	20	15,9	10,9	5,3	1
Average maximum temperature	3,3	6,2	10,9	16,6	21,3	24,7	27,9	28,2	24	18,2	11,1	5
Average minimum temperature	-4,5	-3,5	-0,9	3,4	7,6	10,5	12,3	12,3	8,9	5,2	0,9	-2,4
Bolu Average Temperature	0,5	1,8	4,7	9,6	14,1	17,3	19,8	20	16,2	11,8	6,9	2,8
Average maximum temperature	5,3	7,2	11	16,6	21,4	24,6	27,4	28	24,3	19,3	13,3	7,5
Average minimum temperature	-3,5	-2,6	-0,5	3,6	7,6	10,4	12,4	12,7	9,5	6,2	2,1	-1,1
Artvin Average Temperature	2,7	3,8	7	11,9	15,9	18,8	20,9	21,2	18,3	14,2	9,1	4,5
Average maximum temperature	6,4	8,4	12,4	17,9	21,9	24,3	25,8	26,4	24	19,7	13,5	8
Average minimum temperature	-0,1	0,5	3	7,2	11,2	14,4	16,9	17,3	14,3	10,3	5,8	1,8
Ilgaz/Çankırı Average Temp.	-2	0	4	9	13	17	21	21	16	11	4	0
Average maximum temperature	2	4	9	15	19	23	27	27	24	17	10	4
Average minimum temperature	-6	-5	-2	3	7	10	13	13	9	4	-1	-4
Çerkeş/Çankırı Average Temp.	-3	-1	2	8	12	16	19	19	15	10	3	-1
Average maximum temperature	1	3	8	13	18	22	25	25	22	16	9	3
Average minimum temperature	-6	-6	-2	2	6	9	12	12	8	3	-1	-4
Devrekani/Kastamonu Average	-2	-1	2	7	11	15	18	18	14	9	4	0
Average maximum temperature	2	3	7	12	17	21	24	24	21	15	9	4
Average minimum temperature	-5	-5	-2	2	6	9	12	12	8	5	0	-3

Table 4. Annual temperature data of cities belonging to the Csb climate type

CSB / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Ürgüp/Nevşehir Average Temp.	-2	0	5	10	14	19	22	22	17	11	5	0
Average maximum temperature	4	6	11	17	21	26	29	29	25	19	11	6
Average minimum temperature	-6	-5	-2	3	7	10	13	12	8	4	-1	-5
Gümüşhane Average Temp.	-1,8	-0,5	3,7	9,3	13,6	17,1	20	20,3	16,4	11,2	5,1	0,5
Average maximum temperature	3	5,3	9,9	16,3	21,2	25,2	28,2	29	25,5	19	10,8	5
Average minimum temperature	-5,4	-4,8	-1	3,8	7,6	10,9	13,8	13,9	10,2	6	1	-2,9
Bozüyük/ Bilecik Average Temp.	0	2	5	10	14	19	21	21	17	12	6	2
Average maximum temperature	4	6	11	16	21	25	28	28	24	18	11	6
Average minimum temperature	-3	-3	0	4	8	12	14	14	10	6	1	-1
Kütahya Average Temperature	0,4	1,8	5	10	14,6	18,2	20,8	20,8	16,7	11,9	6,9	2,5
Average maximum temperature	4,7	6,7	10,8	16,3	21,2	25	28,1	28,5	24,6	19,1	12,9	6,7
Average minimum temperature	-3,3	-2,4	-0,2	3,9	7,9	10,9	13,2	13,2	9,2	5,6	2	-1,1
Kaman/Kırşehir Average Temp.	-1	0	4	10	14	18	22	22	17	11	4	0
Average maximum temperature	3	5	10	16	21	25	29	28	24	18	11	5
Average minimum temperature	-6	-5	-2	3	7	11	14	14	9	4	-1	-4
Sivas Average Temperature	-3,4	-2,1	2,7	9	13,5	17	20	20,2	16,2	11	4,8	-0,6
Average maximum temperature	0,9	2,6	8,1	15,3	20,1	24,1	27,8	28,6	24,7	18,6	10,9	3,7
Average minimum temperature	-7,3	-6,2	-2,1	3,1	6,9	9,6	11,7	11,8	8,1	4,2	-0,2	-4,3
Kızılcahamam/Ankara Average T.	-2	-1	3	8	13	16	20	20	15	10	4	0
Average maximum temperature	2	4	8	14	19	23	26	26	22	16	9	4
Average minimum temperature	-6	-5	-2	2	6	10	13	12	8	4	-1	-4
Hadim/Konya Average Temp.	-3	-2	2	7	11	16	20	20	15	9	3	-1
Average maximum temperature	1	3	7	12	17	23	27	26	22	16	8	3
Average minimum temperature	-7	-6	-3	1	5	9	13	12	8	3	-2	-5
Yozgat Average Temperature	-1,7	-0,6	3	8,5	13,1	16,7	19,6	19,8	15,9	10,8	5,1	0,7
Average maximum temperature	2,2	3,7	8,1	14	18,9	22,7	26	26,5	22,7	17	10,4	4,6
Average minimum temperature	-5,3	-4,6	-1,5	3,2	7,4	10,5	12,9	13,1	9,5	5,4	0,7	-2,6
Gevaş/Van Average Temp.	-4	-3	1	7	12	17	21	21	17	10	4	-1
Average maximum temperature	0	1	5	11	16	22	26	26	22	15	8	3
Average minimum temperature	-8	-7	-3	2	7	11	14	14	10	5	-1	-5
Şebin Karahisar/Giresun Average	-4	-2	2	8	12	16	19	19	15	10	3	-2
Average maximum temperature	0	2	7	13	18	22	25	26	22	16	8	3
Average minimum temperature	-8	-6	-2	2	6	10	13	12	8	4	-2	-5
Keleş/Bursa Average Temp.	-1	0	3	7	12	16	19	19	15	10	4	1
Average maximum temperature	3	4	8	13	18	22	25	25	21	16	9	4
Average minimum temperature	-4	-4	-2	2	6	10	12	12	9	4	0	-3

Table 5. Annual temperature data of cities belonging to the BSk climate type

BSK / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Elazığ Average Temperature	-0,8	0,7	5,6	12	17,2	22,8	27,2	27	22,1	15,1	7,5	1,8
Average maximum temperature	3	5,2	10,9	17,9	23,7	29,8	34,3	34,4	29,5	21,8	12,8	5,6
Average minimum temperature	-3,9	-3	1	6,4	10,9	15,4	19,4	19,3	14,6	9	3,2	-1,2
Malatya Average Temperature	-0,2	1,5	6,8	12,9	18	23,1	27,1	27,1	22,5	15,6	8	2,2
Average maximum temperature	3,2	5,6	11,6	18,4	24	29,6	34	34	29,2	21,4	12,6	5,5
Average minimum temperature	-3,3	-2	2,3	7,5	11,9	16,3	19,9	20	15,6	10	4	-0,7
Iğdır Average Temperature	-3,3	-0,2	6,4	13,1	17,8	22,3	26	25,4	20,5	13,2	6	-0,2
Average maximum temperature	2	5,6	12,6	19,8	24,7	29,6	33,4	33,2	29	21,2	12,8	4,9
Average minimum temperature	-7,9	-5,3	0,3	6,2	10,7	14,5	18,1	17,3	12,4	6,2	0,4	-4,4
Kırıkkale Average Temperature	0,4	2,4	6,8	12	16,7	20,8	24,2	24,2	19,7	13,7	7,1	2,6
Average maximum temperature	4,4	7,3	12,7	18,4	23,3	27,7	31,1	31,2	27,2	20,9	12,9	6,4
Average minimum temperature	-2,7	-1,5	1,6	6,2	10,3	14	16,9	16,8	12,4	7,6	2,4	-0,5
Karaman Average Temperature	0,6	2	6,3	11,6	16,1	20,2	23,4	23,1	18,9	13,1	7,1	2,7
Average maximum temperature	5,6	7,4	12,5	18,2	23,3	27,7	31,1	31,1	27,2	20,8	13,7	7,7
Average minimum temperature	-3,7	-2,6	0,6	5,1	8,9	12,6	15,3	14,8	10,5	5,8	1,3	-1,6
Aksaray Average Temperature	0,5	2	6,4	11,5	16,2	20,2	23,5	23,3	18,8	13,4	7,3	2,7
Average maximum temperature	5,5	7,5	12,5	18,1	23,1	27,1	30,7	30,8	26,7	21	13,8	7,8
Average minimum temperature	-3,6	-2,2	1,3	5,6	9,7	13,1	16,2	16	11,4	6,9	2	-1,3
Polatlı/Ankara Average Temp.	0	1	5	11	15	20	24	23	18	12	6	1
Average maximum temperature	4	6	11	17	22	27	30	30	25	19	11	6
Average minimum temperature	-4	-3	0	4	8	12	16	15	10	5	0	-2
Konya Average Temperature	-0,2	1,5	5,5	11,1	15,9	20,1	23,5	23,4	18,8	12,9	6,5	1,8
Average maximum temperature	4,6	7	11,7	17,5	22,4	26,6	30,2	30,2	26	20,1	13,1	6,7
Average minimum temperature	-4,2	-3,3	-0,2	4,3	8,6	12,7	15,9	15,7	11,1	6	0,9	-2,3
Eskişehir Average Temperature	0	1,6	5,2	9,9	14,9	18,9	21,9	22	17,5	12,1	6	2
Average maximum temperature	4,2	7	11,8	17,2	22,3	26,5	29,8	30,2	26	20,2	12,8	6,5
Average minimum temperature	-3,9	-3,4	-0,9	3,1	7,3	11,1	13,7	13,8	9,2	5	0,2	-1,7
Beypazarı/Ankara Average Temp.	1	2	6	11	16	20	23	23	18	13	6	2
Average maximum temperature	4	7	12	17	22	26	30	30	26	19	12	6
Average minimum temperature	-3	-2	1	5	9	13	16	16	11	7	2	-1
Korkuteli/Antalya Average Temp.	2	3	6	10	15	20	23	23	19	13	7	4
Average maximum temperature	7	8	11	16	20	26	30	30	26	20	13	8
Average minimum temperature	-2	-1	1	4	8	12	16	16	12	7	2	0
Nallıhan/Ankara Average Temp.	0	2	5	10	15	19	22	22	18	12	6	2
Average maximum temperature	4	6	11	17	21	26	29	29	25	19	11	6
Average minimum temperature	-3	-3	0	4	9	12	15	14	10	6	1	-2
Çiçekdağı/Kırşehir Average Temp.	-1	1	5	10	15	19	22	22	18	12	5	1
Average maximum temperature	4	6	11	16	21	26	30	29	25	19	11	6
Average minimum temperature	-5	-4	-1	3	7	11	14	13	9	5	-1	-3
Niğde Average Temperature	-0,3	1,1	5,1	10,6	15,1	19,2	22,5	22,4	18,1	12,6	6,6	1,9
Average maximum temperature	4,9	6,5	10,9	16,8	21,5	25,8	29,4	29,7	25,7	19,7	13,1	7,2
Average minimum temperature	-4,6	-3,4	-0,2	4,4	8,4	11,9	14,8	14,6	10,4	6	1,2	-2,4
Doğubeyazıt/Ağrı Average Temp.	-5	-3	3	9	13	18	22	22	17	11	3	-3
Average maximum temperature	-1	2	8	14	18	24	28	28	23	16	8	2
Average minimum temperature	-9	-7	-2	4	8	12	16	15	11	5	-1	-6
Develi/Kayseri Average Temp.	-3	-1	4	9	13	17	20	20	16	11	4	-1
Average maximum temperature	2	4	9	15	20	24	28	28	24	18	10	4
Average minimum temperature	-7	-6	-2	3	6	10	12	12	8	3	-2	-5

Table 6. Annual temperature data of cities belonging to the BSh climate type

BSH / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Ceylanpınar/Şanlıurfa Average Temp.	6	8	12	17	23	29	33	32	27	21	13	7
Average maximum temperature	11	13	17	23	29	36	40	39	34	27	18	12
Average minimum temperature	2	3	6	11	16	21	25	24	20	15	8	3
Akaçakale/Şanlıurfa Average Temp.	7	8	12	18	23	29	32	32	27	21	13	8
Average maximum temperature	11	13	17	23	30	35	39	38	34	27	18	12
Average minimum temperature	3	4	7	12	17	22	25	25	21	16	9	5
Birecik/Şanlıurfa Average Temp.	6	7	11	17	22	28	32	32	27	20	13	8
Average maximum temperature	10	12	17	22	29	35	39	38	34	26	18	12
Average minimum temperature	3	4	7	11	16	21	25	25	20	15	8	4

Table 7. Annual temperature data of cities belonging to the Dfa climate type

DFA / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Oltu/Erzurum Average Temp.	-7	-5	0	7	12	16	19	19	15	9	2	-4
Average maximum temperature	-2	0	6	13	18	22	26	27	23	16	8	1
Average minimum temperature	-12	-11	-5	1	6	9	12	12	7	2	-3	-9

Table 8. Annual temperature data of cities belonging to the Dfb climate type

DFB / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Erzurum Average Temperature	-9,1	-7,7	-2,4	5,4	10,7	14,9	19,2	19,5	14,8	8,2	1,2	-5,7
Average maximum temperature	-3,9	-2,3	2,6	11,0	16,9	21,8	26,6	27,3	22,7	15,2	6,9	-0,9
Average minimum temperature	-13,9	-12,6	-7	0	4,3	7,3	11,1	11,2	6,4	1,7	-3,8	-10,2
Kars Average Temperature	-10,8	-8,9	-2,8	5,2	10,3	14	17,6	17,9	13,7	7,4	0,5	-6,8
Average maximum temperature	-4,8	-2,7	2,9	11,4	16,9	21,2	25,6	26,4	22,3	15,1	6,9	-1,3
Average minimum temperature	-16,3	-14,7	-8,2	-0,6	3,9	6,7	9,9	9,8	5,4	0,5	-4,7	-11,7
Ardahan Average Temperature	-11,2	-10	-3,4	4,4	9,3	12,8	16	16	12	6,4	-0,2	-7,6
Average maximum temperature	-4,8	-3,1	2,8	10,9	16,3	20,4	24	24,7	20,8	14,4	6,5	-1,8
Average minimum temperature	-16,6	-15,6	-8,7	-1,1	3,2	6	8,9	8,6	4,5	0	-5,4	-12,4

Table 9. Annual temperature data of cities belonging to the Dsa climate type

DSA / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Muş Average Temperature	-7	-5,6	1,2	9,2	14,8	20,1	25	25,1	20,2	12,8	4,8	-2,5
Average maximum temperature	-2,9	-1,1	6	14,9	21,3	27,6	33	33,2	28,4	20	10,1	1,3
Average minimum temperature	-10,6	-9,4	-2,7	4,4	8,9	12,8	17,1	17,1	12,4	7	0,7	-5,6
Hakkari Average Temperature	-4,5	-3	2,2	8,3	14,2	20,2	24,7	24,7	20,3	13,1	5,3	-1,3
Average maximum temperature	-0,3	1,4	6,7	13,1	19,5	26,1	31	31,2	26,6	18,7	10	2,8
Average minimum temperature	-7,9	-6,7	-1,6	4,1	9,3	14,2	18,4	18,3	14,1	8	1,3	-4,6
Bitlis Average Temperature	-4,4	-3,4	1	7,3	12,5	18,3	22,7	23	18,5	11,4	4,8	-1,2
Average maximum temperature	-0,5	1	5	12,4	17,8	24,3	29,1	29,7	25	16,8	9,3	2,6
Average minimum temperature	-8,3	-7,4	-2,6	2,7	7,2	11,6	15,7	16,2	11,7	6,6	1,2	-4,5
Tercan/Erzincan Average Temp.	-6	-5	1	7	12	17	21	21	16	9	2	-4
Average maximum temperature	-2	0	6	13	18	24	28	29	24	16	8	1
Average minimum temperature	-11	-9	-4	2	6	9	13	12	8	3	-3	-8
Muradiye/Van Average Temp.	-6	-4	1	7	12	17	21	21	16	10	3	-3
Average maximum temperature	-1	1	5	11	16	22	27	27	22	15	7	1
Average minimum temperature	-10	-8	-3	2	7	11	14	14	10	4	-1	-7

Table 10. Annual temperature data of cities belonging to the Dsb climate type

DSB / Cities	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Göksun/Kahramanmaraş Average T.	-2	-1	4	9	14	19	23	23	18	12	5	0
Average maximum temperature	2	4	9	14	20	25	30	30	26	18	10	4
Average minimum temperature	-6	-4	0	4	8	12	15	15	10	6	0	-3
Ağrı Average Temperature	-10,5	-9,1	-3	6	12	16,5	21,1	21,3	16,4	9,3	1,7	-6,3
Average maximum temperature	-5,3	-3,4	2,2	11,8	18,7	24,3	29,3	30,1	25,5	17,4	8	-1,6
Average minimum temperature	-15,5	-14,4	-7,8	0,7	5,3	8,2	12,1	11,9	7	2	-3,5	-10,5
Zara/Sivas Average Temperature	-4	-2	3	9	13	17	21	21	17	11	4	-1
Average maximum temperature	0	2	8	14	19	24	28	28	24	17	9	3
Average minimum temperature	-7	-6	-2	3	7	11	13	13	9	5	-1	-5
Kangal/Sivas Average Temperature	-4	-2	3	9	13	17	21	21	17	10	3	-1
Average maximum temperature	0	2	8	14	19	24	28	29	24	17	9	2
Average minimum temperature	-7	-6	-2	3	7	10	13	13	9	4	-1	-5
Tomarza/Kayseri Average Temp.	-3	-2	3	9	13	17	20	20	16	10	4	-1
Average maximum temperature	2	4	9	14	19	24	28	28	24	17	10	4
Average minimum temperature	-7	-6	-2	2	6	10	12	12	8	3	-2	-5
Hınıs/Erzurum Average Temp.	-8	-6	-1	6	11	16	21	21	16	9	1	-5
Average maximum temperature	-3	-1	4	12	17	24	29	29	24	16	7	0
Average minimum temperature	-13	-11	-5	1	5	9	13	12	7	2	-4	-10
Erciş/Van Average Temperature	-5	-3	2	8	12	18	22	22	17	11	4	-2
Average maximum temperature	-1	1	6	12	17	23	27	27	22	16	8	2
Average minimum temperature	-9	-7	-2	3	8	11	15	15	11	5	-1	-6
Yüksekova/Hakkari Average Temp.	-5	-4	1	6	11	17	21	20	15	9	2	-3
Average maximum temperature	0	1	6	11	17	23	27	27	23	16	8	2
Average minimum temperature	-9	-8	-4	1	5	9	13	12	7	3	-2	-7
Pınarbaşı/Kayseri Average Temp.	-4	-2	2	8	12	16	20	20	16	10	3	-2
Average maximum temperature	0	2	7	13	18	23	27	28	23	16	8	3
Average minimum temperature	-8	-6	-2	2	6	10	12	12	8	4	-1	-5
Sarız/Kayseri Average Temperature	-4	-3	2	8	12	16	20	20	16	10	3	-2
Average maximum temperature	0	2	7	13	18	23	27	28	23	16	8	2
Average minimum temperature	-8	-7	-2	2	6	9	12	12	8	3	-2	-6
Bayburt Average Temperature	-6,2	-4,9	0,5	7	11,6	15,3	18,8	18,9	14,8	9,4	2,8	-3
Average maximum temperature	-0,8	0,7	6	13,2	18,4	22,9	27,2	27,8	23,7	16,9	8,9	2
Average minimum temperature	-10,4	-9,2	-4	1,8	5,7	8,5	11,2	11,1	7,4	3,6	-1,7	-6,8
Özalp/Van Average Temperature	-7	-5	0	5	10	15	19	19	15	8	1	-4
Average maximum temperature	-2	-1	4	10	15	21	25	25	21	14	6	1
Average minimum temperature	-11	-10	-5	0	4	8	12	12	7	2	-3	-8
Başkale/Van Average Temperature	-8	-7	-2	4	8	14	18	18	13	7	0	-5
Average maximum temperature	-3	-1	3	9	14	20	24	24	20	13	5	0
Average minimum temperature	-13	-12	-7	-2	2	6	10	10	5	0	-5	-10

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Empirical Mode Decomposition for Power Spectral Density Features in Radar-Based Fall Detection

İbrahim ŞEFLEK *1

*1Konya Technical University Faculty of Engineering and Natural Sciences, Electrical and Electronics Engineering, Konya, Türkiye

(Alınış / Received: 03.03.2025, Kabul / Accepted: 06.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Keywords
Radar,
Fall detection,
Signal processing,
Machine learning,
Classification

Abstract: In recent years, the increase in the number of older people and their tendency to live alone has made them more vulnerable to accidents. The most suffered situation in this regard is their falls. In this study, fall detection is carried out using radar. The proposed method classifies different falls and activities of daily living using radar-based measurements. The signals obtained by means of empirical mode decomposition (EMD) are separated into intrinsic mode functions (IMFs). The power spectral densities (PSD) of IMFs are calculated using the Welch method to provide features for classification. Thus, the effect of IMFs on classification is observed. In the study, conventional machine learning classes are employed, and the cubic Support Vector Machine (SVM) classifier detects the fall with 100% accuracy as a result of the PSDs calculated depending on the IMF 2-6 values. Furthermore, the classification results obtained based on other IMFs are almost error-free for some classifiers. Therefore, classification is also performed for seven different movements depending on IMFs. The cubic SVM algorithm performs above 90% in this case. The proposed method demonstrates that the effect of classical machine learning remains operative and efficacious.

Radar-Tabanlı Düşme Tespitinde Güç Spektral Yoğunluk Özellikleri için Ampirik Mod Ayrıştırması

Anahtar Kelimeler
Radar,
Düşme tespiti,
Sinyal işleme,
Makine öğrenmesi,
Sınıflandırma

Öz: Son dönemde yaşlı bireylerin artması ve yalnız yaşama eğilimleri onları kazalara açık hale getirmektedir. Bu hususta en fazla muzdarip olunan durum onların düşmesidir. Bu çalışmada radar kullanılarak düşmenin tespiti gerçekleştirilmektedir. Çeşitli düşme ve günlük aktiviteler radar tabanlı ölçümler yapılarak önerilen metot ile sınıflandırılmaktadır. Ampirik mod ayrıştırma (EMD) vasıtasıyla elde edilen sinyaller içsel mod fonksiyonlara (IMFs) ayrılmaktadır. IMF'lerin Welch yöntemiyle güç spektral yoğunlukları (PSD) hesaplanarak sınıflandırma için özellik olması sağlanmaktadır. Böylece IMF'lerin sınıflandırma üzerine etkisi gözlemlenmektedir. Geleneksel makine öğrenme sınıflarının kullanıldığı çalışmada IMF 2-6 değerlerine bağlı olarak hesaplanan PSD'ler sonucu Destek Vektör Makinesi (SVM) (kübik) sınıflandırıcısı düşmeyi %100 doğrulukla tespit etmektedir. Ayrıca diğer IMF'lere bağlı olarak elde edilen sınıflandırma sonuçları da bazı sınıflandırıcılar için neredeyse hatasızdır. Bundan dolayı yedi farklı hareket için de IMF'lere bağlı olarak sınıflandırma gerçekleştirilmektedir. SVM (kübik) algoritması bu durum içinde %90'ının üzerinde bir performans sergilemektedir. Önerilen yöntem ile geleneksel makine öğrenmesinin etkisinin hala aktif ve etkili olduğu sunulmaktadır.

*İlgili Yazar, email: iseflek@ktun.edu.tr

1. Introduction

It is expected that the world population growth will continue for about 60 years and will peak at about 10.3 billion. In parallel with this expectation, it is stated that the population will also age. In fact, it is predicted that the number of elderly individuals will reach 2.2 billion during this time period, exceeding the number of children [1]. From another point of view, people who socialize in the virtual environment day by day are getting lonelier both physically and spiritually in the real world. The most obvious indicator of this is the change in the old social structure and the intensification of individuals' desire to live alone. While it is obvious that this situation may be seen as appropriate and even fun for young and middle-aged individuals, the situation is the opposite for older individuals. This demographic and social change shows that health and social systems worldwide will need to be updated.

The elderly who become lonely can continue their lives comfortably at home if they have the ability to be self-sufficient. Similarly, individuals seeking a more social environment prefer elderly care homes. However, physically weakened elderly people become vulnerable to accidents and injuries both at home and in care homes. Here, one of the most dangerous accident types for the elderly is falls [2]-[3]. There is almost no one around us who has not heard that an elderly person has fallen and been injured. This determination is confirmed by the World Health Organization with the statement 'Falls are the second leading cause of unintentional death in the world'. Looking at the situation only in terms of death causes an underestimation of the magnitude of the problem. The injuries of an elderly person who falls and the subsequent treatment process cause both a financial and moral burden for individuals and a responsibility for the health infrastructure. Therefore, the timely detection of falls, especially for lonely elderly individuals, will pave the way for the rapid and effective implementation of treatment and subsequent services as well as preventing loss of life. Thus, individuals will be able to regain their health and participate in life again [4].

Two types of approaches come to the fore in the studies carried out by researchers for the detection of falls. The first of these is the use of contact or wearable devices. As the most basic, button types can be shown for these devices. The presence of a fall is determined by using the device in the event of a fall and danger [5]. Accelerometers and gyroscopes, which are essentially more advanced devices, have recently come to the fore in fall detection with a wearable approach [6]-[7]. The presence of a fall is determined by processing the velocity and orientation data of the devices due to movement. In addition to being attached directly to clothing, they can also be integrated into smartwatches or smartphones. Successful studies have been carried out with a wearable approach using small, lightweight, and accessible devices [8]-[9]. However, the fact that elderly individuals either do not want to carry the devices or forget to carry them pushes this approach to the back of the list of priorities. In addition, the battery problem of the devices is also stated as another negative factor.

Due to the disadvantages of the wearable approach, the other approach, the contactless approach, comes to the fore. Cameras, widely regarded as the most elementary method for a contactless approach, have been used for fall detection. [10]-[12]. They are placed in various parts of the house (living room, bedroom, bathroom, etc.), and the individual is followed. This situation disturbs the elderly based on privacy, especially in the context of interference in private life. In addition, the camera's occlusion and low light problems are among the factors that reduce its performance and preference. Within the scope of this approach, the use of a microphone for sound was used in fall detection [13]. However, ambient noise and dependence on environmental factors push it to the background. Lidar was another sensor investigated in fall detection [14]. Expensive and difficulties in controlling it are shown as disadvantages. The most remarkable and prominent studies of the non-contact approach to fall detection are carried out using radar. The fact that radar has proven itself in indoor applications makes it stand out [15]-[19].

The radar, which is not dependent on environmental conditions, does not have a problem such as privacy and is at very reasonable levels in terms of price, has been used extensively in fall detection research. Low power consumption and most importantly, the fact that its presence is not even felt is a reason for comfort for the elderly individuals observed. In the most basic expression, the fall is detected depending on the change in the signal reflected from the individual as a result of the application of the electromagnetic signal by the radar to the observed environment. In recent years, radar-based fall detection studies have been carried out by researchers using different hardware and algorithms.

In early studies, continuous wave radars and pulse radars were generally used [20]-[22]. In studies with one or two subjects, scenarios were set up to detect the presence of a fall. In studies carried out at home or in the laboratory, the presence of a fall or non-fall was detected by repetition of several movements, usually by creating a dataset of about a hundred movements. Due to the nature of the radar used, detection studies based on phase change were carried out. Using traditional machine learning, the presence of a fall was detected with considerable accuracy.

In the following period, with the increase in indoor radars, especially frequency-modulated radars, both range and speed can be detected. This situation has also accelerated the fall studies. The fall and non-fall (daily activities) movements obtained from the measurement results enable spectrograms to be obtained with time-frequency analysis approaches with such modulated radars. Thus, the modern approach of deep learning algorithms is used rather than traditional machine learning. The feature extraction process, which requires a long effort, has also been eliminated and the studies have gained new momentum and have positive effects on the detection results [23]-[25]. Recent fall studies have enabled Doppler-time, range-time, and even angle-time maps to be obtained with high-frequency multi-input multi-output radars due to the high number of receivers. In addition to this effect, point cloud studies also stand out. Hybrid approaches to deep learning are also encountered. As a result, fall detection studies, which started with one or two subjects, and non-fall detection, are a popular subject that is being studied with the use of multiple fall types and movements as well as a large number of subjects and advanced algorithms [26]-[29].

This study shows that the use of traditional machine learning, rather than deep learning, which is a popular approach in recent times, is still quite effective in fall studies. Intrinsic mode functions (IMFs) are calculated by applying empirical mode decomposition (EMD) to the data obtained in the measurement studies. The power spectrum densities for each of these functions are calculated and collected using the Welch method, which has been shown to be effective in our previous studies [33,40]. This situation was developed to reveal the effect of IMFs. Then, power spectral densities (PSDs) are used as features for traditional machine learning. Classifiers provide the detection of falls and other daily activities. So that, the effects of the intrinsic functions obtained by EMD on fall detection are analyzed in detail and presented. The present study, which combines EMD and PSD, makes a modest contribution to the existing literature on fall detection.

2. Material and Method

2.1. Measurement Setup

The measurement of falls and daily activities has been performed by the commercially available K-LD7 radar from RF-Beam. In addition to being a low-cost Doppler radar, the radar employs frequency shift keying (FSK) to detect the velocity, direction, distance and angle of moving objects. The radar, which comprises a transmitter and two receiver structures, utilizes frequencies of 24.05 and 24.25 GHz. In the measurement studies, the radar has been operated in continuous wave (CW) mode by using a receiver and a transmitter structure. Its small structure, low power consumption and the ability to detect people up to 15 m are among its remarkable features. Moreover, ease of use is another advantage [30]. Figure 1 shows the K-LD7 radar and its block diagram.

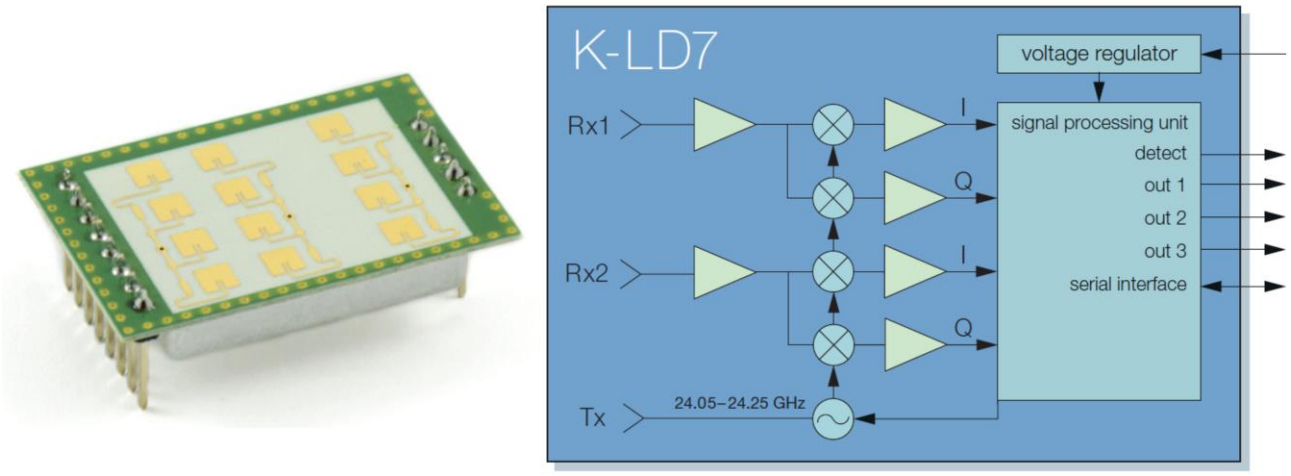


Figure 1. K-LD7 radar and block diagram [30]

2.1.1. Experimental Environment and Scenario

Falls and other activities are performed in the home environment in the context of being as close to reality as possible. The radar is placed 90 cm above the ground, in direct line of sight of the subject, after reviewing the literature. The basis of the measurement study is formed by a total of four falls and three daily activities. Falls have been performed in a variety of directions, including backward, forward, right, and left. Daily activities have been preferred as walking forward and backward, sit-stand and crawling. A total of six volunteer subjects participated in the experimental study. Participants are asked to do ten repetitions for each movement. Falls and sit-to-stand

measurements have been achieved by placing a cushion at a distance of 3 meters from the direct field of view of the radar. Walking forward and backward and crawling measurements were made with the subjects' movements at a distance of 2-4 meters. The duration of each activity is approximately 11.5 seconds. The creation of 420 radar data sets has thus been achieved. The experimental environment is illustrated in Figure 2.



Figure 2. Experimental environment

2.2. Signal Processing

The I and Q signals, which are separated by a 90° phase difference due to the structure of the radar, have been recorded using a sampling frequency of 2200 Hz. These signals are then subjected to EMD separately.

2.2.1. Empirical Mode Decomposition

Huang et al. proposed the EMD method as a means of analyzing nonlinear and non-stationary data [31]. EMD is a technique that adaptively decomposes any data (signals) into a finite set of AM/FM modulated components. The basis of EMD is the shift process. The shift produces amplitude and frequency modulated signals called IMF. Indeed, EMD is the process of arbitrarily separating the signal into components called IMF and residual.

The IMF is characterized by two properties. Firstly, the number of zero crossings of the IMF and the number of extrema are equal or at most one difference. Secondly, the average of the envelope defined by local maxima and the envelope defined by local minima must be zero. Consequently, the IMFs are almost orthogonal to the original data and provide a complete basis [31]. In the context of EMD for a signal $s(t)$, the IMFs can be expressed as follows:

1. The local minimum and maximum values of the $s(t)$ signal are determined.
2. The lower envelope, $e_a(t)$, and the upper envelope, $e_u(t)$, are derived from the application of interpolation to the local maximum and minimum points of the signal.
3. The mean of the upper and lower envelope is calculated in order to obtain $m(t)$. This situation is given by expression (1).

$$m(t) = \frac{e_a(t) + e_u(t)}{2} \tag{1}$$

4. The detail signal $d(t)$ is found by subtracting the average of the envelope values from the initial signal $s(t)$. The detail signal is shown by (2).

$$d(t) = s(t) - m(t) \tag{2}$$

5. Then, for the detail signal $d(t)$, the IMF properties (mentioned above) are checked. If the properties are fulfilled, the signal $d(t)$ is accepted as IMF_1. If the properties are not satisfied, the first 4 steps are repeated by replacing the signal $s(t)$ with $d(t)$ until the IMF properties are satisfied.

6. After determining the IMF, this signal is subtracted from the original signal and the residual signal $r(t)$ is calculated. This expression is obtained with (3).

$$r(t) = s(t) - d(t) \tag{3}$$

7. Subsequent to this stage, the residual signal $r(t)$ is regarded as the initial signal $s(t)$, and the aforementioned six steps are reiterated. When the residual signal $r(t)$ cannot be obtained from the IMF component, when it is a monotonic signal, in other words, when the stopping criterion is met, the IMF acquisition, that is, the decomposition process, ends. IMFs and residual component are shown as in (4).

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N} IMF_i + r(t) \tag{4}$$

where, N denotes the total number of IMFs, while $r(t)$ signifies the residual signal [31].

In this study, the eight IMF values obtained from the EMD for each I and Q signal are considered to be real and imaginary components, respectively. These components are then combined into a complex form, as illustrated in (5).

$$IMF_{combined} = IMF_{real}(I) + IMF_{imaginary}(jQ) \tag{5}$$

2.2.2. Welch Method

The Welch method is a non-parametric technique for estimating PSD. In this method, time series are primarily segmented into sub-segments, with a specific overlap ratio. Segments are multiplied by a window function and become the average of the modified periodograms. Since the method uses the PSD of different segments, the modified periodograms provide almost uncorrelated estimates of the true PSD [32]. Further details regarding the Welch method can be found in our preceding study [33]. The parameters employed in the Welch method are demonstrated in Table 1.

Table 1. Welch method parameters

Welch Method	
Parameters	***Values***
FFT	256
PSD Length	129
Noverlap	64
Hamming	128

The PSD of the complex IMF signals obtained is calculated using the Welch method. The PSDs calculated for the IMFs of each activity are then summed to obtain a single PSD value for each activity. The generation of PSDs is achieved by repeating the aforementioned process for 420 data, encompassing falls, and other activities.

Numerous studies have utilized PSDs as features for classification purposes [34]-[35]. Inspired by this situation, the use of PSDs as features for the classification of falls and activities is proposed.

2.3. Classification

2.3.1. Decision Tree (DT)

Decision tree is a nonparametric supervised learning method used for classification problems. DT, a popular approach, is effectively used in many areas. As its name suggests, it aims to reveal the results related to the target values of an element from the findings of an element using a tree as a classification model. The model, which consists of four types of nodes, has roots, branches, internal nodes, and leaves. A tree starts from the root node and ends at the last node, the leaves. Each leaf represents a classification and each branch represents the combination of features that reveal the target classifications. Classification can be done quickly and easily in decision trees [36].

2.3.2. Support Vector Machine (SVM)

Support vector machine is a supervised learning method that is utilized extensively in the context of classification. It can be preferred in the classification of linear or non-linear data. SVMs have the capacity to be trained with a variety of functions. The fundamental premise of the method is to ascertain the optimal decision boundary in two-dimensional space. In other words, classification is done by modeling complex non-linear decision boundaries with the appropriate training function. The optimal decision boundary is categorized into classes for the accurate allocation of new data. Hence, the best separating hyperplane is identified [37].

2.3.3. K-Nearest Neighbors (KNN)

K-Nearest Neighbors are a simple and widely used supervised learning method. KNN, a nonparametric method, also performs example-based learning. It does this by storing examples during the training process. In this method, data is divided into clusters during training. In the testing phase, the training data of k neighbors is compared with the test data in the variable space and classification is performed according to the class of the k nearest neighbors categorically. The determination of neighbors is found with the Euclidean distance metric between the investigated data point and k neighbors [38].

2.3.4. Ensemble Learning

Ensemble learning, which is frequently seen in classification studies, is essentially a method that tries to produce better classification performance by combining predictions obtained from multiple classifiers. It consists of three main classes. In the first of these, bagging, more than one model is created. This is done by training each on a subset of the training dataset. The second class is called boosting. Boosting is the class in which a series of models are created sequentially and each model learns from the errors of the previous model. The last class is stacking. It is defined as the class that trains by combining the outputs from different model sets [39].

Among the traditional machine learning methods, 4 basic classifiers and their derivatives are preferred in the study. The parameters used for the classifiers are presented in our previous study [33]. The number of IMF signals and their effect on the classification are revealed as stated below. The signal processing steps in the study are shown as a block diagram in Figure 3.

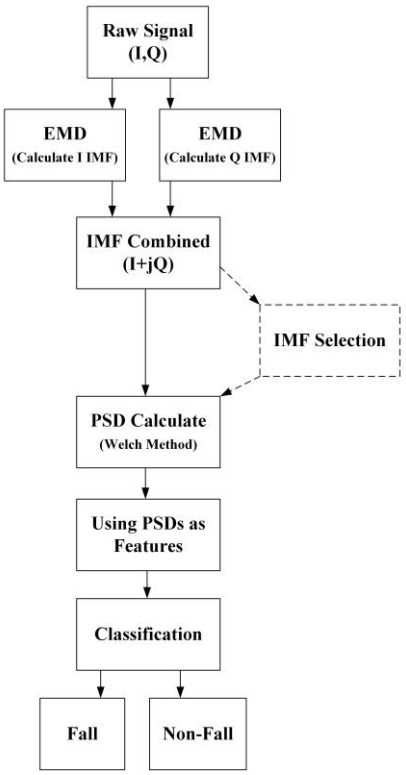


Figure 3. Signal processing block diagram

3. Experimental Results and Discussion

The classification of falls and daily activities using PSDs as features is achieved through the utilization of four fundamental classifiers and their respective derivatives. The ensuing classification results of fall and non-fall situations using IMF number 1, depending upon other IMFs, are displayed in Table 2.

Table 2. Classification accuracy rates of IMF number 1 based on the other IMFs

EMD Method	Performance Comparison of Classifiers			
	Classifiers and Accuracy Rate (%)			
IMF Values	DT (fine)	SVM (cubic)	KNN (fine)	Ensemble (bagged tree)
1-8	96	92,4	81,4	99,5
1-7	**96,2**	**92,6**	**81,4**	**99,5**
1-6	95,7	93,3	81,7	99,5
1-5	95,7	92,6	81,4	99,5
1-4	95,7	93,3	80,5	99,5
1-3	95,7	92,4	79	99,5
1-2	95,7	84	76,4	99,5

Upon analysis of the table, it is evident that the KNN classifier exhibits the lowest classification accuracy. Depending on the IMF values, it is stated that it provides a classification success of around 80%. The accuracy rates for both the DT and SVM classifiers exceed 90%, with the DT classifier demonstrating a higher rate of accuracy than the SVM. In the table presenting the analysis of the effect of IMF number 1 in conjunction with other IMFs, the Ensemble Bagged Tree algorithm demonstrates the highest level of accuracy, with a rate of 99.5%. It repeats its success with a constant accuracy rate in the comparison of all IMFs. The confusion matrix for this classifier can be seen in Figure 4. Additionally, precision, recall and F1-score values are presented in Table 3.

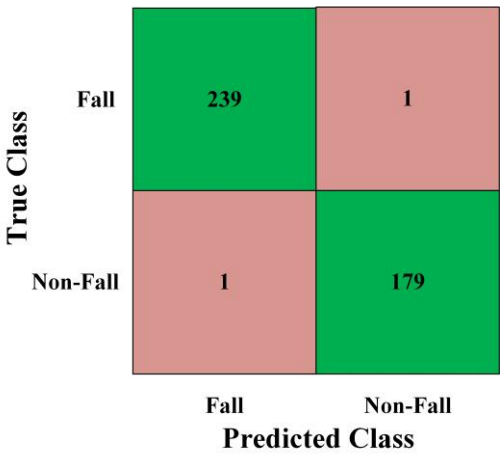


Figure 4. Confusion matrix for ensemble bagged tree algorithm to IMF 1-7

Table 3. Other classification metrics for the Ensemble Bagged Tree algorithm to IMF 1-7

Classification Metrics	Precision	Recall	F1-Score
Fall	99,6	99,6	99,6
Non-Fall	99,6	99,6	99,6

The classification of the fall is carried out based on IMFs numbered 2. The accuracy rate results obtained are shown in Table 4.

Table 4. Classification accuracy rates of IMF number 2 based on the other IMFs

EMD Method	Performance Comparison of Classifiers			
	Classifiers and Accuracy Rate (%)			
IMF Values	DT (fine)	SVM (cubic)	KNN (fine)	Ensemble (bagged tree)
2-8	97,9	99,8	99,3	99,8
2-7	97,9	99,8	99,3	99,8
2-6	**98,3**	**100**	**99,5**	**99,8**
2-5	98,3	100	99,5	99,8
2-4	98,1	100	99,5	99,8

Table 4, which presents the results of the effect of IMF number 2, demonstrates that each classifier is highly effective. It is noteworthy that even the DT classifier, which exhibits the lowest accuracy rate, attains a substantial result by attaining a rate of 98.3%. The KNN classifier, on the other hand, has achieved an accuracy rate of over 99% depending on each IMF value. Once more, the Ensemble bagged tree algorithm, which offers a very stable accuracy rate, reinforces its success with one incorrect classification in the table in which all 2 and other IMFs are compared. The classifier that provides an error-free classification for Table-4 is SVM. It reaches a rate of 100% for almost all 2 and other IMFs. The confusion matrix for the classification obtained with IMF values 2-6 is presented in Figure 5. In addition, other classification indicators are presented in Table 5 for IMF 2-6.

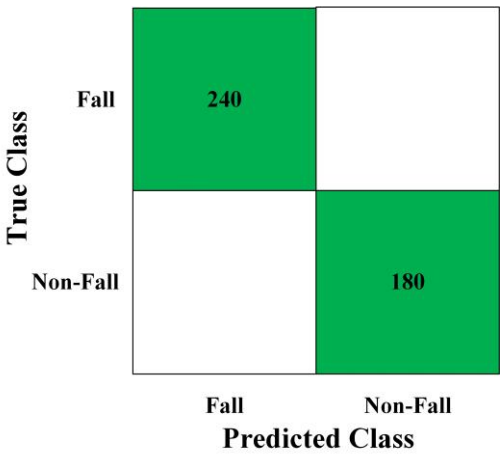


Figure 5. Confusion matrix for cubic SVM algorithm to IMF 2-6

Table 5. Other classification metrics for cubic SVM algorithm to IMF 2-6

Classification Metrics	Precision	Recall	F1-Score
Fall	100	100	100
Non-Fall	100	100	100

The classification of the fall is achieved through the calculation of the PSDs based on IMFs numbered 3. The performance of the classifiers is presented in Table 6.

Table 6. Classification accuracy rates of IMF number 3 based on the other IMFs

EMD Method	Performance Comparison of Classifiers			
	Classifiers and Accuracy Rate (%)			
IMF Values	DT (fine)	SVM (cubic)	KNN (fine)	Ensemble (bagged tree)
3-8	95,7	99,3	99,3	99
3-7	**96,2**	99,3	98,8	99
3-6	96	99,5	98,8	98,8
3-5	**95,7**	**99,5**	**98,8**	**99**

According to Table 6, it is evident that the decision tree algorithm once again exhibits a low accuracy rate in comparison to the other classifiers. However, it is still seen that the performance of this classifier is not negligible with a rate of 96.2%. Despite the fact that the ensemble bagged tree algorithm attains a 99% accuracy rate, it exhibits inferior performance in comparison to the other two classifiers and consistently generates a stable rate with almost all IMFs. The KNN classifier demonstrates a high level of accuracy, with a rate of 99.3%. In this table, where the effect of IMFs numbered 3 and other IMFs is examined, the SVM classifier reaches the best result with a classification accuracy of 99.5%. Figure 6 presents the confusion matrix for the SVM classifier. Other classification metrics obtained from the cubic SVM algorithm to IMF 3-5 are given in Table 7.

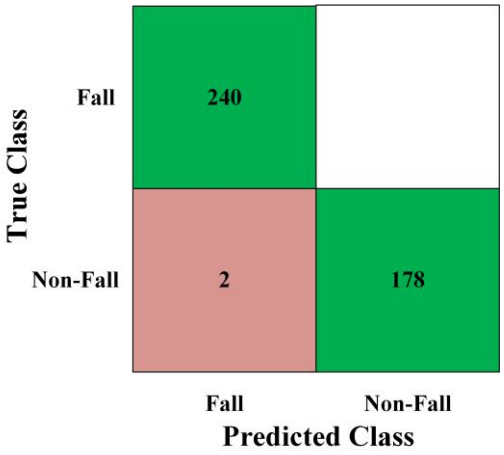


Figure 6. Confusion matrix for cubic SVM algorithm to IMF 3-5

Table 7. Other classification metrics for cubic SVM algorithm to IMF 3-5

Classification Metrics	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
Fall	99,2	100	99,6
Non-Fall	100	98,9	99,4

The accuracy rate obtained as a result of classifying the fall based on IMF number 4 is presented in Table 8.

Table 8. Classification accuracy rates of IMF number 4 based on the other IMFs

EMD Method	Performance Comparison of Classifiers			
	Classifiers and Accuracy Rate (%)			
IMF Values	DT (fine)	SVM (cubic)	KNN (fine)	Ensemble (bagged tree)
4-8	**93,6**	**98,1**	**93,8**	**92,6**
4-7	92,9	98,1	93,1	92,9
4-6	93,3	97,6	95,5	93,6

When looking at Table 8, it is seen that the accuracy rates have decreased for other IMFs. However, these rates are still above 90%. Surprisingly, the lowest accuracy rate is obtained by the Ensemble bagged tree classifier, which gives quite high results under the influence of other IMFs. The decision tree classifier also shares the same result with the Ensemble bagged tree algorithm. In this case, where the effect of IMF number 4 and other IMFs is examined, the KNN classifier has shown an accuracy rate of 95.5%. SVM, on the other hand, has achieved the highest accuracy rate, as in the effects of IMF numbers 2 and 3. Although it achieved the highest accuracy rate with a rate of 98.1%, the accuracy rate has decreased compared to other IMF effects.

Following a thorough examination of the impact of IMF on classification accuracy, it has been determined that IMF number 2 exerts a more significant influence on the accuracy of classification. In light of the favorable outcomes, the classification situation performed as falling and not falling is expanded for seven different movements. As demonstrated in Table 9, the maximum results obtained for each IMF value are presented. Contrary to expectations, the highest accuracy rate for seven movements has been obtained for IMF values 1-4. This success has been achieved by the cubic SVM classifier. The confusion matrix of the cubic SVM classifier for seven movements is given in Figure 7. Table 10 presents a range of additional classification parameters calculated for these seven movements.

Table 9. The highest classification accuracy rates obtained based on seven movements for each IMF

EMD Method	Performance Comparison of Classifiers			
	Classifiers and Accuracy Rate (%)			
IMF Values	DT (fine)	SVM (cubic)	KNN (fine)	Ensemble (bagged tree)
1-4	**83,8**	**91,7**	**59,8**	**88**
2-4	83,3	90,2	**84**	86,9
3-6	83,6	8,5	83,6	86,7
4-8	75,5	78,3	75,2	76,4

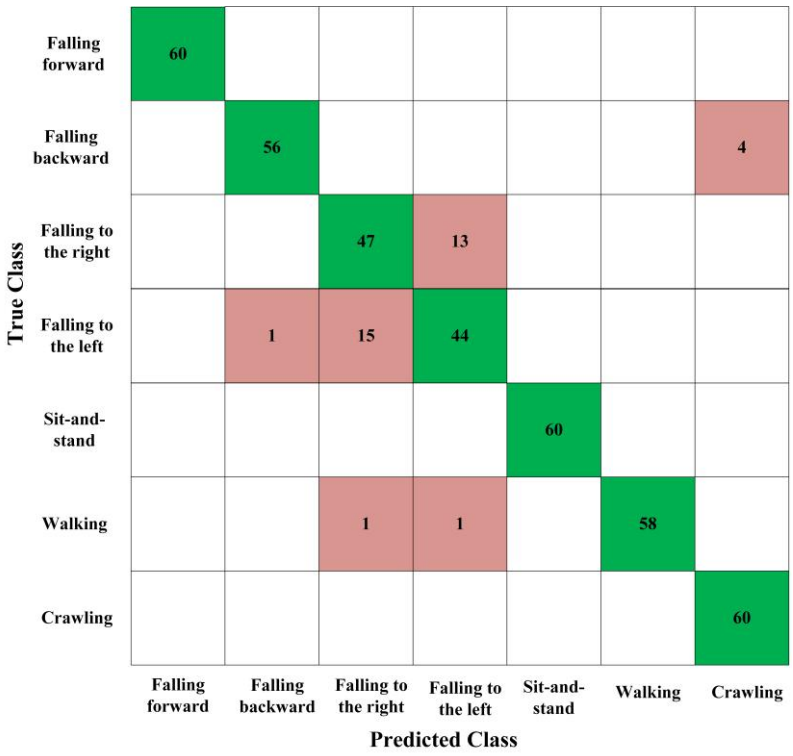


Figure 7. Confusion matrix for cubic SVM algorithm for seven movements

Table 10. Other classification metrics for cubic SVM algorithm to IMF 1-4

Classification Metrics	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
Falling forward	100	100	100
Falling backward	96,6	93,3	94,9
Falling to the right	74,6	78,3	76,4
Falling to the left	77,2	73,3	75,2
Sit-and-stand	100	100	100
Walking	100	96,7	98,3
Crawling	93,8	100	96,8

As Figure 7 illustrates, the classification of 'falling forward', 'sit-and-stand', and crawling has been conducted without any errors. Conversely, the accuracy rate of the algorithm is diminished by the incorporation of falling to the right and falling to the left results for merely two data. In the case of backward falls, the algorithm has been misclassified in four data. The data about falling backward has been interpreted as crawling data. The main reason for the decrease in accuracy and other parameters is that falling to the right and falling to the left are confused with each other. It is thought that the main problem underlying this situation is due to the radar structure.

4. Conclusion

The number of individuals living alone, particularly the elderly, is increasing daily. In this context, the accident with the most serious consequences for the elderly is falling. In this study, radar-based fall detection is discussed. In the study carried out in a home environment, various fall and daily activity scenarios are considered and necessary measurement studies are carried out. The obtained data are decomposed into IMFs using the EMD method. Depending on the radar structure, the IMFs of I and Q signals are combined and complexities. Subsequently, PSDs are calculated using the Welch method. The PSDs, which are highly specific for each motion, are directly used as features in the classification of fall detection.

A range of derivatives of conventional machine learning methods have been favored for classification. In the study, the effect of IMFs in the context of fall classification is presented. In particular, the effect of IMFs numbered 2 and 3 on falling detection is revealed. The present study successfully achieves error-free fall classification. With this motivation, the classification of seven movements is also made and activities are classified with the proposed method with an accuracy rate of 91.7%. It is thought that the biggest disadvantage in achieving this rate is the difficulty of distinguishing right and left falls with the relevant equipment. It is revealed with the method we propose that traditional machine learning is still quite effective, practical and solution-oriented.

References

[1] United Nations. 2024. World Population Prospects. https://desapublications.un.org/publications/world-population-prospects-2024-summary-results (Access date: 13.01.2025).

[2] Kılıç, D., Ata, G., Hendekci, A. 2021. Yaşlılık döneminin önemli sağlık sorunlarından biri: düşme ve düşmeyi etkileyen faktörler. Acıbadem Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 12(2), 517-523.

[3] Kızılkaya, N., Saka, S. 2022. GERİATRİK BİREYLERDE POLİFARMASİ VE KARDİYAK RİSK FAKTÖRLERİNİN DENGE, DÜŞME VE FONKSİYONEL BAĞIMSIZLIĞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ. Sağlık Bilimleri Dergisi, 31(2), 198-203.

[4] World Health Organization. 2021. Falls. https: //www.who.int/news-room/fact-sheets/ detail/falls (Access date: 15.01.2025).

[5] Noury N, Fleury A, Rumeau P, Bourke AK, Laighin GO, Rialle V, Lundy JE. 2007. Fall detection principles and methods. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, August 22-26, Lyon, France, 1663‑1666.

[6] Kwolek, B., Kepski, M. 2014. Human fall detection on embedded platform using depth maps and wireless accelerometer. Computer methods and programs in biomedicine, 117(3), 489-501.

[7] Giansanti, D., Maccioni, G., Macellari, V. 2005. The development and test of a device for the reconstruction of 3-D position and orientation by means of a kinematic sensor assembly with rate gyroscopes and accelerometers. IEEE transactions on biomedical engineering, *52*(7), 1271-1277.

[8] De Araujo, I. L., Dourado, L., Fernandes, L., Andrade, R. M. D. C., Aguilar, P. A. C. 2018. An algorithm for fall detection using data from smartwatch. In *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE),* June 19-22, Paris, France, 124-131.

[9] Abbate, S., Avvenuti, M., Bonatesta, F., Cola, G., Corsini, P., Vecchio, A. 2012. A smartphone-based fall detection system. Pervasive and Mobile Computing, 8(6), 883-899.

[10] Rougier, C., Meunier, J., St-Arnaud, A., & Rousseau, J. 2011. Robust video surveillance for fall detection based on human shape deformation. IEEE Transactions on circuits and systems for video Technology, 21(5), 611-622.

[11] Cucchiara, R., Prati, A., Vezzani, R. 2007. A multi-camera vision system for fall detection and alarm generation. *Expert Systems*, 24(5), 334-345.

[12] De Miguel, K., Brunete, A., Hernando, M., & Gambao, E. 2017. Home camera-based fall detection system for the elderly. Sensors, 17(12), 2864.

[13] Li, Y., Ho, K. C., Popescu, M. 2012. A microphone array system for automatic fall detection. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(5), 1291-1301.

[14] Frøvik, N., Malekzai, B. A., Øvsthus, K. 2021. Utilising LiDAR for fall detection. Healthcare Technology Letters, 8(1), 11-17.

[15] Seflek, I., Acar, Y. E., Yaldiz, E. 2020. Small motion detection and non-contact vital signs monitoring with continuous wave doppler radars. Elektronika ir elektrotechnika, 26(3), 54-60.

[16] Islam, S. M. M., Borić-Lubecke, O., Zheng, Y., Lubecke, V. M. 2020. Radar-based non-contact continuous identity authentication. Remote Sensing, 12(14), 2279.

[17] Wang, C., Zhu, D., Sun, L., Han, C., Guo, J. 2023. Real-time through-wall multihuman localization and behavior recognition based on MIMO radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61, 1-12.

[18] Baboli, M., Singh, A., Soll, B., Boric-Lubecke, O., Lubecke, V. M. 2019. Wireless sleep apnea detection using continuous wave quadrature Doppler radar. IEEE Sensors Journal, 20(1), 538-545.

[19] Acar, Y. E., SARITAŞ, İ., Yaldiz, E. 2022. Comparison of ML algorithms to distinguish between human or human-like targets using the HOG features of range-time and range-Doppler images in through-the-wall applications. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 30(6), 2086-2096.

[20] Liu, L., Popescu, M., Skubic, M., Rantz, M., Yardibi, T., & Cuddihy, P. 2011. Automatic fall detection based on Doppler radar motion signature. In 2011 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth) and Workshops, May 23-26, Dublin, Ireland 222-225.

[21] Liu, L., Popescu, M., Rantz, M., Skubic, M. 2012. Fall detection using doppler radar and classifier fusion. In Proceedings of 2012 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics , January 2-7, Hong Kong, China 180-183.

[22] Su, B. Y., Ho, K. C., Rantz, M. J., Skubic, M. 2014. Doppler radar fall activity detection using the wavelet transform. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 62(3), 865-875.

[23] Jokanovic, B., Amin, M. G., Zhang, Y. D., Ahmad, F. 2015. Multi-window time–frequency signature reconstruction from undersampled continuous-wave radar measurements for fall detection. IET Radar, Sonar & Navigation, 9(2), 173-183.

[24] Anishchenko, L., Zhuravlev, A., Chizh, M. 2019. Fall detection using multiple bioradars and convolutional neural networks. Sensors, 19(24), 5569.

[25] Sadreazami, H., Bolic, M., Rajan, S. 2021. Contactless fall detection using time-frequency analysis and convolutional neural networks. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(10), 6842-6851.
[26] Zheng, P., Zhang, A., Chen, J., Li, Q., Yang, M. 2024. Real-time fall recognition using a lightweight convolution neural network based on millimeter-wave radar. IEEE Sensors Journal, *24*(5), 7185-7195.
[27] Ding, C., Zhang, L., Chen, H., Hong, H., Zhu, X.,Fioranelli, F. 2023. Sparsity-based human activity recognition with PointNet using a portable FMCW radar. IEEE Internet of Things Journal, 10(11), 10024-10037.
[28] Lin, J., Yang, Z., Chu, P., Lian, T., Zhou, J. 2025. Human fall detection based on adaptive local region-duration features using MIMO radar. Measurement Science and Technology. 36, 036114.
[29] Huang, L., Zhu, A., Qian, M., & An, H. (2024). Human fall detection with ultra-wideband radar and adaptive weighted fusion. *Sensors*, *24*(16), 5294.
[30] RFbeam Microwave. 2022. https://rfbeam.ch/wp-content/uploads/dlm_uploads/2022/10/K-LD7_Datasheet.pdf (Access date: 19.01.2025).
[31] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., ... Liu, H. H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London.* Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 454(1971), 903-995.
[32] Solomon Jr, O. M. 1991. PSD computations using Welch's method. NASA STI/Recon Technical Report N, 92, 23584.
[33] Şeflek, I. 2024. A Preliminary Study for Radar-based Fall Detection using Power Spectral Density Features obtained by Welch Method. In 2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), September 21-22, Malatya, Türkiye, 1-5.
[34] Yakut, Ö., Bolat, E. D. 2022. A high-performance arrhythmic heartbeat classification using ensemble learning method and PSD based feature extraction approach. Biocybernetics and Biomedical Engineering, 42(2), 667-680.
[35] Kim, C., Sun, J., Liu, D., Wang, Q., Paek, S. 2018. An effective feature extraction method by power spectral density of EEG signal for 2-class motor imagery-based BCI. Medical & biological engineering & computing, 56, 1645-1658.
[36] Saettler, A., Laber, E., & Pereira, F. D. A. M. 2017. Decision tree classification with bounded number of errors. Information Processing Letters, 127, 27-31.
[37] Cortes, C., Vapnik, V. 1995. Support-vector networks. Machine learning, 20, 273-297.
[38] Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I., Pintelas, P. 2007. Supervised machine learning: A review of classification techniques. Emerging artificial intelligence applications in computer engineering, 160(1), 3-24.
[39] Khan, A. A., Chaudhari, O., & Chandra, R. (2024). A review of ensemble learning and data augmentation models for class imbalanced problems: Combination, implementation and evaluation. Expert Systems with Applications, 244, 122778.
[40] Şeflek, İ. 2024. Radar-based Elderly Fall Detection Using Power Spectral Density Features Obtained by Different Methods. In *2024* 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS), December 6-7, İstanbul, Türkiye, 1-5.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Linyit Sahalarının Çevresel Etkileri: Termik Santral Etkileri Üzerine Bir İnceleme

Müslim Ekinci*[1], Doç. Dr. Şükrü Taner Azgın*[2]

[1]Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye
[2*]Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, Kayseri

(Alınış / Received: 11.03.2025, Kabul / Accepted: 16.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Linyit Madenciliği,
Termik Santral,
Hava Kirliliği,
Çevresel Gürültü,
Su Kirliliği,
Maden Drenaj Suyu

Öz: Termik santraller, yerli yakıt kullanımıyla elektrik üretiminde önemli bir rol oynamakta olup, bu santrallerin doğrudan çevresel etkilerinin yanı sıra, yakıt olarak kullanılan kömürün üretim süreçleri de ciddi çevresel baskılara neden olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde açık ocak yöntemiyle işletilen bir linyit maden ocağının çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Araştırma, madene yakın iki yerleşim yerinde hava kalitesi (PM_{10}, $PM_{2.5}$, nem, sıcaklık, rüzgâr hızı ve yönü) ile gürültü (dBA) ölçümlerini içermektedir. Ayrıca, maden drenaj sularındaki çevresel parametreler (pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen, askıda katı madde (AKM), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), yağ-gres, fenol, sülfat, arsenik, bakır, demir, cıva, çinko, kadmiyum, krom (+6), kurşun, nikel ve toplam siyanür) aylık olarak izlenmiştir. Çeşitli çevresel parametreler üzerinde yapılan kapsamlı analizler, araştırmanın temelini oluşturmuş, ancak bu özetin sınırları nedeniyle yalnızca en önemli bulgulara yer verilmiştir. Hava kalitesi ölçüm sonuçlarına göre, A köyünde PM_{10} konsantrasyonunun altı yıllık ortalama değeri 16,92 $\mu g/m^3$, B köyünde ise 25,37 $\mu g/m^3$ olarak bulunmuştur. Yıllık değişimler incelendiğinde, 2017–2018 yıllarında PM_{10} seviyesinin en yüksek olduğu ve A köyünde dört, B köyünde ise 33 kez sınır değerin aşıldığı tespit edilmiştir. Maden drenaj suyu analiz sonuçlarına göre askıda katı madde parametresinin bir kez, sülfat parametresinin ise yedi kez sınır değeri aştığı gözlemlenmiş; demir konsantrasyonunda ise dalgalanmalara rağmen sınır değerin aşılmadığı belirlenmiştir. Gürültü seviyelerinin özellikle Nisan ayında önemli dalgalanmalar gösterdiği, bunun yağmur gibi olumsuz hava koşullarının etkisiyle elektronik cihazları koruyan sundurmaya çarpan damlaların oluşturduğu seslerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu bulgular, linyit madenciliği ve termik santral faaliyetlerinin çevresel etkilerini etkili bir şekilde yönetebilmek için stratejik önlemlerin alınmasının önemini vurgulamaktadır. Araştırmanın sonuçları, çevresel riskleri azaltmaya yönelik politikaların geliştirilmesi ve uygulamaların güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, açık ocak linyit madenciliğinin yakın yerleşim alanları üzerindeki uzun dönemli ve çok yönlü çevresel etkilerinin değerlendirilmesi bakımından önemli bir yere sahiptir.

Environmental Impacts of Lignite Mines: A Thermal Power Plant Perspective

Keywords
Thermal Power Plant,
Lignite Mining,
Air Pollution,
Environmental Noise,
Water Pollution,
Mining Drainage Waters

Abstract: Thermal power plants play a crucial role in electricity generation using domestic fuel sources. In addition to their direct environmental impacts, the coal extraction process also contributes to various environmental pressures. This study evaluates the environmental impacts of a lignite mine operating with an open-pit method in Turkey's Central Anatolia Region. Within the scope of the research, air quality (PM_{10}, $PM_{2.5}$, humidity, temperature, wind speed, and wind direction) and noise (dBA) measurements were conducted in two settlements near the mine. Additionally, monthly monitoring of mine drainage water was performed for parameters including pH, temperature, dissolved oxygen, suspended solids,

biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), oil and grease, phenol, sulfate, arsenic, copper, iron, mercury, zinc, cadmium, chromium (+6), lead, nickel, and total cyanide. The air quality analysis revealed that the six-year average PM_{10} concentration was 16.92 μg/m^3 in Village A and 25.37 μg/m^3 in Village B. Examining annual variations, PM_{10} levels exceeded the limit values four times in Village A and 33 times in Village B during 2017-2018, the period with the highest recorded concentrations. The mine drainage water analysis indicated that suspended solids exceeded the limit once, while sulfate concentrations exceeded the threshold seven times. Although iron levels remained within regulatory limits, significant fluctuations were observed. Furthermore, noise levels exhibited noticeable variations, particularly during April. These findings emphasize the importance of implementing strategic measures to mitigate the environmental impacts of lignite mining. This study has an important role in assessing the long-term and multifaceted environmental impacts of open-pit lignite mining on nearby settlements.

---

*İlgili Yazar, email: stazgin@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacı, küresel ölçekte hızla artış göstermektedir. Ekonomik ve sosyal hayatın temel dinamiklerinden biri olan enerji, bireysel ve toplumsal yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Nüfus artışı, sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda enerjiye duyulan gereksinim giderek artmakta ve enerji politikalarının sürdürülebilir bir çerçevede ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Enerji kaynakları incelendiğinde, petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtların birincil enerji arzındaki önemini koruduğu görülmektedir [1]. Giderek artan enerji ihtiyacını karşılamak ve dışa bağımlılığı azaltmak için son yıllarda yerli yakıt kullanan termik santrallerin yapımına hız verilmiştir [2]. Enerji üretim süreçlerinde verimlilik, hammaddeye erişim kolaylığı ve mevcut altyapı dikkate alındığında, fosil yakıtların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. 1998 verilerine göre kömür rezervlerinin ömrü, petrol ve doğal gaz rezervlerinin yaklaşık 3,4 katı olup [3] bu durum kömürün enerji arzında stratejik bir konumda olmasını sağlamaktadır. Türkiye, dünya ölçeğinde gerek rezerv gerekse üretim miktarı bakımından linyitte orta düzeyde yer almaktadır [4]. Türkiye'de yaklaşık 19 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır [5]. Artan enerji talebi, teknik altyapısının gelişmiş olması, kurulumunun görece kolaylığı ve hammaddeye yakınlığı gibi avantajlar nedeniyle fosil yakıtlı termik santrallerin öncelikli enerji üretim seçenekleri arasında yer aldığını göstermektedir. Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamak ve enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, yerli kaynaklara dayalı bir enerji politikasının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, maliyet ve kaynak erişilebilirliği açısından avantajlı olması sebebiyle kömür yakıtlı termik santrallerin önümüzdeki yıllarda da enerji üretiminde kritik bir rol üstlenmeye devam edeceği öngörülmektedir.

Türkiye'de taş kömürü tüketiminde elektrik santrallerinin payı giderek artmaktadır. On yıl önce %20 seviyelerinde olan bu oran, 2018 yılı itibariyle %60'lara yaklaşmıştır. Ülkemizde üretilen linyit kömürleri; elektrik üretimi, sanayi ve ısınma gibi çeşitli alanlarda tüketilmektedir. Linyitin elektrik üretimindeki tüketim payı, 1970'li yılların başında ısıl değer bazında %20'ler düzeyindeyken, bu tarihten itibaren artmaya başlamış ve 2001 yılında %80 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır [6].

Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) Raporuna göre 2018 yılı dünya genelinde linyit tüketimi toplam 803,2 milyon ton, Türkiye'nin linyit tüketimi ise 85,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir [6]. Günümüzde dünya maden üretiminin yaklaşık %70'i açık ocak işletmeciliği yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Metalik cevherlerin yarısı, kömürün üçte biri ve metal dışı yapı malzemelerinin tamamı açık ocak işletmeciliği ile üretilmektedir [7]. Bu veriler doğrultusunda, Türkiye'de yıllık yaklaşık 28 milyon ton kömür üretiminin açık ocak işletmeciliği yöntemiyle gerçekleştirildiği söylenebilir.

(Perinçel, 2000) çalışmalarında; sanayi ve çevre ilişkisi bağlamında kömürle çalışan termik santrallerin çevresel etkilerini ele almış ve Çatalağzı Termik Santrali'nin çevresel etkilerini incelemiştir. Çalışmada, santralin çevresel etkilerinin en fazla hissedildiği birimler ve kül atık alanlarına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Uygulama aşamasında, denizden 14 farklı noktadan su örnekleri alınmış, ayrıca bacadan yayılan uçucu küller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen örnekler, Erdemir laboratuvarlarında analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiş ve örnek alma-saklama süreçlerine ilişkin genel hususlar açıklanmıştır [8].

(Ertuğrul, 2010) çalışmalarında; madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri ve doğa onarım süreçleri Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanılarak belirlenmiş ve modellenmiştir. Madencilik faaliyetlerinin gerek işletme sürecinde gerekse sonrasında hem fiziksel hem de hukuksal açıdan önemli çevresel etkiler yarattığı vurgulanmış; bu bağlamda doğa onarım çalışmalarının gerekliliğine dikkat çekilmiştir. Uzaktan algılama teknolojilerinin kullanıldığı çalışmada, doğa onarım süreçlerinin etkinliğini artırmaya yönelik yöntemler geliştirilmiş ve arazi kullanımına ilişkin en uygun uygulama yöntemleri belirlenmiştir [9].

(Delibalta vd, 2016) çalışmalarında; TKİ–GLİ Ilgın Linyit İşletmeleri'ne ait beş farklı gölette asit maden drenajı (AMD) ve rehabilitasyon süreçleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, su karakterizasyonu izlenmiş ve göletlerdeki ortalama pH değerleri 6,49–7,81 arasında değişirken, bulanıklık 0,12-63,6 NTU, sülfat içeriği 0,05-2,67 mg SO_4/L, kimyasal oksijen ihtiyacı 4-136 mg O_2/L ve elektriksel iletkenlik 285 µS/cm-4,68 mS/cm arasında ölçülmüştür. Ayrıca, en yüksek ağır metal içerikleri 1839 ppb Mn ve 9777 ppb Fe olarak tespit edilmiştir. Analizler üç aylık periyotlarla gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular yasal düzenlemeler çerçevesinde değerlendirilmiştir [10].

(Çelik, 2018) çalışmalarında; açık maden ocaklarında oluşan toz emisyonlarının ekolojik etkileri ele alınmış ve bu emisyonların kontrol altına alınmasına yönelik yöntemler incelenmiştir. Çalışmada, açık maden ocaklarının işletilmesi sürecinde atmosfere yayılan toz emisyonlarının insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiş, hava kirliliğinden kaynaklanan tehlikelerin önlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Ayrıca, toz emisyonlarının kaynakları belirlenerek, bu etkilerin azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirilmiştir [11].

(Drebenstedt vd, 2019) çalışmalarında; Almanya'daki linyit madenlerinde asit maden drenajının su kalitesine olan olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada, AMD'nin olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla geliştirilen yeni bir yöntemin başarılı bir şekilde uygulandığı vurgulanmıştır. Önerilen çözüm yöntemleri arasında asidik bileşenleri tamponlayacak malzemeler ile birleştirme veya asit üreten materyallerin oksijenle temasını kesme stratejileri yer almaktadır [12].

(Ercan vd, 2020) çalışmalarında; Bolu Göynük bölgesinde faaliyet gösteren linyit yakıtlı termik santralin çevresel etkilerini izlemek amacıyla yapılan çalışmada 2013-2019 yılları arasında dört ayrı noktada PM_{10} ve biriken toz parametreleri aylık olarak izlenmiştir. Çalışma sonucunda ortalama PM_{10} ölçümleri 36,48 ± 0,73; 37,61 ± 0,75; 42,70 ± 0,85 ve 38,72 ± 0,77 µg/m3 olarak elde edilmiş, çöken tozun ortalama değerleri 70,81 ± 2,12; 35,55 ± 1,07; 79,50 ± 2,39 ve 29,38 ± 0,88 mg/m^2/gün olarak bulunmuştur. Faaliyet sonucu oluşan toz emisyonlarının meteorolojik koşullara göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. [13]

(Wang vd, 2022) çalışmalarında; Suzhou güney kömür madenciliği alanında ağır metal kirliliği üzerine yapılan çalışmada, AS, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb ve Zn elementleri analiz edilmiştir. İçerik sıralaması Fe > Mn > Cr > Cu > Pb > Zn > As şeklinde tespit edilmiş olup Fe oranını %43 olarak kaydetmişlerdir. Bölgede Fe, Mn ve Cr elementinin yakından izlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. [14]

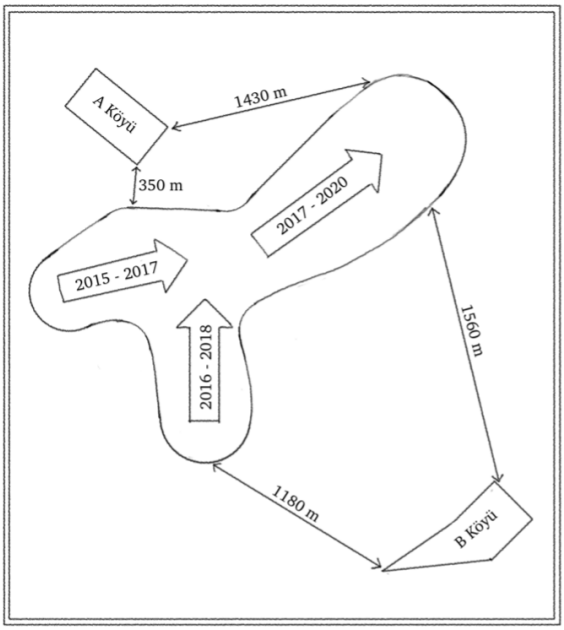
Yapılan literatür değerlendirmesi sonucunda çalışmaların genel olarak şu konular etrafında yoğunlaştığı görülmüştür: Termik santrallerin neden olduğu çevresel etkiler, bu olumsuz etkilerin insan sağlığı üzerindeki bozucu sonuçları, toz emisyonlarının ekosistem üzerindeki etkileri, maden zenginleştirme süreçlerinin çevresel boyutları, atık oluşumunun ekolojik sonuçları, madencilik faaliyetlerinin yüzey sularına etkileri, madenciliğin çalışanlar üzerindeki sağlık ve güvenlik riskleri, kömür madenciliğinde asit maden drenajı sorunu ve madencilik faaliyetlerinin toplum algısı üzerindeki etkileri.

Bu çalışmada literatürdeki önceki yapılan araştırmalardan farklı olarak, açık ocak yöntemi ile işletilen ve İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan bir termik santrale ait linyit üretim sahasının yakınındaki yerleşim yerleri üzerinde yarattığı çevresel etkiler 2015-2020 dönemini kapsayacak şekilde yerinde aylık bazda tespit edilmiştir. Hava kalitesi değerlendirmesi kapsamında çöken toz ve partikül madde fraksiyonları (PM_{10} ve $PM_{2.5}$), gürültü seviyeleri; ortalama desibel değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Ayrıca meteorolojik veriler; sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü parametreleri çerçevesinde incelenmiştir.

Bunlara ek olarak, aynı döneme ait maden sahasında etkileşim halinde bulunan yüzeysel ve yeraltı sularının kalite değişimi de 19 farklı fizikokimyasal parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda maden sahasının neden olduğu çevresel etkiler, yürürlükteki mevzuat sınır değerleri çerçevesinde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yasal gereklilikleri yerine getiren bir maden sahasında uygulanan çevresel önlemlerin etkinliğini değerlendirmek açsından önemli bir katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma alanı, İç Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, deniz seviyesinden yüksekliği 1200 m ile 1600 m arasında değişen, toplam 2200 hektarlık bir linyit havzasını kapsamaktadır. Sahada, yılda tam kapasiteyle gerçekleştirilen kömür ve üst örtü toprağının hareket hacmi 10 milyon m^3 ile 15 milyon m^3 arasında değişim göstermektedir. Kazılan kömürün nem içeriği %46 seviyesindedir. Açık ocak madenciliği, haftanın her günü üç vardiya halinde, patlatma yapılmadan basamak oluşturularak yürütülmektedir. Şekil 1'de çalışma sahasının genel görünümüne dair pafta sunulmaktadır.



Şekil 1. Kazı Alanı ve Yerleşim Alanlarına Uzaklıklar

2015 ve 2016 yıllarında çalışmalar, yarım kapasiteyle yürütülmüş olup, 2017 yılından itibaren tam kapasiteye (10 milyon m^3 - 15 milyon m^3) ulaşılmıştır. Çalışmalar, kazıcı ve damperli kamyonlarla kazı-yükleme-boşaltma sistemi ile yürütülmüştür. Maden sahasında üst örtü kazısı ve maden kazısı çalışmaları eş zamanlı olarak yapılmış, çıkarılan kömür damperli kamyonlarla kömür kırma ünitelerine taşınmıştır. Ardından kömür, 2 km uzunluğundaki bant konveyör sistemi ile sahanın kuzey doğusunda yer alan termik santrale sevk edilmiştir. Kırma ve mekanik transfer sırasında oluşan tozun çevreye yayılımı kapalı muhafaza sistemleri ile büyük ölçüde kontrol altına alınmıştır. Ayrıca, Çalışma süresi boyunca sevk ve nakliye yollarının tozumasını önlemek amacıyla su tankerleri ile düzenli nemlendirme işlemi yapılmıştır. Yürürlükteki mevzuat gereklilikleri doğrultusunda çalışma sahasında gerekli diğer çevresel önlemler de alınmıştır. 2015 ve 2016 yıllarında yapılan kazı çalışmalarına ait bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. 2015 ve 2016 Yıllarına Ait Aylık Kazı Miktarları

	Üst Örtü (m^3)	Kömür (m^3)	Üst Örtü (m^3)	Kömür (m^3)
	2015		**2016**	
Ocak	123.837	1.094	178.142	86.260
Şubat	52.434	80.769	219.322	103.186
Mart	126.574	35.439	292.698	112.879
Nisan	165.915	7.251	308.233	115.520
Mayıs	194.490	27.104	447.639	57.399
Haziran	247.293	28.457	394.391	101.764
Temmuz	323.895	58.251	263.721	38.749
Ağustos	311.409	58.454	77.035	256.306
Eylül	325.286	18.452	106.220	239.324
Ekim	250.321	56.345	65.011	349.776
Kasım	236.188	115.412	172.916	343.596
Aralık	215.951	228.304	84.497	297.483

Hava kalitesi ve gürültü ölçümleri, nüfusları sırasıyla 582 ve 243 olan A ve B Köylerinde yapılmıştır. A Köyü çalışma sahasının kuzeybatısında, B Köyü ise güneydoğusunda yer almaktadır. Ölçüm cihazları, söz konusu yerleşim yerlerinin içinde kalacak şekilde, çalışma sahasına yakın noktalarına yerleştirilmiştir. Çalışma sahasının A Köyü'ne

uzaklığı 350 m ile 1430 m arasında değişirken, B Köyü'nün çalışma sahasına uzaklığı ise 1180 m ile 1560 m arasında değişmektedir.

2.1. Hava Kalitesi Ölçümleri

Toz emisyonları fiziksel ve içerik olarak çevreye zararlı olmakla birlikte $PM_{2.5}$ ve PM_{10} partiküller akciğere kolaylıkla ulaşabildiğinden dolayı tespiti ayrıca önem taşımaktadır [15]. Hava kalitesi ölçümleri; partikül madde, çöken toz ve meteorolojik verilerinin izlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ölçümler 2015-2020 yıllarını kapsayacak şekilde A ve B Köylerinde sabit noktalarda yapılmıştır.

Partikül madde (PM_{10} ve $PM_{2.5}$) ve meteorolojik (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü) ölçümleri, Topas – Turnkey marka online olarak sürekli veri akışı sağlayabilen cihazlarla yapılmıştır. Ölçüm verileri; Partikül madde için $\mu g/m^3$, sıcaklık için (^oC), nem için (%), rüzgâr hızı için (m/s), rüzgâr yönü için (derece) birimleriyle kaydedilmiştir. Veriler 10 dakikalık periyotlarla toplanmış ve bu çalışmada, elde edilen verilerin günlük ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir.

Çöken toz ölçümleri; TS 2342 standardına uygun olarak akredite laboratuvarlar aracılığıyla aylık periyotlarla mg/m^2.gün birimiyle raporlanmıştır.

2.2. Gürültü Kirliliği Ölçümleri

Gürültü ölçümleri, 2015-2020 yıllarını arasında A ve B Köylerinde sabit noktalarda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sürecinde çevresel gürültü seviyelerinin sürekli izlenmesi amacıyla SvanTek – SV200 marka, online olarak sürekli veri akışı sağlayabilen cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz, gerçek zamanlı veri iletimi sağlayarak, ölçümlerin doğruluğunu ve sürekliliğini temin etmiştir. Ölçüm verileri bir saatlik periyotlarla (dBA_{eq}) birimiyle kaydedilmiş ve bu veriler daha sonra analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen veriler, çevre gürültüsünün zaman içindeki değişimini belirlemek amacıyla günlük ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmada yüksek sese maruz kalındığı için 10 kişiden birinde normal konuşmayı anlayamayacak düzeyde gürültü kaybı yaşandığı bulunmuştur [16]. Bu nedenle yapılan çalışmada, gürültü kirliliğinin seviyelerini anlamak ve yerleşim yerlerindeki yaşam kalitesine olan etkilerini incelemek için kritik bir öneme sahiptir. Gürültü seviyelerinin izlenmesi, çevresel yönetim planları ve halk sağlığı önlemleri için temel veriler sunmaktadır.

2.3. Maden Drenaj Suyu Ölçümleri

Açık ocak ve yeraltı madenciliğinde kazılar su tablasının altına kadar uzandığından dolayı genellikle susuzlaştırma gerekliliği ortaya çıkmaktadır [17]. Bu çalışmada maden drenaj suyunun ölçümleri, 2015-2020 yılları arasında madencilik faaliyetlerinden kaynaklı ortaya çıkan drenaj sularının analiz edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Numune alma ve analiz işlemleri, çevresel su kalitesine ilişkin standartlara uygun akredite laboratuvarlar tarafından yürütülmüştür. Drenaj işlemleri, 2016 yılı Ağustos ayına kadar sondaj kuyuları aracılığıyla başlatılmış olup, kazı faaliyetlerinin ilerlemesiyle birlikte maden sahasına giren yeraltı ve yüzey sularının pompalar yardımıyla tahliye edilmesiyle devam etmiştir.

Maden çukuruna giren yeraltı ve yüzey sularının kontrol altına alınması amacıyla maden basamaklarında doğal toplama ve iletim kanalları oluşturulmuş ve bu kanallar aracılığıyla gelen sular maden çukurunun dip noktalarında oluşturulan 2-3 kademeleri doğal havuzlarda biriktirilmiştir. Biriken sular, havuzlarda bulunan pompaları aracılığıyla sürekli olarak maden sahasının dışına tahliye edilmiştir. Mevsimsel şartlara bağlı olarak drenaj debisinde belirgin değişimler gözlenmiş olup, bu değişimler, özellikle yağışlı dönemlerde suyun debisinin arttığı ve kuru dönemlerde azaldığı yönünde bir eğilim gözlenmiştir. Drenaj suyundan numune süreci, bu değişimlerin izlenmesini sağlamak amacıyla dikkatle yapılmış ve görsel olarak Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Maden Drenaj Suyundan Numune Alma

Maden drenaj suyu ölçümleri, akredite laboratuvarlar aracılığıyla aylık periyotlarla pompa borularının çıkış noktasından anlık numuneler alınarak Tablo 2'de yer alan analiz metotlarıyla analizleri yapılmış ve aylık olarak raporlanmıştır.

Tablo 2. Maden Drenaj Suyu Analiz Metotları

PARAMETRE	**ANALİZ METODU**
pH	S.M. 4500-H+B
SICAKLIK	S.M. 2550-B
ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN	S.M. 4500-O_G
ASKIDA KATI MADDE	S.M. 2540-D
BOİ	S.M. 5210-B
KOİ	SM 5220 B
YAĞ VE GRES	SM 5520 B
ARSENİK	EPA 200.7
BAKIR	EPA 200.7
CİVA	EPA 200.7
ÇİNKO	EPA 200.7
DEMİR	EPA 200.7
FENOL	SM 5530 (B-C)
KADMİYUM	EPA 200.7
KROM (+6)	S.M. 3500-Cr-B
KURŞUN	EPA 200.7
NİKEL	EPA 200.7
SÜLFAT	S.M. 4110-B
TOPLAM SİYANÜR	SM 4500-CN C B SM 4500-CN E

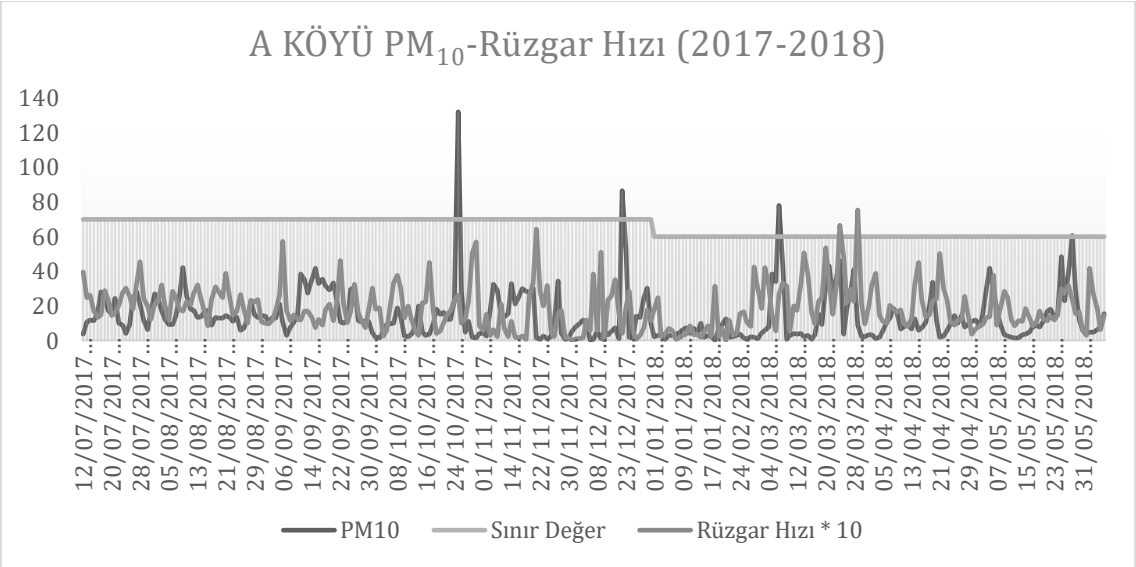
3. Bulgular

3.1 Hava Kalitesi

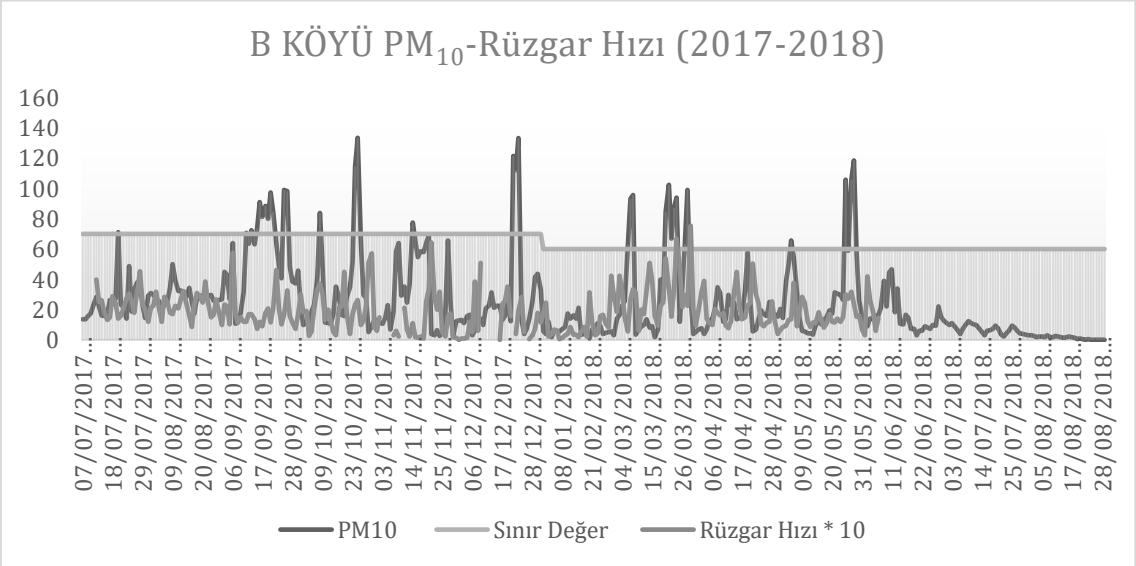
Hava kalitesi ölçümlerine ilişkin yapılan değerlendirmelerde, $PM_{2.5}$ değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmezken, PM_{10} değerlerinin her iki yerleşim yerlerinde genellikle 20-60 µg/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. A Köyü'nde 2015 yılının Mayıs ayındaki PM_{10} ortalaması 49,24 µg/m³ ile en yüksek değer olarak, 2018 yılının Şubat ayında 2,51 µg/m³ ile en düşük değer olarak kaydedilmiştir.

B köyünde ise 2017 yılının Eylül ayında PM_{10} ortalaması 60,56 µg/m³ ile en yüksek seviyeye ulaşırken, 2019 yılının Kasım ayında 1,19 µg/m³ ile en düşük seviyelere gerilemiştir. A ve B Köylerine ait rüzgâr hızı, PM_{10} değerleri ve

bu değerlerin sınır limitlerle karşılaştırmalı değişimi, 2017 ve 2018 yıllarındaki zaman içindeki farklılıkları gösteren grafikler sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur.

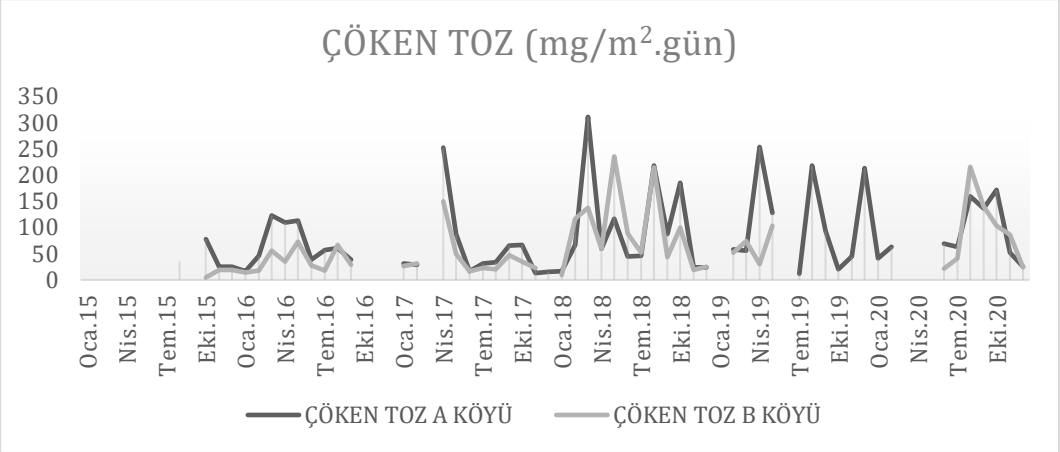


Şekil 3. A Köyü 2017-2018 Yıllarına Ait PM_{10}-Rüzgâr Hızı Ortalamaları



Şekil 4. B Köyü 2017-2018 Yıllarına Ait PM_{10}-Rüzgâr Hızı Ortalamaları

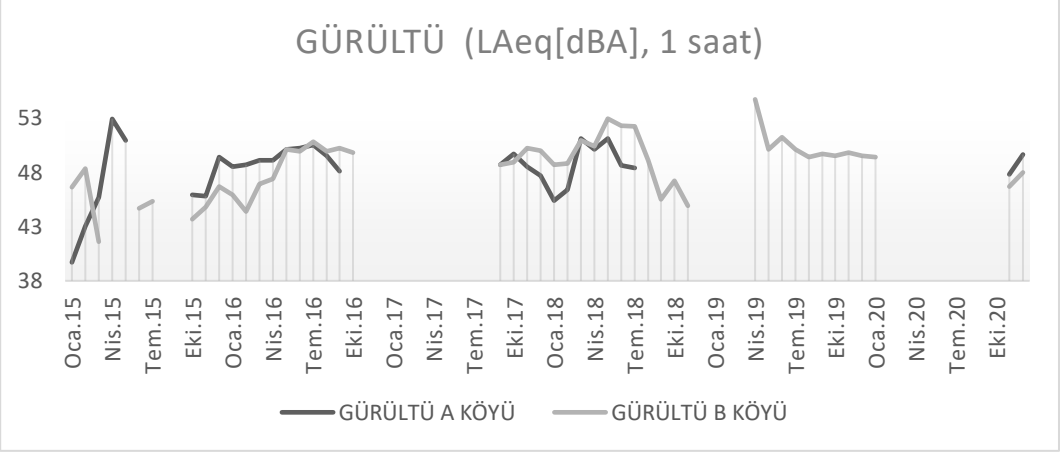
A Köyü'nde 2015-2020 yılları arasındaki çöken toz ölçümleri 11,59 mg/m².gün ile 310,9 mg/m².gün arasında değişim göstermiştir. Bu dönem boyunca elde edilen ortalama çöken toz değeri ise 80,46 mg/m².gün olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, özellikle Nisan, Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında çöken toz değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenirken diğer aylarda bu değerlerin daha düşük seviyelerde seyrettiği tespit edilmiştir. A ve B Köylerine ait çöken toz ölçümlerinin 2015-2020 yılları arasındaki zaman içindeki değişimini gösteren grafik Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. A ve B Köylerindeki Aylık Çöken Toz Değerleri

3.2. Gürültü Kirliliği

A ve B köylerinde konumlandırılan gürültü ölçüm cihazlarından elde edilen veriler, 2015-2020 dönemi için değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre özellikle Nisan aylarında ölçüm değerlerinin diğer aylara kıyasla daha yüksek seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu artışın mevsimsel ve çevresel faktörlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. A ve B Köylerine ait gürültü ölçümlerinin 2015-2020 yılları arasındaki zaman içindeki değişimini gösteren grafik Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. A ve B Köylerindeki Aylık Gürültü Değerleri

Yağışlı dönemlere denk gelen artışlar, sınır değerler aşılmasa dahi yağışlar ile gürültü düzeyleri arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. A ve B Köylerinde Ölçülen Temel Çevresel Parametrelerin Karşılaştırmalı Özeti (2015-2020)

Parametre	Birim	A Köyü Ortalaması/Değeri	B Köyü Ortalaması/Değeri	Notlar/Gözlemler
Ortalama PM_{10} Konsantrasyonu (6 Yıllık)	$\mu g/m^3$	16,92	25,37	B Köyü daha yüksek
PM_{10} Sınır Değer Aşım Sayısı (2017-2018)	Kez	4	33	B Köyü'nde aşım çok daha sık
Ortalama Çöken Toz Değeri (2015-2020)	mg/m^2.gün	80,46	60,68	A Köyü değeri daha yüksek (Grafik 5 yorumlanmalı)
Ortalama Gürültü Seviyesi (LAeq, genel aralık)	dBA	[~45-50 aralığı]	[~45-50 aralığı]	Genellikle benzer ve limitlerin altında

Gürültüde Gözlenen Maks. Artış Ayı	-	Nisan	Nisan	Yağışla ilişkili olduğu düşünülüyor
Rüzgâra Bağlı PM_{10} Sınır Aşım Oranı (Yaklaşık)	%	~70	~30	A Köyü rüzgâr taşınımından daha fazla etkileniyor

3.3. Maden Drenaj Suyu

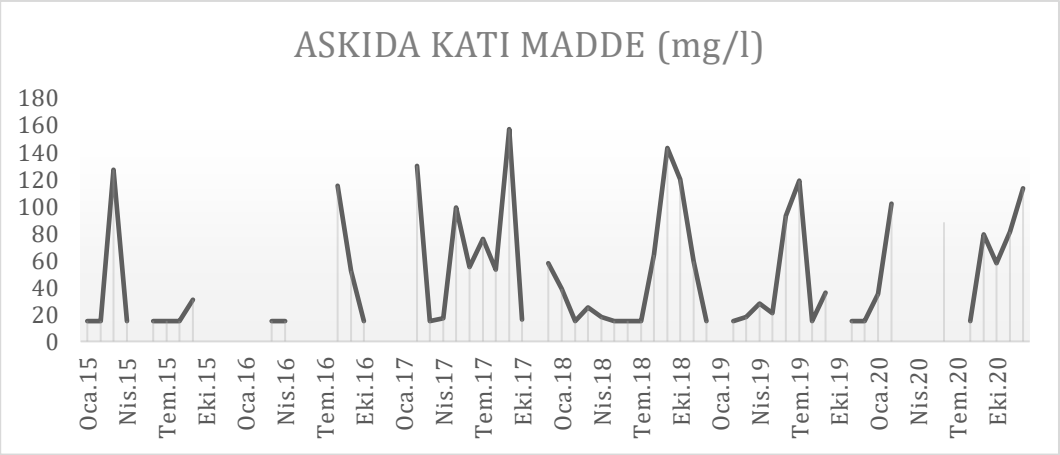
Maden drenaj suyu analiz sonuçlarına bakıldığında, ~~askıda katı madde (~~AKM), demir ve sülfat parametrelerinin belirgin değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu parametrelerin zaman içindeki değişimleri, ilgili grafiklerle desteklenerek daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlanmıştır. Diğer parametrelerin zamanla değişim durumları da dikkate alınarak, her bir parametre sırasıyla ele alınmış ve aşağıdaki paragraflarda detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Maden drenaj suyunun pH değerleri ölçüm dönemi boyunca 6,71 ile 9,15 arasında değişim göstermiştir. Ortalama pH 7,9 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, pH değerinin 3 farklı dönemde 9'un üzerine çıktığı tespit edilmiş olup bu yüksek pH değerlerinin sonbahar aylarında gerçekleştiği belirlenmiştir. Özellikle 2017 yılında pH değerinin ağırlıklı olarak 8 ile 9 arasında seyrettiği, diğer yıllarda ise 7 ile 8 arasında değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, maden drenaj suyunun pH seviyesindeki mevsimsel dalgalanmaların etkisini göstermektedir.

Maden drenaj suyunun sıcaklık değeri, ölçüm dönemi boyunca 0,7°C ile 33°C arasında değişim göstermiştir. Analiz sonuçları, su sıcaklığının mevsimsel hava koşulları ile paralel olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Soğuk mevsimlerde drenaj suyu sıcaklığı düşerken sıcak mevsimlerde artış gözlenmiştir. Bu değişimler, çevresel koşulların drenaj suyu sıcaklığı üzerindeki etkilerini yansıtmaktadır.

Maden drenaj suyundaki çözünmüş oksijen değerleri, ölçüm dönemi boyunca 3,73 mg/l ile 19,4 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama çözünmüş oksijen seviyesi 8,89 mg/l olarak hesaplanmıştır. Veriler incelendiğinde, çözünmüş oksijen seviyelerinin su akış hızının düşük olduğu dönemlerde azaldığı, su akış hızının yüksek olduğu dönemlerde ise arttığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, akış hızının çözünmüş oksijen seviyeleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Su akış hızı arttıkça oksijenin çözünme oranı da artmakta, bunun sonucunda çözünmüş oksijen seviyelerinde bir yükselme gözlemlenmektedir.

Maden drenaj suyundaki ~~askıda katı madde (~~AKM) değerleri, ölçüm dönemi boyunca 15 mg/l ile 157 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama AKM değeri ise 49,53 mg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, AKM seviyelerinin özellikle sonbahar ve ilkbahar aylarında arttığını göstermektedir. Bu artışın yağış rejimi ve yüzey akış miktarındaki değişimlerle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Yağışların yoğun olduğu dönemlerde yüzey akışı artmakta, bu da askıda katı maddelerin miktarını arttırmaktadır. 2015-2020 yılları arasında maden drenaj sularında ölçülen askıda katı madde değerlerinin zaman içindeki değişimini gösteren grafik Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Maden Drenaj Suyundaki Askıda Katı Madde Değerleri

Maden drenaj suyundaki biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) değerleri ölçüm dönemi boyunca 3 mg/l ile 68,5 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama BOİ değeri ise 12,4 mg/l olarak hesaplanmıştır. BOİ değerlerindeki

değişim, maden drenaj suyunun organik yükü hakkında bilgi verir ve yüksek BOİ değerlerinin suyun biyolojik olarak kirlenme eğilimini yansıttığı düşünülmektedir.

Maden drenaj suyundaki kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) değerleri, ölçüm dönemi boyunca 4,44 mg/l ile 185 mg/l arasında değişim göstermiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, KOİ değerinin ağırlıklı olarak 50 mg/l'nin altında seyrettiği ve ortalama değerinin 37,3 mg/l olduğu belirlenmiştir. KOİ, suyun kimyasal oksijen tüketimini gösterir ve bu değerlerin düşük olması, suyun oksijen tüketimi açısından daha az kirletici olduğunu göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki yağ gres değeri, ölçüm dönemi boyunca 3 mg/l ile 8,8 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama yağ gres değeri ise 3,5 mg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, yağ gres değerinin bazı dönemlerde 5 mg/l'nin üzerinde çıktığı gözlemlenmiştir. Yağ gres, genellikle maden tesislerinde kullanılan mekanik araçlar ve pompaların etkisiyle nadiren de olsa tespit edilebilen bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Normal şartlar altında, maden drenaj suyunda bu parametrenin varlığı beklenmeyen bir durumdur.

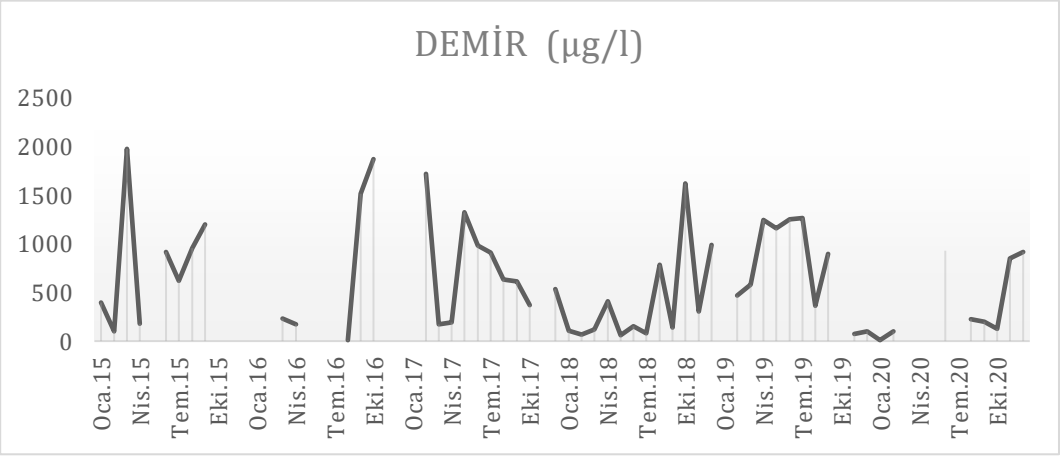
Maden drenaj suyundaki arsenik konsantrasyonları, ölçüm dönemi boyunca 0,2 µg/l ile 50,31 µg/l arasında değişim göstermiştir. Bu iki değer arasındaki farkın da çok yüksek olduğu görülmüştür. Arsenik değerlerinin ortalaması ise 8,18 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ancak yapılan değerlendirmelerde, arsenik değerlerinin çoğunlukla 20 µg/l'nin altında kaldığı tespit edilmiştir. Arsenik, toksik etkileri nedeniyle çevre için önemli bir parametre olup bu seviyelerin çevresel risk oluşturup oluşturmadığı ayrıca incelenmelidir.

Maden drenaj suyundaki bakır konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 1 µg/l ile 25,38 µg/l arasında değişim göstermiştir. Bakır değerlerinin ortalaması ise 3,6 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, bakır konsantrasyonlarının büyük bir kısmının 5 µg/l'nin altında kaldığını göstermektedir. Bu durum, maden drenaj suyundaki bakır kirliliğinin sınırlı olduğunu ve suyun çevresel etkilerinin düşük olabileceğini göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki cıva konsantrasyonlarının ölçüm dönemi boyunca 0,1 µg/l ile 1,74 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması ise 0,18 µg/l olarak hesaplanmıştır. Cıva seviyelerinin üç farklı dönemde 0,5 µg/l'nin üzerine çıktığı, ancak 39 ölçüm sonucunda ise 0,1 µg/l'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Cıva, su ekosistemleri üzerinde zararlı etkilere sahip bir metal olduğundan bu parametrenin düzenli izlenmesi çevresel güvenlik açısından önemlidir.

Maden drenaj suyundaki çinko konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,2 µg/l ile 454 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması ise 106,63 µg/l olarak hesaplanmıştır. Çinko seviyelerinin çoğunlukla 100 µg/l'nin altında kaldığı, ancak bazı dönemlerde bu değerin üzerinde ve hatta 200 µg/l'nin üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Yüksek çinko seviyeleri, su kalitesini olumsuz etkileyebilir ve sucul yaşam için tehdit oluşturabilir. Bu durum, çinko seviyelerinin çevresel düzenlemelere uygunluğunun kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki demir konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 10 µg/l ile 1975 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması ise 625,44 µg/l olarak hesaplanmıştır. Demir seviyelerinin oldukça değişken olduğu, özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında belirgin bir artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu artışlar, maden faaliyetlerinin ve çevresel faktörlerin etkisiyle meydana gelen mevsimsel değişimlerden kaynaklanıyor olabilir. 2015-2020 yılları arasında maden drenaj sularında ölçülen demir değerlerinin zaman içindeki değişimi Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Maden Drenaj Suyundaki Demir Değerleri

Maden drenaj suyunda ölçülen fenol konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,02 mg/l ile 3,4 mg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 0,116 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, fenol değeri yalnızca bir kez 1 mg/l'yi aşmış ancak 46 ölçümde bu değer 0,1 mg/l'nin altında kalmıştır. Bu durum, maden drenaj suyundaki fenol seviyelerinin genellikle düşük seyrettiğini ve çevresel etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

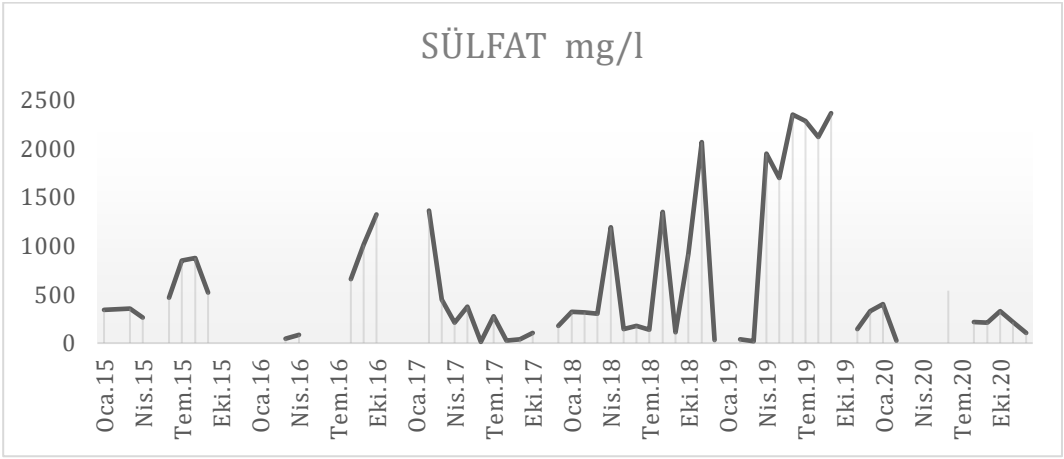
Maden drenaj suyundaki kadmiyum konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,5 µg/l ile 10 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 0,83 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, kadmiyum değerinin yalnızca bir kez 10 µg/l seviyesine ulaştığı ancak 42 ölçümde 0,5 µg/l'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kadmiyum seviyelerinin genellikle düşük olduğunu ve maden drenaj suyunun bu parametre açısından büyük bir kirleticilik göstermediğini işaret etmektedir.

Maden drenaj suyundaki altı değerlikli krom (Cr^{6+}) konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,01 µg/l ile 48,75 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 9,03 µg/l olarak hesaplanmıştır. Özellikle 2015 ile 2017 yılları arasında belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiş, ancak sonraki yıllarda krom seviyeleri daha stabil bir seyir izlemeye başlamıştır. Bu durum, maden faaliyetlerindeki değişimlerin krom konsantrasyonları üzerinde etkili olduğunu düşündürmektedir.

Maden drenaj suyundaki kurşun konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,5 µg/l ile 85,3 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 7,03 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, dört farklı dönemde kurşun seviyelerinin 20 µg/l'nin üzerine çıktığını ancak diğer tüm ölçümlerde bu değerin altında kaldığı göstermektedir. Bu durum, kurşun seviyelerinin zaman zaman yüksek olabileceğini, ancak genellikle çevresel sınırlar içinde kaldığını ortaya koymaktadır.

Maden drenaj suyundaki nikel konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 1,2 µg/l ile 73,84 µg/l arasında değişim göstermiş ve ortalama değeri 11,9 µg/l olarak hesaplanmıştır. Analizler, nikel seviyelerinin büyük çoğunlukla 10 µg/l ve altında kaldığını göstermektedir. Bu durum, maden drenaj suyundaki nikel kirletici seviyelerinin genellikle düşük olduğunu ve çevresel etkilerinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki sülfat konsantrasyonları 12,35 mg/l ile 2362 mg/l arasında büyük bir değişkenlik göstermiştir. Bu geniş aralıktaki sülfat değerlerinin ortalaması 611,5 mg/l olarak hesaplanmıştır. Özellikle 2018 ve 2019 yıllarında sülfat seviyelerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. 2015-2020 yılları arasında maden drenaj sularındaki sülfatın zamanla değişimini gösteren grafikle (Şekil 9) daha ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 9. Maden Drenaj Suyundaki Sülfat Değerleri

Maden drenaj suyundaki toplam siyanür konsantrasyonlarının 0,01 mg/l'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Hava kalitesi ölçüm sonuçlarına göre PM_{10} parametresi A köyü için 6 yıllık ortalama 16,92 µg/m^3, B köyü için ise 25,37 µg/m^3 olarak belirlenmiştir. Yıllar içindeki değişimler incelendiğinde, PM_{10} seviyelerindeki en yüksek artış 2017 yılına ait olup her iki köyde de belirgin bir zirve görülmüştür. 2017 yılında üretim miktarının 2015 yılına göre %150 oranında artış göstermesi, bu yılın PM_{10} seviyelerindeki yükselişe katkı sağlamıştır. 2020 yılına kadar tam kapasitede üretime devam edilmiştir. Meteorolojik verileri incelendiğinde, 2017 yılındaki ortalama rüzgâr hızında 2015 yılına kıyasla belirgin değişim gözlenmemiştir. Bu durum, PM_{10} seviyelerindeki artışın esas olarak üretim kapasitesindeki ani artışından kaynaklandığını düşündürmektedir.

Mevsimsel değişimler, PM_{10} seviyeleri üzerinde belirgin etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Çalışma bölgesinde, bahar ve yaz aylarında partikül madde taşınımının daha fazla olduğu, ancak kış aylarında ise bu taşınımın azaldığı gözlemlenmiştir. A ve B köylerinin 2017-2018 yıllarına ait meteorolojik verileri incelendiğinde, yaz aylarındaki ortalama rüzgâr hızının kış aylarına oranla %92 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında, 2017 yılındaki artışın üretim kapasitesindeki değişikliklere bağlı olduğu, mevsimsel artışların ise özellikle kuru ve rüzgârlı havalarda tozuma oranının yükselmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Meteorolojik veriler ile PM fraksiyonlarının arasındaki korelasyonların değerlendirmesi, PM seviyeleri ile üretim kapasitesi, rüzgâr hızı ve sıcaklık arasındaki güçlü etkileşimi ortaya koymaktadır.

PM_{10} değerlerinin en yüksek seviyelere ulaştığı 2017-2018 yıllarındaki 24 saatlik ortalama veriler incelendiğinde, A Köyü'nde 4, B Köyü'nde 33 kez sınır değerlerin aşıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, B Köyü'nün özellikle 2017 yılının Eylül ayında 11 kez, 2018 yılının Mart ayında 11 kez, 2019 yılında 14 kez, 2020 yılında ise 7 kez sınır değeri aştığını ortaya koymaktadır. 2019 yılındaki sınır değer aşımlarının Nisan ile Temmuz ayları arasında yoğunlaştığı, 2020 yılında ise Ekim ayında kümelendiği dikkat çekmiştir.

B Köyündeki PM_{10} ölçümlerindeki rüzgâra bağlı sınır değer aşımlarının oranı yaklaşık %30, A Köyünde ise bu değer %70 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, A Köyü'nün rüzgâr kaynaklı partikül madde taşınımından daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Elde edilen veriler, rüzgâr hızının PM_{10} seviyelerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu, ancak tek başına belirleyici olmadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında özellikle yaz ve bahar aylarında, rüzgârlı ve kuru havalardaki toz taşınımının PM_{10} seviyelerini önemli ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır.

A ve B Köylerinde yapılan Çöken Toz ölçümlerinin 03.07.2009 tarih ve 2727 sayılı Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY) kapsamında yapılan değerlendirmesi sonucunda, mevzuatta belirtilen 210 mg/m^2.gün olan UVS (Uzun Vadeli Sınır Değeri) ve 390 mg/m^2.gün olan KVS (Kısa Vadeli Sınır Değeri) limitlerinin aşılmadığı belirlenmiştir. Ancak ölçülen değerlerin sınır değerleri aşmıyor olması, A Köyü'nün B Köyü'ne oranla daha fazla etkilendiği gerçeğini değiştirmemektedir. 2017 yılının Eylül ve Ekim ayında, 2018 yılının Ağustos, Eylül ve Ekim ayında, 2019 yılının Nisan, Mayıs ve Ağustos ayında, 2020 yılının ise Ağustos, Eylül ve Ekim ayında çöken toz seviyelerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir.

Hava kalitesi ölçüm sonuçları, A Köyü'nün Çöken Toz'dan, B Köyü'nün ise PM'den daha fazla etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bu farklılığın, A Köyü ile üretim alanı arasında bulunan, doğal bariyer niteliğindeki tepelerin etkisiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ölçümler, yaz ve bahar aylarında çöken toz seviyelerinin arttığını göstermektedir. Yaz aylarında nakliye yolları su tankerleri ile sulanmasına rağmen, yüksek buharlaşma oranı nedeniyle toz oluşumunun zaman zaman önlenemediği gözlenmiştir. Mevsim geçişlerinde, özellikle hava olaylarının stabil olmaması nedeniyle yüksek tozuma seviyeleri yaşandığı da dikkate değerdir. Kış aylarında ise kar ve yağmur nedeniyle sulama işlemi gerçekleştirilmediği için sıcaklığın sıfırın altına düştüğü ve yağışsız günlerde toz oluşumunun önlenemediği gözlenmiştir. Ancak bu durum uzun süreli olmadığı için ölçüm sonuçlarına yansımamıştır.

Gürültü ölçümleri incelendiğinde, değerlerin genellikle 45-50 dBA arasında olduğu ve önemli dalgalanmaların olmadığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, gürültü kaynaklarının yerleşim alanlarından uzak olması ve arazinin doğal topografyasının gürültü bariyeri görevi görmesidir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği kapsamında yapılan değerlendirmede, en düşük limit L_{gece} değeri olan 50 dBA'nın altında kaldığı görülmüştür. Özellikle Nisan aylarında gürültü seviyesinin 50 dBA dolaylarında olduğu ve bu artışın, elektronik cihazları koruyan sundurmaya çarpan yağmur damlalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Maden drenaj suyunun analiz sonuçları, mevsimsel koşulların ve maden sahasında biriken suların bekleme süresinin önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Analizlerde dikkat çeken parametreler ise askıda katı madde, sülfat, demir ve çinkodur. Bu parametreler, önceki yüzey suyu ve yeraltı suyu analizlerinde de benzer şekilde ön plana çıkmıştır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği kapsamında yapılan değerlendirme sonuçlarına göre, pH değeri 6-9 arasında kalırken, askıda katı madde bir kez sınır değeri aşmış, sülfat ise 7 kez sınır değeri aşmıştır. Bu limit değer artışları, özellikle 2019 yılı Mayıs-Eylül dönemi arasında kümelenmiştir.

Askıda Katı Madde (AKM): Maden drenaj suyunda en yüksek dalgalanma gösteren parametredir. Bu dalgalanmaların ana nedeni, yağışlar ve karların erimesi sonucu oluşan yüzey akışlarının, sediment ve askıda partikülleri taşımış olmasıdır. Bu dönemlerde de maden üretiminin aksamaması için suyun hızlıca tahliyesi büyük önem arz etmektedir. Bu durum hidrolik bekletme süresini düşürerek deşarj edilen suda yüksek AKM seviyelerine yol açmaktadır.

Sülfat: Kömürün bünyesinde yüksek oranda sülfür bileşikleri bulunması, maden sahsında biriken suların doğal olarak sülfat içermesi beklenen bir durumdur. Analizler, yaz aylarında sülfat seviyelerinin arttığını göstermektedir. Bu artışın temel nedeni, yaz aylarındaki deşarj oranının kış aylarına göre daha az olması ve bu nedenle yaz aylarında maden çukuruna dolan suların hidrolik bekletme süresinin artmasıdır. Bekleme süresinin uzaması, sülfür bileşiklerinin suya geçişini kolaylaştırarak sülfat konsantrasyonlarını yükseltmektedir. Ayrıca, sülfattan kaynaklı asit maden drenajı riski de bulunmaktadır ancak bu riskin oluşumu; ortamın pH'ı, sıcaklık, oksijen varlığı ve mikroorganizma seviyeleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu bağlamda, maden drenaj sularında pH izlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Sonuçlara göre pH değeri mevzuatın belirlediği 6 limitinin altına düşmemiştir. Bu da suyun hızla tahliye edilmesi sayesinde kömür ile temas süresinin kısa tutulduğunu göstermektedir.

Demir: Demir sülfürleri, kömür madenlerinde yaygın olarak bulunan minerallerdir. Analizlerde, demir seviyelerinin 10 µg/l ile 1975 µg/l arasında değiştiği ve ortalamanın 625,44 µg/l olduğu tespit edilmiştir. Deşarj sınır değerleriyle karşılaştırıldığında, bu seviyeler aşılmamıştır. Kıtaiçi Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri'ne göre yapılan değerlendirmede, demir konsantrasyonlarının I. ve III. Sınıf su kalitesi arasında olduğu, özellikle bahar aylarında III. Sınıf su kalitesinde olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen hava kalitesi verileri, Türkiye'deki benzer maden alanlarında yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında anlamlı farklılıklar göstermektedir. Örneğin, (Ercan vd, 2020) tarafından Bolu bölgesinde yürütülen bir çalışmada PM_{10} seviyeleri ortalama 38 µg/m^3, çöken toz değerlerinin ise 53 mg/m^2.gün olarak raporlanmıştır [13]. Bu değerler, çalışmamızda A köyü için belirlenen ortalama değer olan 16,92 µg/m^3'ten oldukça yüksek, 80,46 mg/m^2.gün'den düşük olduğu görülmüştür. Bu fark, çalışma alanındaki madencilik faaliyetlerinin yoğunluğu, kullanılan ekipmanlar ve yerel meteorolojik koşullar gibi etkenlerden kaynaklanıyor olabildiğini göstermektedir.

Drenaj suları açısından değerlendirildiğinde, [Wang, L ve ark., 2022] tarafından Çin Sunan kömür madeninde yapılan çalışmada Fe, Mn ve Cr elementlerine dikkat edilmesi gerektiğine değinilmiştir [14]. Çalışmamızda Fe değerlerinde fazla dalgalanma olduğu görülmüştür. Bu durum, linyit madenciliğine özgü jeokimyasal süreçlerin benzer etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada linyit madenciliği faaliyetlerinin hava kalitesi, gürültü ve maden drenaj suyu üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiş olmakla birlikte, bu çevresel bileşenlerin birbirleriyle etkileşim içinde olduğu da göz önünde bulundurulmaktadır. Örneğin, meteorolojik verilerle desteklenen hava kalitesi analizleri, özellikle rüzgârlı dönemlerde artan partikül madde (PM_{10}) ve çöken toz seviyelerinin, bu tozların yüzey sularına veya doğrudan maden drenaj suyu toplama alanlarına taşınarak su kalitesini (özellikle AKM parametresini) etkileme potansiyeline işaret etmektedir. Benzer şekilde, yağışlı dönemlerde hem maden drenaj suyundaki AKM miktarında yüzey akışına bağlı artışlar gözlenmiş hem de (yağmur damlalarının ölçüm cihazı sundurmasına çarpması nedeniyle) gürültü seviyelerinde kısa süreli yükselmeler tespit edilmiştir; bu durum, aynı meteorolojik olayın farklı çevresel bileşenleri nasıl etkilediğini göstermesi açısından önemlidir. Dolayısıyla, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini yönetirken bu tür etkileşimleri dikkate alan bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesi, alınacak önlemlerin etkinliğini artıracaktır.

Çalışmada, 2015-2020 dönemi için hava kalitesi, gürültü ve maden drenaj suyu parametrelerine odaklanmış olup, toprak kalitesi veya habitat üzerindeki doğrudan etkiler gibi uzun vadeli birikimli sonuçlar bu çalışmanın kapsamında yer almamaktadır. Ancak, elde edilen bulgular - özellikle belirli dönemlerde sınır değerleri aşan PM_{10} seviyeleri, maden drenaj suyunda gözlemlenen ve zaman zaman sınır değerleri aşan sülfat ve AKM konsantrasyonları - bu etkilerin uzun yıllar devam etmesi durumunda, bölgedeki toprak verimliliği, bitki örtüsü ve sucul ekosistemler üzerinde potansiyel birikimli olumsuz etkiler yaratma riski taşıdığını düşündürmektedir. Örneğin, sürekli toz birikiminin toprak pH'ını veya kimyasal yapısını değiştirmesi, ya da drenaj suyundaki yüksek sülfat seviyelerinin alıcı ortamdaki sucul yaşamı uzun vadede etkilemesi gibi riskler mevcuttur. Bu potansiyel birikimli etkilerin detaylı olarak araştırılması, gelecekteki çalışmalar için önemli bir konu başlığıdır.

4.1 Öneriler

Hava Kalitesi Yönetimi: Özellikle B Köyü'nde sıkça gözlemlenen PM_{10} sınır değer aşımları ve yaz/bahar aylarında artan toz seviyeleri dikkate alınarak; mevcut toz bastırma yöntemlerinin (yol sulama, konveyör sistemlerinin kapalılığı, vb.) etkinliğinin gözden geçirilmesi, rüzgar hızının yüksek olduğu günlerde operasyonel tedbirlerin artırılması ve özellikle hakim rüzgar yönü ve B Köyü'nün konumu göz önüne alınarak ek tedbirlerin (Örneğin; rüzgar perdeleri, bitkilendirme, vb.) fizibilitesinin araştırılması.

Maden Drenaj Suyu Yönetimi: Yağışlı dönemlerde AKM seviyelerindeki artışları kontrol altına almak amacıyla, maden çukurundaki toplama havuzlarının ve/veya deşarj öncesi kullanılan sedimantasyon yapılarının tasarım ve işletme verimliliğinin (bekletme süresi, kapasite, düzenli temizlik vb.) iyileştirilmesi. Özellikle 2019 yılında gözlenen ve sınır değerleri aşan yüksek sülfat konsantrasyonlarının yönetimi için, suyun sahada bekleme süresini

minimize edecek deşarj stratejilerinin geliştirilmesi veya sülfat giderimine yönelik pasif (Örneğin; yapay sulak alanlar) ya da aktif arıtma teknolojilerinin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi.

Entegre İzleme: Hava, su ve gürültü parametrelerinin izlenmesine devam edilmesi ve bu verilerin, potansiyel etkileşimleri ve birikimli etkileri daha iyi anlamak amacıyla periyodik olarak birlikte değerlendirilmesi.

Teşekkür

Bu makale, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nde 701364 numara ile kayıtlı yüksek lisans tezinin bir bölümünden elde edilen bulgulara dayanmaktadır.

Kaynakça

[1] EÜAŞ 2023. Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu, 3s.

[2] Karakuş, D., Özdoğan, M. V., Turan, G., Konak, G., & Onur, A. H., 2018. Termik Santral Katı Atık Depolama Sahası Kapasitesinin Arttırılması Olanaklarının Araştırılması: Yatağan Termik Santrali Örneği. Yerbilimleri, 39(2), (2018), 103-116.

[3] Ertürk, F., A. Akkoyunlu ve K. B. Varınca, 2006. Enerji Üretimi ve Çevresel Etkileri, Türkasya Stratejik Araştırma Merkezi, 25s.

[4] Atukalp, M. E., & Kesimal, A., 2023. Türkiye'de Kömür Madenciliğinde Etkinlik Değişimi. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), (2023), 27-36.

[5] Kaçmaz, Ş., & Demirpolat, H., 2022. Termik Santral Kaynaklı Çevre Kirliliğini Önlemek İçin Baca Gazı Arıtma Teknolojisi: Örnek Çalışma Seyitömer Termik Santrali Uygulaması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (34), (2022), 645-651.

[6] TKİ 2019. Linyit Sektör Raporu, 16s.

[7] Uçurum, Metin. Kalsit Madenciliğinin Geleceğinde Optik Ayırma Teknolojilerinin Yeri ve Önemi, 4.1(2015), 40-46.

[8] Perinçel, S. 2000. Çatalağzı Termik Santralinin Kömür Kullanımından Doğan Çevre Etkilerinin İncelenmesi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Zonguldak.

[9] Ertuğrul, G. 2010. Madencilik Faaliyetlerinin Çevresel Etkilerinin ve Doğa Onarım Çalışmalarının Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile Belirlenmesi ve Modellenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 167s, İzmir.

[10] Delibalta, M. S., Uzal, N., & Lermi, A. 2015. Ilgın Linyit İşletmeleri Göletlerinde Asit Maden Drenajı ve Rehabilitasyonu. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5.1 (2015), 73-82.

[11] Çelik, A. A. 2018. Açık Maden Ocaklarındaki Toz Emisyonlarının Ekolojik Etkileri. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Şanlıurfa.

[12] Drebenstedt, C., Sımon, A., Hoth, N., & Jolas, P. 2019. Innovative Approach To Reduce Acid Mine Water Drainage (Amd) And Dump Failures On Example Of German Lignite Mining. Technical Sciences, 4.3 (2019), 313-330.

[13] Ercan, Ö., Dinçer, F., Sarı, D., Ceylan, Ö., & Dİnçer, F. K., 2020. Determination of PM_{10} and deposited dust dispersion on the settlement areas from Aksa Göynük coal (lignite) fueled thermal power plant. Atmospheric Pollution Research, 11(12) 2022, 2126-2132.

[14] Wang, L., Tao, Y., Su, B., Wang, L., & Liu, P., 2022. Environmental and health risks posed by heavy metal contamination of groundwater in the Sunan Coal Mine, China. Toxics, 10(7), 2022, 390.

[15] Atay, B. 2019. Termik santrallerin çevreye olumsuz etkileri ve alınabilecek önlemlerin değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124s, Isparta.

[16] Ediz, İ. G., Beyhan, S., Akçakoca, H., & Sarı, E., 2002. Madencilikte Gürültü Sorunu Ve Gürültüye Bağlı İşitme Kayıpları. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, (003), (2022), 50-64.

[17] Türkten B. 2023. Yer Altı Ocağı Galerilerinde Oluşan Drenaj Sularının Karakterizasyonu ve Arıtılması. Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82s, Aksaray.

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Sürdürülebilir Kentsel Hareketliliğin İyileştirilmesi için Hibrit Bir Çerçeve: Paylaşımlı Bisiklet Sistemi İstasyon Yer Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme ve Maksimum Kapsama Probleminin Entegrasyonu

Nimet Elmacıoğlu[1*], Neslihan Demirel[2], Oğuz Öcal[3]

*[1]Kayseri University International Trade and Logistics Department, Kayseri
[2]Kayseri University Industrial Engineering Department, Kayseri
[3]Kayseri University, International Trade and Logistics Department, Kayseri

(Alınış / Received: 18.03.2025, Kabul / Accepted: 19.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Sürdürülebilirlik,
Kentsel Hareketlilik,
Paylaşımlı Bisiklet,
Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV),
Optimizasyon

Öz: Sürdürülebilir kentsel hareketlilik çevresel etkilerin azaltılması ve ulaşım verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Paylaşımlı Bisiklet Sistemleri (PBS), istasyonların optimal konumlandırılmasına bağlı olarak etkinlik göstermektedir. Bu çalışmada, PBS istasyonlarının yer seçimi için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) ve mekânsal optimizasyon teknikleri entegre edilerek veri odaklı bir çerçeve geliştirilmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde IDOCRIW yöntemi ile alternatiflerin değerlendirilmesinde CoCoSo yöntemi bir arada kullanılmıştır. Bisiklet yollarına, tramvay duraklarına yakınlık, nüfus yoğunluğu ve trafik kaza oranları gibi faktörler dikkate alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçların doğruluğunu teyit etmek amacıyla TOPSIS, ARAS ve COPRAS yöntemleri uygulanmış ve Borda Sayım yöntemiyle sonuçlar birleştirilmiştir. Ek olarak Maksimum Kapsama Problemi kullanılarak nüfus kapsama oranı optimize edilmiştir. Seçilen üç optimal istasyon konumu, kent nüfusunun %18'ini kapsayarak yöntemin etkinliğini ortaya koymuştur. Senaryo analizleri, hizmet mesafesi eşik değerlerinin sistem performansı üzerindeki etkisini değerlendirerek planlama esnekliği konusunda içgörüler sunmaktadır. Bulgular, ÇKKV teknikleri ile mekânsal modellemenin entegrasyonu PBS'nin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırdığını göstermektedir.

A Hybrid Framework for Improving Sustainable Urban Mobility: Integrating Multi-Criteria Decision-Making and Maximal Covering Location Problem for Bike-Sharing System Site Selection

Keywords
Sustainability,
Urban Mobility,
Bike-Sharing,
Multi-Criteria Decision-Making (MCDM),
Optimization

Abstract: Sustainable urban mobility plays a critical role in reducing environmental impacts and enhancing transportation efficiency. Bike-Sharing Systems (BSS) operate effectively when station locations are optimally selected. In this study, a data-driven framework integrating Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) and spatial optimization techniques is developed to determine optimal station locations for BSS. The Integrated Determination of Objective Criteria Weights (IDOCRIW) method is employed for deriving criterion weights, while the Combined Compromise Solution (CoCoSo) method is used to evaluate alternatives. Factors such as proximity to bike lanes and tram stops, population density, and traffic accident rates are incorporated into the analysis. To validate the robustness of the results, TOPSIS, ARAS, and COPRAS methods are applied, and outcomes are consolidated using the Borda count method. Additionally, the Maximal Covering Location Problem is utilized to optimize population coverage. The three selected optimal station locations collectively cover 18% of the urban population, demonstrating the effectiveness of the proposed approach. Scenario analyses further explore the impact of service distance thresholds on system performance, offering insights into planning flexibility. The findings indicate that integrating

MCDM techniques with spatial modeling significantly enhances the efficiency and sustainability of BSS implementation.

*İlgili Yazar, email: nimet.elmacioglu@gmail.com

1. Introduction

Urban areas are recognized as hubs of economic and social activities. The United Nations (UN) predicts that by 2050, 68% of people on Earth will reside in cities [1]. Despite cities taking up only 2% of the planet's land, they use 65-75% of its energy and emit more than 75% of global CO2 emissions [2]. Urbanization represents one of the most significant societal transformations of the modern era, influencing and being influenced by various social, economic, and environmental processes [3]. The growing tendency of urbanization not only improves social advantages but also adds considerably to the economy by promoting rural development and technical improvement. However, urbanization has significant environmental consequences that can have a direct influence on the economy, public health, and living standards [4]. The transportation and fuel sectors are being burdened by the world's rapid population growth and rising demand for transportation especially in urban areas [5]. In addition to rising fuel prices, deteriorating air quality, noise pollution, increasing traffic congestion, accidents, and parking problems are among the main problems urban areas have to contend with. All stakeholders such as local authorities, transportation companies, and urban residents are impacted by these occurrences and grapple with diverse challenges [6]. The responsibilities of municipalities in combating climate change and developing policies within the sustainability framework are increasing daily. Municipalities face difficulties in formulating regulations or incentives that foster sustainable transportation networks and integrating them into urban development plans [7]. BSS have an important place among the sustainable methods adopted by municipalities as an alternative to traditional fossil fuel-dependent transportation systems. The first BSS was introduced in Amsterdam, Netherlands, in the 1960s. "White Bikes" were used by the general public all across the city. The program was dropped because the bicycles were frequently stolen and vandalized. BSS was first implemented in 1996 at Portsmouth University in England [8]. Over time, BSS has evolved and overcome obstacles by subscription systems. It allows urban residents to borrow bicycles for short-term, local journeys. This sustainable transportation mode seeks to minimize greenhouse gas emissions, dependence on fossil fuels, traffic congestion, air and noise pollution, and also travel expenses. On the other hand, it contributes to the sustainability of cities and Sustainable Development Goals with the advantages of an increase in public transport usage, accessibility, physical activity, and thus health improvement, and urban environment perception. The greenhouse gas emissions per journey of vehicles [9] and the environmental benefit of bicycle usage in terms of the environment are presented in Figure 1.

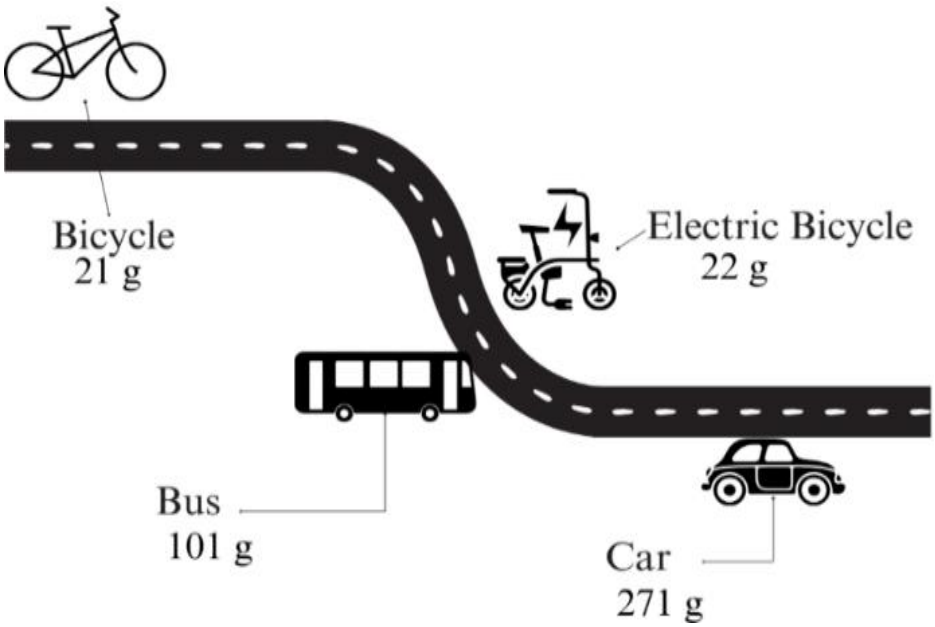


Figure. 1. The Greenhouse Gas Emissions per Journey of Vehicles

BSS make it possible for urban residents to utilize bicycles as an eco-friendly and healthful form of transportation [5, 10, 11, 12, 13]. BSS is widely recognized as a pivotal factor contributing significantly to the efficacy of transit-oriented development within urban communities. Its pivotal role is manifested in the augmentation of travel options, the promotion of public transit connectivity, and the facilitation of recreational opportunities [14].

Furthermore, BSS is mobility options that enhance transportation networks when assessing first- and last-mile solutions [15, 16]. Researchers focus on last-mile and urban freight transport, which have become increasingly important in recent years [17]. The goals of the first- and last-mile solutions are to promote transit use, close the distance between transit hubs, and urge people to abandon using automobiles in favor of environmentally cleaner modes of transportation. This replacement is viable in cities with powerful BSS networks [18]. BSS enhances short-distance travel and readily connects to other transportation systems, allowing individual trips to smoothly integrate numerous modes of transportation [19]. Evaluating BSS is a critical aspect of improving urban mobility and multimodal transportation. A multitude of criteria should be considered when determining the sites of stations for a successful BSS. Stations, for example, should be positioned close to transport stops to supplement transit [20]. For urban residents looking for a low-carbon way to commute short distances and local authorities, BSS has become popular [21]. According to a study done in Shanghai, BSS has resulted in 8358 tons of fuel savings. As a result, there is a reduction in carbon dioxide and nitrogen oxide gas emissions leading to an improvement in air quality [22].

The application of MCDM methods in the site selection process for BSS significantly enhances the decision-making quality by determining the appropriate sites based on a balanced consideration of factors such as accessibility, demand, safety, and proximity to key sites of the city, leading to improved user satisfaction and system sustainability. In this study, BSS, which provides environmentally friendly transportation opportunities and constitutes a component of smart transportation systems designed to address challenges arising from urbanization, is investigated. Firstly, a data-driven MCDM framework has been proposed to identify the appropriate sites for BSS, and to demonstrate how the suggested methodology can be applied, a case study has been carried out. The criteria's weights have been determined using the Integrated Determination of Objective Criteria Weights (IDOCRIW) method and the Combined Compromise Solution (CoCoSo) method has been used for the evaluation and ranking of the alternative sites. After the weights are collected individually using the Entropy and CILOS procedures, a single weight is calculated using the IDOCRIW methodology. The weights computed by IDOCRIW will indicate a change in the criteria values, but the relevance of the criteria will diminish if the losses are greater than the other criteria [23]. The CoCoSo method used for evaluating the alternative BSS sites combines basic additive weighting with the exponentially weighted product model. This strategy is excellent for ranking or selecting options. In the literature, several MCDM strategies have been used to handle a variety of challenging decision problems. Different MCDM methods produce different performance evaluations because of the methodologies' different mathematical calculation manners. Explaining these rating discrepancies and clarifying the ranks derived from the methodologies are therefore imperative [24]. In this study, the findings obtained from the adopted methodology have been compared with the outcomes derived from the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), Additive Ratio Assessment (ARAS), and Complex Proportional Assessment (COPRAS) methods. TOPSIS is based on the idea that the selected choice should have the shortest distance from the positive ideal solution and the farthest distance from the negative one [25]. On the other hand, ARAS is such a sensitive tool, that even small changes to the data can have an impact on the results. The key feature of this model lies in its capability to treat maximum and minimum criteria separately, thereby preventing inconsistency and enabling more precise, contradiction-free outcomes [26]. One of the main benefits of COPRAS is its ability to handle relevant and irrelevant factors independently, which gets around an issue with the ARAS technique. Furthermore, it is feasible to obtain both metrics that are qualitative and quantitative using the COPRAS technique since it can compute both maximization and minimization criteria [27]. Besides the comparison of the CoCoSo results with TOPSIS, ARAS, and COPRAS, a combined ranking is obtained by utilizing the rankings of the mentioned methods via the Borda Count method, which is a data fusion technique. As a final step, a mathematical model has been formulated for the Maximal Covering Location Problem (MCLP). The alternative sites that ranked according to their performance within the framework of the criteria considered and their weights are considered potential bike-sharing stations at this stage. Thanks to MCLP, station sites are optimized to serve the maximum population. The model introduces a novel approach to literature by incorporating already existing bike-sharing stations into the analysis. As a result of the model, the population coverage of the newly established stations has been maximized, offering valuable insights for enhancing the efficiency and impact of the BSS station. The study's structure has been set up as follows: Section 2 presents the material and method, Section 3 outlines the results, and Section 4 provides the discussion and conclusion.

2. Material and Method

The study first adopts a comprehensive approach implementing the IDOCRIW and CoCoSo methods to determine the appropriate sites for BSS station. A data-driven methodology is employed for determining criterion values and conducting the performance ranking of alternative sites. The data used in the analysis are obtained from the Geographic Information System (GIS). The framework adopted in the study is given in Figure 2.

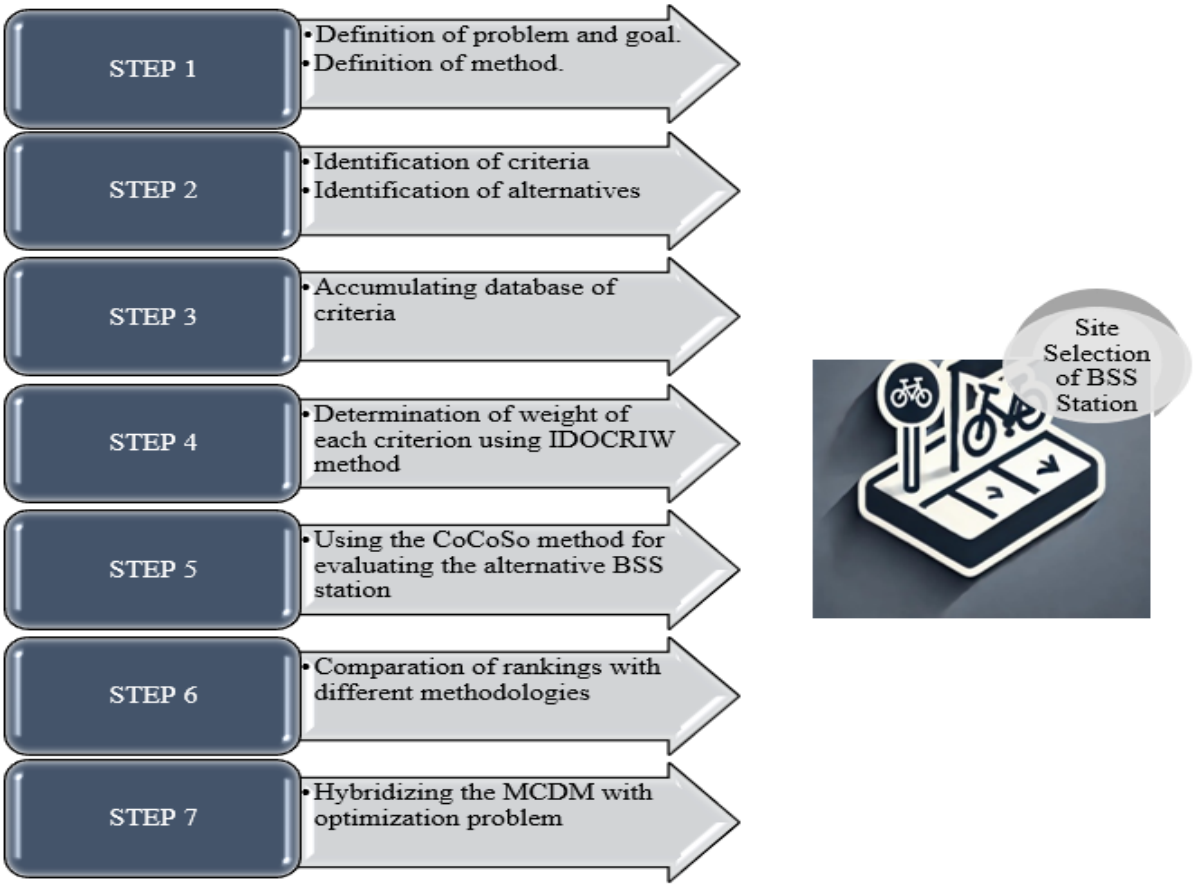


Figure 2. The Framework of the Study

2.1. Literature Review

Although BSS has been established for over fifty years, in the last fifteen years, it has become much more prominent in literature and practice. BSS, recognized for its environmental sustainability and contribution to a healthy transportation infrastructure, is currently operational in 1590 cities across 92 countries. The majority of these systems are concentrated in China, North America, and Europe [28]. Recent studies have attempted to improve the outcomes of BSS efforts via the use of diverse scientific approaches such as mathematical models and MCDM techniques. This section focuses on the literature related to the site selection problem of BSS. Table 1 shows the studies that have approached site selection problems for BSS using mathematical modeling and/or an MCDM approach.

Table 1. Studies examining the BSS station site selection

References	Problem	Methods
Luo-ke [29]	Determining the ideal sites for stations.	AHP
Lin and Yang [30]	Developing an optimization model for station locations.	Network Optimization
García-Palomares et al. [31]	Formulating optimization model for BSS.	GIS-MCLP
Martinez et al. [32]	Determining the ideal sites for stations.	MILP
Romero et al. [33]	Optimizing the location of docking stations in a public bicycle system for economic and social efficiency.	Genetic Algorithm
Ghandehari et al. [34]	Determining the ideal sites for stations.	AHP, SAW, and GIS
Lin et al. [35]	Determining the number and location of stations.	A Hub Location Inventory Model

Deng et al [36]	Determining the ideal sites for stations.	AHP
Frade and Ribeiro [37]	Determining the ideal sites for stations.	MCLP
Lopez Gonzalezz [38]	Determining the ideal sites for stations.	Location-Allocation Models and Spatial Analysis
Pan and Dou [39]	Estimating prospective bike demand and developing an optimization model for station sites.	Network Optimization
Ciancio et al. [40]	Developing an optimization model for station locations.	Stochastic MC
Çetinkaya [41]	Determining the ideal sites for stations.	F-AHP and TOPSIS
Park and Sohn [42]	Determining the ideal sites for stations.	P-Median and MCLP Model
Kabak et al. [43]	Assessing the current state of BSS and locating prospective station locations by comparing them to existing stations.	GIS and MOORA
Mete et al. [44]	Determining the ideal sites for stations.	MC, P-center and P-median
Chen et al. [45]	Developing an optimization model for station locations.	Tabu Search and Agent-based Modeling
Gehrke and Welch [46]	Selecting station area types based on variation.	Latent Class Cluster Analysis
Hu et al. [47]	Adding a new station, deleting an existing station, and redistributing the existing bike stations.	The Potential Path Area and MCLP
Jahanshahi et al. [48]	Evaluation of existing BSS and identification of potential new ones.	GIS, AHP, and VIKOR
Shu et al. [49]	Determination of optimum distances between building entrance-exit points and stations.	Questionnaire, Logistic Model, and Non-linear Regression Model
Eren [50]	Analysis of existing stations based on land use types and station location selection.	AHP, VIKOR, and GIS
Lee et al. [51]	Determining the ideal sites for stations.	MLR and MOORA
Salih-Elamin and Al-Deek [52]	Finding the optimal locations of BSS and maximizing BSS demand coverage.	MCLP, TOPSIS, and AHP
Alkılınç et al. [53]	Determining the ideal sites for stations.	GIS and AHP
Eren and Katanalp [18]	Selecting station sites depending on land use.	FL-Based GIS, AHP, VIKOR, and P-VIKOR Method
Guler and Yomralıoğlu [54]	Determining the ideal sites for stations.	BWM and GIS
Öztaşcı et al. [55]	Cost-benefit analysis.	Questionnaire
Bahadori et al. [56]	Determining the ideal sites for stations.	AHP, TOPSIS, and GIS
Ebrahimi et al. [20]	Mapping the spatial distribution of bike-sharing stations.	GIS, Target Market Share Maximize Coverage and Minimize Facility
Mix et al. [57]	Determining the demand for BSS trips and the optimal ts of stations.	Maximum Demand Coverage Models
Qian et al. [58]	Determining the ideal sites for stations.	Mathematical Model and Genetic Algorithm
Chai et al. [59]	Determining the ideal sites for stations.	AHP

Note: AHP (Analytical Hierarchy Process), BWM (Best Worst Method), GIS (Geographical Information Systems), FL-Based (Fuzzy Logic Based), F-AHP (Fuzzy Analytical Hierarchy Process), MC (Maximal Covering), MCLP (Maximal Covering Location Problem), MILP (Mixed-Integer Linear Programming), MLR (Multiple Linear Regression), MOORA (Multi Objective Optimization By Ratio Analysis), SAW (Simple Additive Weighting), P-VIKOR (Psychometric-Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), GIS (Geographical Information System).

As indicated in Table 1, there are many studies in the literature that address the problem of site selection for BSS station with different approaches, especially in recent years. Due to the challenges in obtaining complete data, nearly all of the studies addressing the site selection problem of BSS station with the MCDM methodology are typically evaluated by subjective methods based on expert opinion. In this study, a data-driven MCDM approach (IDOCRIW and CoCoSo) has been used. There are studies in the literature that use the IDOCRIW and CoCoSo methods in a hybrid manner in different fields. For example, Eslami et al. [61], used the IDOCRIW and CoCoSo

process to establish the optimum plan for mitigating the negative consequences of dam building based on the results of environmental impact assessments. Luo et al.[29], evaluated tourist attraction centers in China based on internet reviews. In this study, BSS station sites evaluated using IDOCRIW and CoCoSo methods provide input to the mathematical model and a framework hybridizing MCDM-MCLP is proposed to optimize the best sites to serve the most population. To the best of the authors' knowledge, there is no such study in the literature and it is hoped that the results obtained will contribute to local authorities making effective use of their scarce resources to serve more residents, increasing the demand for bike-sharing by urban residents thus reducing the carbon footprint of urban mobility, and raising the socio-economic development levels in urban areas.

This study aims to provide a comprehensive and multidimensional contribution to the existing literature on BSS. First and foremost, the set of evaluation criteria has been restructured in line with recent scholarly approaches, incorporating spatially explicit and data-driven indicators. Unlike many previous studies that rely heavily on subjective weighting techniques, this research adopts the IDOCRIW method, which is rarely employed in combination within the MCDM literature. Through the integration of the Entropy and CILOS methods, objective and balanced criterion weights are obtained [29]. This integrated approach not only enhances the accuracy and reliability of the analysis but also supports the construction of a highly reproducible evaluation framework.
For the ranking of alternatives, the CoCoSo method is selected due to its consistent performance in previous studies. By combining the classical WSM and WPM approaches through a triple aggregation strategy, CoCoSo enhances the robustness of the decision-support process [73].
This study also addresses a significant gap in the literature by incorporating user safety into the decision-making framework. As emphasized in the literature, user safety is frequently evaluated based on expert opinions or other subjective assessment methods. In contrast, this study offers a novel contribution by incorporating traffic accident data as a direct, objective, and spatially explicit risk indicator, thereby enhancing the methodological rigor of the safety analysis. By utilizing accident statistics at the neighborhood level for each candidate location, user safety is modeled through objective and quantifiable indicators. This represents one of the first attempts in the literature to analyze spatial safety factors through a holistic and systematic approach.

Finally, the widely used Maximal Covering Location Model is innovatively adapted to the station location problem. In this model, the spatial configuration of the existing 70 BSS stations is taken into account, and the coverage areas of new proposed stations are evaluated in relation to these reference points. This application ensures that the decision-making process is fully integrated with the urban spatial context, significantly enhancing the practical relevance and real-world applicability of the proposed framework.

Taken together, these contributions not only introduce methodological innovations to the literature but also serve as a valuable reference for practitioners and policymakers seeking to develop spatial intelligence-based decision support systems for sustainable urban transportation planning.

2.2. IDOCRIW Method

The IDOCRIW method was introduced by Zavadskas and Podvezko [62]. This approach integrates the salient aspects of the Entropy [63] and the CILOS (Method of Criterion Impact Loss**)** methods [62] to assess data structure. The entropy method is extensively applied for ascertaining criteria weights, representing the comparative advantage of one alternative over another at equivalent standard values. Meanwhile, the CILOS method is employed to determine the relative impact loss experienced by an alternative criterion when another criterion is identified as superior. This method is linked to the evaluation of the probability of significance loss for each criterion when assigning maximum or minimum values to one of the criteria [62]. The IDOCRIW method addresses the limitations of the entropy method while retaining the advantages of the CILOS method. Through the synthesis of these two techniques, the potential for excessively large or small differences in weights is mitigated, resulting in a highly accurate comprehensive weight. The IDOCRIW approach has been used for determining the criteria weights by the following steps.

2.2.1. Entropy Method

Shannon proposed the Entropy technique in 1948 as "a statistical parameter that measures, in a sense, how much information is produced on average for each letter of a text in the language" [63]. Most multi-criteria decision analysis (MCDA) issues necessitate the formulation of criteria weights to demonstrate the relative importance of each criterion concerning other factors impacting option alternatives and results. Without relying on subjective information from experts or decision-makers, entropy weights can evaluate the amount of relevant information provided by the index based on attribute value discrepancies. The fundamental advantage of the Entropy methodology over subjective-based weighing methods is that it removes human influence from the weighting process, allowing criteria weights to be established objectively [64, 65].

The initial decision matrix is constructed as follows:

$$X = [x_{ij}]_{m\times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} (i = 1, 2, \dots, m;\ j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

The decision matrix $[x_{ij}]_{m\times n}$ constitutes the initial step of the evaluation process. This matrix encompasses m alternatives and n criteria. Each element x_{ij} in the decision matrix represents the performance score of the i^{th} alternative with respect to the j^{th} criterion. This value serves as a fundamental data component that enables the evaluation and comparison of alternatives based on each criterion.
Due to the differing units of measurement across the various criteria in the decision matrix, normalization is required prior to proceeding with the analysis. The normalization process ensures that all criteria are brought onto a comparable scale, thereby facilitating a consistent and meaningful evaluation.
The normalization of the decision matrix is performed using Eq. (2).

$$r_{ij} \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}} \quad (2)$$

In the equation, r_{ij}represents the normalized value of the i^{th} alternative with respect to the j^{th} criterion. This process ensures comparability of each alternative in relation to the corresponding criterion.
The entropy degree is calculated using Eq. (3).

$$E_j = -\frac{1}{ln_n}\sum_{i=1}^{n} r_{ij} ln(r_{ij})\ \ j = 1, 2, \dots, m; 0 \le E_j \le 1 \quad (3)$$

The degree of differences, represented by, d_j is calculated by applying Eq. (4).

$$d_j = 1 - E_j \quad (4)$$

The entropy weight w_j is calculated using Eq. (5).

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m} d_j}, \sum_{j}^{m} w_j = 1 \quad (5)$$

The degree of non-homogeneity in data is reflected by Entropy weights. Homogeneous data has zero weight, which doesn't significantly influence evaluation. The largest weight corresponds to the criterion with the highest weight ratio [62]. Entropy weight establishes the importance of the criteria in the decision-making process; a lower Entropy number indicates a higher Entropy-based weight, implying that more information can be derived from the given criterion [69].
In the next step, the CILOS methodology is applied. This method provides a complementary approach for determining the corresponding weights of the criteria. The CILOS approach aims to calculate objective weights that contribute to the decision-making process by evaluating the relative influence loss of alternative criteria. A detailed procedure of the CILOS method is presented in the following section.

2.2.2. CILOS Method

In the method proposed by Čereška et al., one of the remaining criteria involves assessing the loss of each criterion until the optimum is reached [70]. The CILOS approach is utilized, considering the effect loss of each criterion when one of the other criteria reaches the maximum or minimum value. The stages of the CILOS method, as outlined by Zavadskas and Podvezko [62], are as follows: The first step is transforming minimized criteria into maximizing criteria using Eq. (6).

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{min_i r_{ij}}{r_{ij}} \tag{6}$$

The new matrix is indicated by; $X = \|x_{ij}\|$.
Eq. (7) is used to identify the highest value within each criterion column. This operation is intended to determine the maximum value for each criterion in the matrix, which will subsequently serve as a reference point in the following calculations.

$$x_j = max_i x_{ij} = x_{kij} \tag{7}$$

The 'B' matrix is constructed by selecting thex_{kij} values from the X matrix that correspond to the maximum values of the i^{th} criterion. As a result of this process, a square 'B' matrix consisting of k_i rows are obtained, as presented in Eq. (8).

$$B = \|b_{ij}\|, \; b_{ii} = x_i, b_{ij} = x_{kij} \tag{8}$$

The 'P' matrix represents the relative impact loss of each criterion. The calculation is performed using Eq. (9).

$$P = \|p_{ij}\|, p_{ij} = \frac{x_j - b_{ij}}{x_j} = \frac{b_{ii} - b_{ij}}{b_{ii}}, \qquad P_{ij} = 0; i, j = 1, 2, \dots, m \tag{9}$$

The 'F' matrix, which defines the criterion weights, is constructed using Eq. (10).

$$F = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^{m} P_{i1} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & -\sum_{i=1}^{m} P_{i2} & \cdots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & -\sum_{i=1}^{m} P_{im} \end{bmatrix}_{m \times m} \tag{10}$$

To determine the CILOS weights, a system of linear equations is solved using Eq. (11).

$$F \times q_j = 0 \tag{11}$$

The criterion weights q_j are calculated from the defined homogeneous linear system of equations presented by Ali et al. [66].
The "impact loss" criteria technique solves the Entropy method's drawbacks. When the criteria value changes only slightly, the members p_{ij} of the matrix P, which indicates the relative loss of criterion influence, tend to approach zero. In contrast, the associated criterion weights rise dramatically, having a considerable impact on the entire evaluation.

When one criterion remains constant across all options the relative losses for that criterion, as well as its overall loss, become zero. As a result of a whole column of elements in matrix P being reduced to zero, the linear system of equations loses importance.
Drawing on the concept of distinct impact weights merging into a unified overall weight [68, 71] it becomes feasible to establish a connection between the Entropy weights W_j and the weights q_j derived from the CILOS method. This connection serves to associate them with shared ultimate criteria aimed at evaluating the weight array structure ω_j- Eq. (12).

$$\omega_j = \frac{q_j W_j}{\sum_{j=1}^{m} q_j W_j} \tag{12}$$

These weights will emphasize the separation of specific criterion values but their significance will be decreased due to greater loss in other criteria. The estimated weights of Entropy and criterion loss of impact are combined into aggregated weights, which are then used in multi-criteria assessment, option ranking, and selecting the optimal alternative [70].

2.3. CoCoSo Method

A particular MCDM ranking model, known as the CoCoSo approach, was proposed in 2019 by Yazdani et al., [72]. It is based on the combination of three score aggregation functions that have been compromised [73, 74]. Given its high dependability in calculating the right compromise score utilizing an integrated framework, CoCoSo has been used in a variety of sectors, including sustainability and performance evaluation. The method is based on an integrated basic additive weighting and an exponentially weighted product model [72].
Formulating the initial decision (Xij) matrix based on real data as follows:

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \qquad \text{i = 1,2, ..., m} \qquad \text{j= 1, 2, ..., n} \tag{13}$$

The normalization process varies according to the type of criteria. For benefit criteria, normalization is performed using Eq. (14), while for cost-type criteria, Eq. (15) is applied. In this way, all criteria are transformed into a comparable scale, ensuring consistency throughout the evaluation process.

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{-}}{x_{ij}^{+} - x_{ij}^{-}} \tag{14}$$

$$x_{ij}^{-} = \frac{\min(x_{ij})}{1 \le i \le n}, x_{ij}^{+} = \frac{\max(x_{ij})}{1 \le i \le n}$$

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^{+} - x_{ij}}{x_{ij}^{+} - x_{ij}^{-}} \tag{15}$$

The sum of the weighted comparability sequence and the sum of the power weight of comparability sequences for each choice, as Si and Pi, respectively are calculated by Eqs. (16-17).

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

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} (x_{ij}) a^{w_j}, \tag{17}$$

The following aggregation procedures are used to calculate the relative weights of the options. In this step, relative weights for additional alternatives are generated using three evaluation score methodologies (Eqs. (18-20)).

$$\varphi_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^{m}(P_i + S_i)}, \quad (18)$$

$$\varphi_{ib} = \frac{S_i}{\min\limits_i S_i} + \frac{P_i}{\min\limits_i P_i}, \quad (19)$$

$$\varphi_{ic} = \frac{\lambda(S_i)+(1-\lambda)(P_i)}{\left(\lambda^{\max\limits_i S_i}+(1-\lambda)^{\max\limits_i P_i}\right)};\ 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (20)$$

Eq. (18) corresponds to the Weighted Sum Method (WSM) and the Weighted Product Model (WPM). Eq. (19) illustrates the aggregated relative scores obtained from both WSM and WPM in comparison to the optimal solution. Eq. (20) introduces a balanced compromise between the results derived from these two methods.
Finally, the performance scores of the alternatives are calculated by applying Equation (21).

$$\varphi_i = (\varphi_{ia}\varphi_{ib}\varphi_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(\varphi_{ia}+\varphi_{ib}+\varphi_{ic}). \quad (21)$$

Consequently, the alternatives are ranked based on their performance scores, with a higher performance score being preferable.

3. Results

In this section, IDOCRIW and CoCoSo methods, whose methodology has been given in the previous section, are used to determine criteria weights and evaluate alternatives for the problem of site selection for BSS station, which are important for sustainable mobility in urban centers. A comprehensive set of criteria has been determined based on synthesizing insights from both expert opinions (working for Kayseri Transportation Inc., a subsidiary of Kayseri Metropolitan Municipality) and the existing literature. Seventeen criteria that form the basis for the sustainability of the city's transportation systems by selecting the most appropriate station sites are given in Table 2.

Table 2. Considered Criteria and Their Relationship with Literature

Criteria	Definition	[75]	[76]	[77]	[37]	[41]	[11]	[48]	[78]	[53]	[56]	[18]	[79]	[80]	[?]
Cri_1	Proximity to Bus Stop	Δ	Δ	Δ					Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
Cri_2	Proximity to Tram Stop			Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
Cri_3	Proximity to the Existing Stops							Δ					Δ		Δ
Cri_4	Proximity to Important Junction							Δ							Δ
Cri_5	Proximity to University and High School	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ
Cri_6	Proximity to Student Residence									Δ					Δ
Cri_7	Proximity to Library														Δ
Cri_8	Proximity to Hospital											Δ			Δ
Cri_9	Proximity to City Hall											Δ			Δ

Cri_10	Young Population				Δ										Δ
Cri_11	Proximity to Green Areas	Δ				Δ		Δ	Δ		Δ	Δ			Δ
Cri_12	Proximity to Historical and Touristic Areas		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
Cri_13	Proximity to Cinema														Δ
Cri_14	Proximity to Shopping Mall				Δ	Δ		Δ				Δ	Δ		Δ
Cri_15	Proximity to Restaurant	Δ											Δ		Δ
Cri_16	Proximity to Bike Lane	Δ			Δ	Δ	Δ			Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
Cri_17	The number of traffic accidents														Δ

⊕: Current Paper.

3.1. Criterion Weighting

In this section, the weight values of performance criteria considered for determining the best sites for BSS station with the perspective of sustainability have been calculated using the IDOCRIW method.

The decision matrix (DM) comprising the alternatives and criteria is presented in Table 3.

Table 3. The DM for the Entropy Method

Criteria/ Alternative	Cri_1	Cri_2	Cri_3	Cri_4	Cri_5	Cri_6	Cri_7	Cri_8	Cri_9
Alt_1	110	140	1800	480	1700	600	1450	45	8000
Alt_2	35	20	507	45	180	300	900	670	1110
Alt_3	130	220	120	120	55	90	380	360	250
Alt_4	110	1600	880	170	210	250	700	350	1220
Alt_5	75	600	550	110	370	1110	920	550	2495
Alt_6	135	1100	620	290	430	1300	480	375	745
Alt_7	60	20	915	880	235	890	1380	1255	3055
Alt_8	130	40	860	600	520	290	950	890	780
Alt_9	100	80	860	555	450	710	715	750	2965
Alt_10	120	40	470	150	580	490	1500	300	1750

Criteria/ Alternative	Cri_10	Cri_11	Cri_12	Cri_13	Cri_14	Cri_15	Cri_16	Cri_17
Alt_1	632	1335	1340	2005	1040	125	7040	128
Alt_2	1666	25	1010	2180	1200	300	30	14
Alt_3	1040	140	20	910	250	50	65	49
Alt_4	3451	180	560	1415	1420	25	35	28
Alt_5	2009	30	690	3240	2660	770	304	34
Alt_6	1692	485	415	1045	1030	130	260	15
Alt_7	4177	245	1595	1685	1120	470	200	61
Alt_8	835	320	280	5265	4555	60	1500	7
Alt_9	14150	685	2545	2900	2510	900	680	72
Alt_10	14148	555	1235	4484	4240	180	1590	70

The normalized DM calculated through Eq. (2) is presented in Table 4.

Table 4. The Entropy Method Normalized DM

Criteria/ Alternative	Cri_1	Cri_2	Cri_3	Cri_4	Cri_5	Cri_6	Cri_7	Cri_8	Cri_9
Alt_1	0.11	0.04	0.24	0.14	0.36	0.10	0.15	0.01	0.36
Alt_2	0.03	0.01	0.07	0.01	0.04	0.05	0.10	0.12	0.05

Alt_3	0.13	0.06	0.02	0.04	0.01	0.01	0.04	0.06	0.01
Alt_4	0.11	0.41	0.12	0.05	0.04	0.04	0.07	0.06	0.05
Alt_5	0.07	0.16	0.07	0.03	0.08	0.18	0.10	0.10	0.11
Alt_6	0.13	0.28	0.08	0.09	0.09	0.22	0.05	0.07	0.03
Alt_7	0.06	0.01	0.12	0.26	0.05	0.15	0.15	0.23	0.14
Alt_8	0.13	0.01	0.11	0.18	0.11	0.05	0.10	0.16	0.03
Alt_9	0.10	0.02	0.11	0.16	0.10	0.12	0.08	0.14	0.13
Alt_10	0.12	0.01	0.06	0.04	0.12	0.08	0.16	0.05	0.08

Criteria/ Alternative	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**
Alt_1	0.01	0.33	0.14	0.08	0.05	0.04	0.60	0.27
Alt_2	0.04	0.01	0.10	0.09	0.06	0.10	0.00	0.03
Alt_3	0.02	0.04	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01	0.10
Alt_4	0.08	0.05	0.06	0.06	0.07	0.01	0.00	0.06
Alt_5	0.05	0.01	0.07	0.13	0.13	0.26	0.03	0.07
Alt_6	0.04	0.12	0.04	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03
Alt_7	0.10	0.06	0.16	0.07	0.06	0.16	0.02	0.13
Alt_8	0.02	0.08	0.03	0.21	0.23	0.02	0.13	0.01
Alt_9	0.32	0.17	0.26	0.12	0.13	0.30	0.06	0.15
Alt_10	0.32	0.14	0.13	0.18	0.21	0.06	0.14	0.15

E_j values obtained through Eq. (3) and the Entropy values W_j of the criteria calculated with Eqs. (4-5) are shown in Table 5.

Table 5. Entropy Values and Criterion Weights

Criteria	**Cri_1**	**Cri_2**	**Cri_3**	**Cri_4**	**Cri_5**	**Cri_6**	**Cri_7**	**Cri_8**	**Cri_9**
E_j	0.98	0.66	0.94	0.87	0.86	0.91	0.96	0.92	0.84
Criteria	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**	
E_j	0.77	0.82	0.88	0.94	0.90	0.80	0.57	0.89	
Criteria	**Cri_1**	**Cri_2**	**Cri_3**	**Cri_4**	**Cri_5**	**Cri_6**	**Cri_7**	**Cri_8**	**Cri_9**
W_j	0.01	0.14	0.03	0.05	0.06	0.04	0.01	0.03	0.06
Criteria	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**	
W_j	0.09	0.07	0.05	0.03	0.04	0.08	0.17	0.05	

The CILOS weights that are used in obtaining IDOCRIW weights, for the cost-oriented Cri_17 criterion in the DM shown in Table 3, are transformed to the benefit direction through Eq. (7), and the results are presented in Table 6.

Table 6. CILOS Benefit-Oriented DM

Criteria/ Alternative	**Cri_1**	**Cri_2**	**Cri_3**	**Cri_4**	**Cri_5**	**Cri_6**	**Cri_7**	**Cri_8**	**Cri_9**
Alt_1	110	140	1800	480	1700	600	1450	45	8000
Alt_2	35	20	507	45	180	300	900	670	1110
Alt_3	130	220	120	120	55	90	380	360	250
Alt_4	110	1600	880	170	210	250	700	350	1220
Alt_5	75	600	550	110	370	1110	920	550	2495
Alt_6	135	1100	620	290	430	1300	480	375	745
Alt_7	60	20	915	880	235	890	1380	1255	3055
Alt_8	130	40	860	600	520	290	950	890	780
Alt_9	100	80	860	555	450	710	715	750	2965
Alt_10	120	40	470	150	580	490	1500	300	1750

Criteria/	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**
Alt_1	632	1335	1340	2005	1040	125	7040	0.05
Alt_2	1666	25	1010	2180	1200	300	30	0.50
Alt_3	1040	140	20	910	250	50	65	0.14
Alt_4	3451	180	560	1415	1420	25	35	0.25
Alt_5	2009	30	690	3240	2660	770	304	0.21
Alt_6	1692	485	415	1045	1030	130	260	0.47
Alt_7	4177	245	1595	1685	1120	470	200	0.11
Alt_8	835	320	280	5265	4555	60	1500	1.00
Alt_9	14150	685	2545	2900	2510	900	680	0.10

Alt_10	14148	555	1235	4484	4240	180	1590	0.10

The results obtained from the normalization process are presented in Table 7.

Table 7. The Normalized DM of CILOS Method

Criteria/ Alternative	**Cri_1**	**Cri_2**	**Cri_3**	**Cri_4**	**Cri_5**	**Cri_6**	**Cri_7**	**Cri_8**	**Cri_9**
Alt_1	0.11	0.04	0.24	0.14	0.36	0.10	0.15	0.01	0.36
Alt_2	0.03	0.01	0.07	0.01	0.04	0.05	0.10	0.12	0.05
Alt_3	0.13	0.06	0.02	0.04	0.01	0.01	0.04	0.06	0.01
Alt_4	0.11	0.41	0.12	0.05	0.04	0.04	0.07	0.06	0.05
Alt_5	0.07	0.16	0.07	0.03	0.08	0.18	0.10	0.10	0.11
Alt_6	0.13	0.28	0.08	0.09	0.09	0.22	0.05	0.07	0.03
Alt_7	0.06	0.01	0.12	0.26	0.05	0.15	0.15	0.23	0.14
Alt_8	0.13	0.01	0.11	0.18	0.11	0.05	0.10	0.16	0.03
Alt_9	0.10	0.02	0.11	0.16	0.10	0.12	0.08	0.14	0.13
Alt_10	0.12	0.01	0.06	0.04	0.12	0.08	0.16	0.05	0.08
Criteria/ Alternative	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**	
Alt_1	0.01	0.33	0.14	0.08	0.05	0.04	0.60	0.02	
Alt_2	0.04	0.01	0.10	0.09	0.06	0.10	0.00	0.17	
Alt_3	0.02	0.04	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01	0.05	
Alt_4	0.08	0.05	0.06	0.06	0.07	0.01	0.00	0.09	
Alt_5	0.05	0.01	0.07	0.13	0.13	0.26	0.03	0.07	
Alt_6	0.04	0.12	0.04	0.04	0.05	0.04	0.02	0.16	
Alt_7	0.10	0.06	0.16	0.07	0.06	0.16	0.02	0.04	
Alt_8	0.02	0.08	0.03	0.21	0.23	0.02	0.13	0.34	
Alt_9	0.32	0.17	0.26	0.12	0.13	0.30	0.06	0.03	
Alt_10	0.32	0.14	0.13	0.18	0.21	0.06	0.14	0.03	

IDOCRIW weights are determined, and the criteria weights results are summarized in Table 8.

Table 8. Weight of Each Criterion

Criteria	**Cri_1**	**Cri_2**	**Cri_3**	**Cri_4**	**Cri_5**	**Cri_6**	**Cri_7**	**Cri_8**	**Cri_9**
Weight	0.036	0.127	0.032	0.074	0.053	0.048	0.028	0.035	0.056
Criteria	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**	
Weight	0.074	0.072	0.051	0.029	0.042	0.063	0.134	0.036	

According to the IDOCRIW, the order of importance of criteria has been determined as C16> C2 > C10 > C4 > C11 > C15 > C9 > C5 > C12 > C6 > C14 > C17 > C1 > C8 > C3 > C13 > C7.
While the most important weight among the criteria is attributed to the “proximity to the bike lane”, “proximity to the tram stop” ranks second. Although bicycle use is a healthy and environmental transportation mode, integrating BSS with other public transport systems and allowing transit use in order to provide advantages in terms of speed plays a very important role in the transportation planning of cities. According to the results of criteria weights, the fact that shared bicycles are mostly preferred by the young and educated population around the world is also valid for Kayseri province. The criterion with the least importance weight has been identified as “proximity to libraries” and “proximity to cinemas”.

3.2. Ranking of Alternatives

The normalization of the DM is shown in Table 9.

Table 9. The CoCoSo Normalized DM

Criteria/ Alternative	**Cri_1**	**Cri_2**	**Cri_3**	**Cri_4**	**Cri_5**	**Cri_6**	**Cri_7**	**Cri_8**	**Cri_9**
Alt_1	0.75	0.08	1.00	0.52	1.00	0.42	0.96	0.00	1.00
Alt_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.17	0.46	0.52	0.11
Alt_3	0.95	0.13	0.45	0.09	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00
Alt_4	0.75	1.00	0.26	0.15	0.09	0.13	0.29	0.25	0.13

Alt_5	0.40	0.37	0.30	0.08	0.19	0.84	0.48	0.42	0.29
Alt_6	1.00	0.68	0.47	0.29	0.23	1.00	0.09	0.27	0.06
Alt_7	0.25	0.00	0.44	1.00	0.11	0.66	0.89	1.00	0.36
Alt_8	0.95	0.01	0.44	0.66	0.28	0.17	0.51	0.70	0.07
Alt_9	0.65	0.04	0.21	0.61	0.24	0.51	0.30	0.58	0.35
Alt_10	0.85	0.01	0.21	0.13	0.32	0.33	1.00	0.21	0.19

Criteria/ Alternative	**Cri_10**	**Cri_11**	**Cri_12**	**Cri_13**	**Cri_14**	**Cri_15**	**Cri_16**	**Cri_17**
Alt_1	0.00	1.00	0.52	0.25	0.18	0.11	1.00	0.00
Alt_2	0.08	0.00	0.39	0.29	0.22	0.31	0.00	0.94
Alt_3	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.65
Alt_4	0.21	0.12	0.21	0.12	0.27	0.00	0.00	0.83
Alt_5	0.10	0.00	0.27	0.54	0.56	0.85	0.04	0.78
Alt_6	0.08	0.35	0.16	0.03	0.18	0.12	0.03	0.93
Alt_7	0.26	0.17	0.62	0.18	0.20	0.51	0.02	0.55
Alt_8	0.02	0.23	0.10	1.00	1.00	0.04	0.21	1.00
Alt_9	1.00	0.50	1.00	0.46	0.52	1.00	0.09	0.46
Alt_10	1.00	0.40	0.48	0.82	0.93	0.18	0.22	0.48

CoCoSo performance scores φ_i are given in Table 10.

Table 10. Results of CoCoSo Method

	S_i	P_i	k_{ia}	k_{ib}	k_{ic}	k_i
Alt_1	0.52	13.35	0.10	6.09	0.84	2.51
Alt_2	0.15	10.23	0.07	2.50	0.63	1.11
Alt_3	0.12	8.41	0.06	2.00	0.52	0.88
Alt_4	0.29	14.33	0.10	4.21	0.89	1.86
Alt_5	0.32	15.45	0.11	4.61	0.96	2.06
Alt_6	0.33	15.51	0.11	4.70	0.96	2.09
Alt_7	0.35	14.92	0.11	4.81	0.93	2.11
Alt_8	0.33	15.33	0.11	4.65	0.95	2.07
Alt_9	0.46	15.94	0.12	5.86	1.00	2.55
Alt_10	0.38	15.70	0.11	5.15	0.98	2.27

Table 10 shows the performance rankings of alternative sites for BSS station. It can be observed that the performance of the A9 (15 Temmuz), A1 (Şehir Hastanesi), and A10 (Mevlana) are significantly better than the others. The alternatives with the lowest performance levels are obtained as A2 (Koçak) and A3 (Medrese). It is noteworthy that each of the first three sites is characterized by a young population and is located in university districts also close to tram stops, the furthest being 140 meters.

3.3. Comparative Analysis

Alternative sites of BSS station have been also evaluated using the TOPSIS, ARAS, and COPRAS methods in this section. The fundamental principle underpinning the TOPSIS posits that the selected alternative should exhibit the shortest distance to the positive ideal solution and, concurrently, the greatest distance from the negative ideal solution. The TOPSIS method stands as one of the earliest MCDM techniques in the literature and it remains one of the most frequently employed methods to date. ARAS is a sort of MCDM tool that does not involve any advanced computation procedures and is in charge of ranking a small number of choices, each of which must be evaluated concurrently against a range of decision criteria. The main benefit of using the ARAS approach is that the degree of alternative utility is evaluated by comparing the variation to the ideally optimum one, which helps to prioritize the alternatives. So, the evaluation and ranking of options are relatively convenient when this approach is used [82]. COPRAS posits that the significance and utility level of the examined alternatives are directly and proportionately dependent on a set of criteria that effectively characterize them, along with the values and weights assigned to these criteria [83]. Results from the three methods are compared with the results of the CoCoSo method and it has been observed that the performed framework and the rankings are consistent. The performance rankings of alternative sites for BSS station obtained from different methodologies are presented in Table 11.

Table 11. Alternative Ranking Scores Derived by Different Methods

Method / Alternative	CoCoSo	TOPSIS	ARAS	COPRAS
Alt_1	2.51	0.566	0.568	100
Alt_2	1.11	0.145	0.147	23.424
Alt_3	0.88	0.108	0.095	15.323
Alt_4	1.86	0.379	0.294	49.376
Alt_5	2.06	0.274	0.288	47.017
Alt_6	2.09	0.333	0.307	50.931
Alt_7	2.11	0.276	0.300	47.783
Alt_8	2.07	0.261	0.300	49.326
Alt_9	2.55	0.358	0.420	68.315
Alt_10	2.27	0.308	0.340	56.303

In this section, the Borda count method [84] has also been implemented in order to obtain an integrated ranking list. The integrated results are presented in Table 12.

Table 12. Borda Count Results

Alternative	Total	Final Rank
Alt_1	35	1
Alt_2	4	9
Alt_3	0	10
Alt_4	18	5
Alt_5	10	8
Alt_6	23	4
Alt_7	17	6
Alt_8	16	7
Alt_9	32	2
Alt_10	26	3

The results obtained from the Borda count method have been used to assess the overall performance of the alternatives across different criteria [86]. According to this method, Alt_1 has achieved the highest score indicating that it is the most suitable alternative when all criteria are considered. It has been followed by Alt_9 with a score of 32, demonstrating a performance comparable, making it a strong contender as well. Alt_10 and Alt_6 have ranked highly with scores of 26 and 23, respectively, suggesting robust performance. Alt_4 and Alt_7 have both reflected average performance while they are strong in certain criteria, they are less preferred overall compared to other alternatives. Alt_8 and Alt_5 have been positioned lower in the ranking, indicating weaker performance relative to the other options. Finally, Alt_2 and Alt_3 have the lowest Borda scores, making them the least favorable alternatives in the overall evaluation.

In all of the results of different MCDM methodologies, Alt_1, Alt_9, and Alt_10, although ranked differently, consistently appear at the top of the lists. Alt_9, with a young population of 14,150, and Alt_10, with 14,148 are the two districts with the highest young generation densities in the study area. Alt_2 and Alt_3 with the young population densities of 1,666 and 1,040 respectively consistently ranked last in all assessments. Each methodology's results for performance rankings of alternative BSS station are presented in Figure 3.

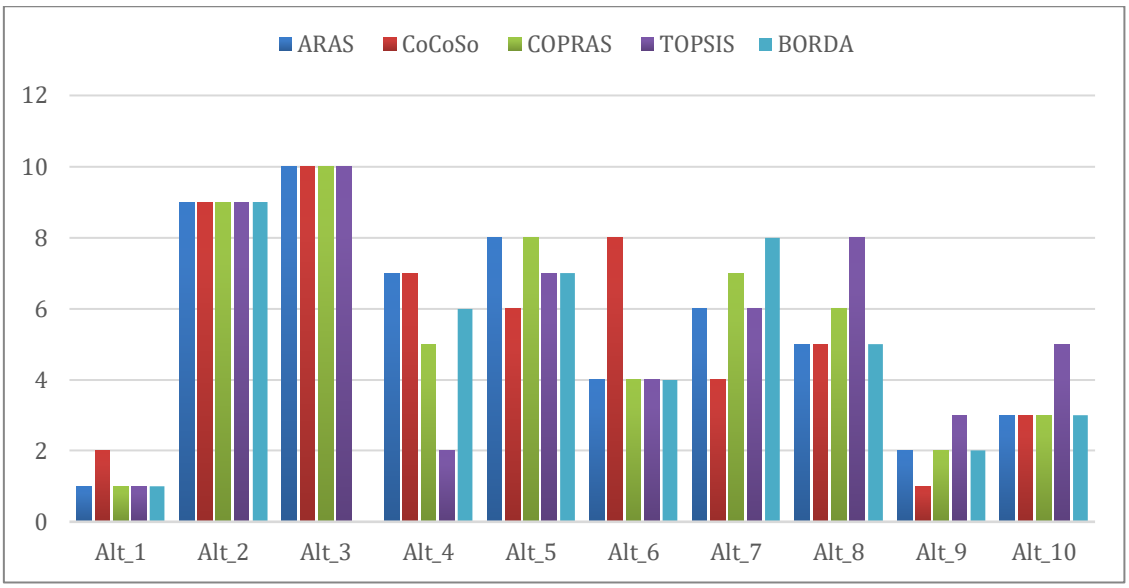


Figure 3. Performance Rankings of Alternatives

Alt_1 and Alt_9 have emerged as the two alternatives with the highest performance scores, indicating that these alternatives are the most suitable sites according to the considered criteria. Alt_1 has been identified as the closest alternative to the ideal solution according to the TOPSIS results, further supporting its overall suitability. However, Alt_9 ranked third in the TOPSIS method, with Alt_4 securing the second position. In both the ARAS and COPRAS methods, Alt_1 has demonstrated the strongest performance and Alt_9 has achieved the second-highest score, confirming their strong suitability as a station sites. Furthermore, Alt_1 and Alt_9 have ranked at the top in the Borda count, indicating consistent support for these two alternatives across all methods. Alt_2 and Alt_3 consistently have received the lowest scores across the CoCoSo, TOPSIS, ARAS, COPRAS, and Borda Count methods, clearly indicating that these sites are the least suitable according to the evaluated criteria.

3.4. MCLP for BSS Station Selection

In this section, the alternative BSS station, ranked based on the criteria considered within the MCDM framework, serve as the inputs to the mathematical model. Given that municipalities are obligated to ensure urban sustainability and provide services to the maximum number of city residents despite limited budgets, the strategic sites of BSS station of paramount importance. The integration of the MCDM approach with mathematical modeling is intended to determine the optimal sites. The primary objective is to allocate the available budget for station installations in a way that maximizes service coverage for urban residents. In our research problem, three centers are established from among the top six alternatives selected by the CoCoSo method. This decision aligns with the target established by officials at Kayseri Transportation Inc. to open three stations in 2025. The BSS station site selection problem is formulated as a Maximal Covering Location Problem (MCLP), and its formulation is presented below. In this model, the existing stations in service are explicitly taken into account to ensure that the allocation of new stations complements the current network. This approach not only maximizes service coverage under budget constraints but also optimizes the integration of new installations with the established infrastructure.

The formalization of MCLP is given below [85];

Indexes;

i = Demand nodes, $i \in I$

j = Potential sites for bike-sharing system stations, $j \in J$

k = Existing bike-sharing system stations, $k \in K$

p = Number of bike-sharing system stations to be established

Parameters;

w_i = Population of the i. neighborhood

N_i = The set of potential sites that can cover neighborhood i within the acceptable service distance

S = Maximum acceptable service distance to cover any neighborhood

T = Maximum critical distance to the existing bike-sharing system stations

d_{kj}= Distance between the existing bike-sharing system station and the potential station

Decision Variables;

$$z_i = \begin{cases} 1, \text{if demand node i is covered by at least one station} \\ 0, otherwise \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1, \text{if a station is established at candidate sites j} \\ 0, otherwise \end{cases}$$

$$Y_{kj} = \begin{cases} 1, \text{if } d_{kj} \text{ is greater than the critical distance between the existing station k and potential sites } j \\ 0, otherwise \end{cases}$$

Mathematical Model;

$$Max\ Z = \sum_i w_i * z_i \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (20)$$

$$z_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j \quad \forall_i \in I \quad (21)$$

$$x_j \leq Y_{kj}, \forall_j \in J, \forall_k \in K \quad (22)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall_j \in J \quad (23)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \forall_i \in I \quad (24)$$

$$Y_{kj} \in \{0,1\}, \forall_j \in J, \forall_k \in K \quad (25)$$

Eq. (19) is the objective function that maximizes the population served. Eq. (20) restricts the maximum number of stations that can be opened. Eq. (21) provides service to a neighborhood, at least one station must be opened within acceptable distance limits. Eq. (22) ensures that the new stations to be opened are at a certain distance from the existing stations. Eq. (23-25) determine the type of decision variables.

The problem has been solved for neighborhoods whose information is given in the Appendix. Due to budget constraints, the municipality intends to open only three out of the 10 alternative stations. Based on expert consultations, the model incorporates the condition that newly established stations must be at least 500 meters away from existing stations (T = 500). Additionally, the maximum distance that residents are willing to walk to use the BSS (accepted service distance) has been determined as 1000 meters (S = 1000). The model has been solved using GAMS-CPLEX on a PC with 12th Gen Intel(R) Core (TM) i7 in less than one CPU second. In the optimal solution, 146,813 residents are covered by the opened Alt_7, Alt_8, and Alt_10 BSS stations.

3.5. Scenario Analysis

In this section, scenario analyses have been conducted to examine the model's behavior under different values of S. To assess the model's sensitivity to parameter changes, the T value has been considered at 500 meters, while S has been varied between 500 and 2000 meters, generating 9 different scenarios. The covered population for each scenario has then been compared. This comprehensive scenario analysis enabled us to examine the robustness of the solution and to determine the impact of key parameter variations on the optimal site selection outcomes. The results are presented in Table 13.

Table 13. Results of the Scenarios

Scenario	S	Covered Population	Decided to be opened stations
1	500	16,033	Alt_1, Alt_6, Alt_8
2	700	38,854	Alt_1, Alt_6, Alt_8
3	900	132,403	Alt_6, Alt_8, Alt_10
4	1000	146,813	Alt_7, Alt_8, Alt_10
5	1200	174,310	Alt_7, Alt_8, Alt_10
6	1300	195,800	Alt_6, Alt_8, Alt_10
7	1500	202,324	Alt_6, Alt_8, Alt_10
8	1700	205,724	Alt_6, Alt_7, Alt_10
9	2000	264,033	Alt_6, Alt_7, Alt_10

As the acceptable service distance (S) increases, the value of the optimum solution generally increases. This indicates that allowing a greater coverage distance enables more residents to be included within the coverage area of selected stations. It should be noted that the higher the S value, the lower the level of service, even though the number of residents covered increases.

4. Discussion and Conclusion

The transportation sector plays a pivotal role in ensuring urban sustainability, underscoring the importance of implementing environmentally friendly mobility solutions. Among these, Bike-Sharing Systems (BSS) have emerged as viable alternatives to conventional modes of transportation, particularly due to their potential to reduce greenhouse gas emissions and promote healthier lifestyles. However, a critical factor influencing the success and long-term sustainability of BSS lies in the strategic selection of station locations, which directly affects system accessibility, usage frequency, and public acceptance.

This study proposed a hybrid, data-driven framework that integrates Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) and spatial optimization techniques to determine optimal station locations for BSS deployment. By systematically identifying 17 evaluation criteria and 10 candidate sites based on expert input and literature review, the study applied the IDOCRIW method for weighting the criteria. The results revealed that proximity to bicycle lanes, proximity to tram stops, and the percentage of young population were the most influential factors, while proximity to cinemas, theaters, and libraries played a comparatively minor role. Subsequently, the CoCoSo method was used to rank the alternatives, highlighting Alt_9 and Alt_1 as the most suitable sites. These findings were further validated through TOPSIS, ARAS, and COPRAS methods and the Borda Count method was employed to aggregate rankings under the framework of group decision-making theory. The consistency of the results across multiple methods confirmed the robustness of the proposed evaluation process. In the second stage, the study incorporated the Maximal Covering Location Problem to enhance spatial coverage efficiency under real-world constraints. Among the top six alternatives identified through MCDM, only three could be selected due to budgetary limitations. An additional spatial constraint (minimum 500-meter distance from existing stations) was imposed. Scenario-based analyses were conducted to assess how different service distance thresholds would affect the total covered population. The analysis revealed that with a service distance of 2000 meters, the total covered population increased to 264,033, and the optimal locations shifted to Alt_6, Alt_7, and Alt_10. These findings provide practical insights for local governments to design flexible and responsive BSS expansion strategies under varying policy scenarios. This research presents several strengths. First, it offers a methodologically rigorous and replicable approach that combines objective weighting and robust evaluation techniques. Second, it addresses spatial realism by integrating urban context-specific constraints, and third, it proposes a novel application of MCLP with service distance flexibility, which enhances practical relevance. However, the study also has limitations. It does not account for temporal dynamics such as seasonal effects, weather conditions, and peak commuting hours, which can significantly influence user behavior. Additionally, although demographic and infrastructure-related indicators were used, individual user preferences and real-time data were not incorporated into the model.

Future research could address these limitations by incorporating time-series data, user mobility patterns, and weather-dependent usage statistics. Moreover, integrating agent-based simulations, machine learning algorithms, or AI-driven predictive models could enable dynamic decision-making that reflects real-time system needs and behavioral tendencies. Finally, applying the proposed framework to larger datasets across different cities could further validate its generalizability and support the development of context-specific sustainable mobility

solutions. In conclusion, this study not only contributes to literature through its methodological innovation but also provides valuable policy guidance for municipalities seeking to implement data-informed, sustainable, and user-centric BSS planning frameworks.

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the Higher Education Council for awarding the 100/2000 Scholarship and extend our appreciation to the authorities at Kayseri Transportation Inc. for their invaluable support.

References

[1] Knudsen C, Moreno E, Arimah B, Otieno R, Ogunsanya O, Arku G and Leck H 2020. World cities report 2020: The value of sustainable Urbanization. United Nations, *United Nation Human Settlements Programme*.

[2] Bank W. Cities and Climate Change: An Urgent Agenda. 2010. Available Online: Openknowledge. Worldbank. Org.

[3] Bai X, Shi P and Liu Y 2014. Society: Realizing China's Urban Dream. Nature, 509(7499), 158-160. https://doi.org/10.1038/509423a

[4] Abubakar I R and Dano U L 2020. Sustainable Urban Planning Strategies for Mitigating Climate Change in Saudi Arabia. *Environment, Development and Sustainability*, 22(6), 5129-5152. https://doi.org/10.1007/s10668-019-00417-1

[5] Bauman A, Crane M, Drayton B A and Titze S 2017. The Unrealised Potential of Bike Share Schemes to Influence Population Physical Activity Levels–A Narrative Review. Preventive Medicine, 103, S7-S14. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2017.02.015

[6] Tiwari A and Sharma P 2024. Preference-based grey theory model and its application in waste disposal selection: a case study. *Sādhanā,* 49(1), 64. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02413-8

[7] Fontaine P, Minner S and Schiffer M 2023. Smart And Sustainable City Logistics: Design, Consolidation and Regulation. *European Journal of Operational Research*, 307(3), 1071-1084. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.09.022

[8] Demaio P 2009. Bike-Sharing: History, Impacts, Models of Provision and Future. *Journal Of Public Transportation*, 12(4), 41-56. https://doi.org/10.5038/2375-0901.12.4.3

[9] CSB. 2024. Environmental indicators. Retrieved https://www.csb.gov.tr/ (Access date, 07.02.2024).

[10] Caulfield B, O'Mahony M, Brazil W and Weldon P 2017. Examining Usage Patterns of a Bike-Sharing Scheme in A Medium Sized City. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 100, 152-161 https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.04.023

[11] Zhao P, Yuan D and Zhang Y 2022. The Public Bicycle as A Feeder Mode for Metro Commuters in The Megacity Beijing: Travel Behavior, Route Environment, and Socioeconomic Factors. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(1), 04021064. https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2222911

[12] Rowangould G M and Tayarani M 2016. Effect of Bicycle Facilities on Travel Mode Choice Decisions. *Journal of Urban Planning and Development*, 142(4), 04016019. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000341 4

[13] Wang Y, Liu Y, Ji S, Hou L, Han S S and Yang L 2018. Bicycle Lane Condition and Distance: Case Study of Public Bicycle System in Xi'an, China. Journal of Urban Planning and Development, 144(2), 05018001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000436

[14] Glass C, Appiah-Opoku S, Weber J, Jones Jr S L, Chan A and Oppong J 2020. Role of bikeshare programs in transit-oriented development: case of Birmingham, Alabama. *Journal of Urban Planning and Development*, 146(2), 05020002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000567

[15] Chevalier A, Charlemagne M and Xu L 2019. Bicycle Acceptance on Campus: Influence of The Built Environment and Shared Bikes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, 211-235. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.011

[16] Zhao P, Yuan D and Zhang Y 2022. The Public Bicycle as A Feeder Mode for Metro Commuters in The Megacity Beijing: Travel Behavior, Route Environment, and Socioeconomic Factors. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(1), 04021064. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000785

[17] Yılmaz Ş F and Demirel N 2023. Evaluation Of Out-Of-Home Last-Mile Delivery Methods in Terms of Sustainability. International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice, 30(5). 10.23055/ijietap.2023.30.5.9015

[18] Eren E and Katanalp B Y 2022. Fuzzy-Based GIS Approach with New MCDM Method For Bike-Sharing Station Site Selection According to Land-Use Types. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103434. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103434

[19] Xu M, Di Y, Yang H, Chen X and Zhu Z 2023. Multi-Task Supply-Demand Prediction and Reliability Analysis for Docked Bike-Sharing Systems Via Transformer-Encoder-Based Neural Processes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 147, 104015. https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104015

[20] Ebrahimi Z D, Momenitabar M, Nasri A A and Mattson J 2022. Using A GIS-Based Spatial Approach to Determine the Optimal Locations of Bikeshare Stations: The Case of Washington DC. *Transport Policy*, 127, 48-60. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.08.008

[21] Li H, Xing Y, Zhang W and Zhang X 2021. Investigating the Impact of Weather Conditions and Land Use on Dockless Bike-Share Trips in Shanghai, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 147(4), 05021031 https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000728

[22] Zhang Y and Mi Z 2018. Environmental Benefits of Bike Sharing: A Big Data-Based Analysis. *Applied Energy*, 220, 296-301. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.101

[23] Ayan B. Abacıoğlu S and Basilio M P 2023. A Comprehensive Review of the Novel Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making. Information, 14(5), 285. https://doi.org/10.3390/info14050285

[24] Özakin B 2023. A comparative study of the selection of cutting fluids used in machining processes by multi criteria decision making (MCDM) methods. *Sādhanā,* 48(4), 204. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02265-2

[25] Boumaza H, Belhadi S, Yallese M A, Safi K and Haddad A 2022. Optimization of surface roughness, tool wear and material removal rate in turning of Inconel 718 with ceramic composite tools using MCDM methods based on Taguchi methodology. *Sādhanā*, 48(1), 1. https://doi.org/10.1007/s12046-022-02060-5

[26] Goswami S S, Behera D K, Afzal A, Razak Kaladgi A, Khan S A, Rajendran P and Asif M 2021. Analysis of a robot selection problem using two newly developed hybrid MCDM models of TOPSIS-ARAS and COPRAS-ARAS. *Symmetry*, 13(8), 1331. https://doi.org/10.3390/sym13081331

[27] Punetha N and Jain G 2023. Unsupervised sentiment analysis of Hindi reviews using MCDM and game model optimization techniques. *Sādhanā*, 48(4), 195. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02255-4

[28] Meddin R, DeMaio P, O'Brien O, Rabello R, Yu C, Seamon J and Mason J.2020. The meddin bike-sharing world map.4

[29] Luo-Ke. Fuzzy Comprehensive Evaluation in Site Selection of Public Bicycle Stations Based on AHP Method.

[30] Lin J R and Yang T H 2011. Strategic Design of Public Bicycle Sharing Systems with Service Level Constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 47(2), 284-294. https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.004

[31] García-Palomares J C, Gutiérrez J and Latorre M 2012. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*, 35(1-2), 235-246. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.002

[32] Martinez L M, Caetano L, Eiró T and Cruz F 2012. An Optimisation Algorithm to Establish the Location of Stations of a Mixed Fleet Biking System: An Application to The City of Lisbon. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 513-524. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.769

[33] Romero J P, Ibeas A, Moura J L, Benavente J and Alonso B 2012. A Simulation-Optimization Approach to Design Efficient Systems of Bike-Sharing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 646-655. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.782

[34] Ghandehari M, Pouyandeh V H and Javadi M H M 2013. Locating Of Bicycle Stations in The City of Isfahan Using Mathematical Programming and Multi-Criteria Decision-Making Techniques. *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences*, 3(4), 18-26. http://dx.doi.org/10.6007/IJARAFMS/v3-i4/271

[35] Lin J R, Yang T H and Chang Y C 2013. A Hub Location Inventory Model for Bicycle Sharing System Design: Formulation and Solution. *Computers & Industrial Engineering*, 65(1), 77-86. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.006

[36] Deng C, Wang J Y and Zheng W G 2015. Layout Optimizing of Public Bicycle Stations Based on AHP In Wuhan. *Applied Mechanics and Materials,* 737, 896-902. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.006

[37] Frade I and Ribeiro A 2015. Bike-Sharing Stations: A Maximal Covering Location Approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 82, 216-227. https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.014

[38] Lopez Gonzalez L 2016. Optimal Location for Bike Sharing Stations in Downtown Kalamazoo

[39] Pan Y and Dou W 2016. Study on The Site Selection of Stations in Bike-Sharing System. *International Core Journal of Engineering* Vol.2 No.9

[40] Ciancio C, Ambrogio G and Laganá D 2017. A Stochastic Maximal Covering Formulation for A Bike Sharing System. *In Optimization and Decision Science: Methodologies and Applications: ODS*, Sorrento, Italy, September 4-7, 2017 47 (Pp. 257-265). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67308-0_26

[41] Çetinkaya C 2017. Bike Sharing Station Site Selection for Gaziantep. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35(3), 535-543.

[42] Park C and Sohn S Y 2017. An Optimization Approach for The Placement of Bicycle-Sharing Stations to Reduce Short Car Trips: An Application to The City of Seoul. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* 105, 154-166. https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.08.019

[43] Kabak M, Erbaş M, Cetinkaya C and Özceylan E 2018. A GIS-Based MCDM Approach for The Evaluation of Bike-Share Stations. *Journal Of Cleaner Production*, 201, 49-60. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.033

[44] Mete S, Cil Z A and Özceylan E 2018. Location And Coverage Analysis of Bike-Sharing Stations in University Campus. *Business Systems Research: International Journal of The Society for Advancing Innovation and Research in Economy*, 9(2), 80-95. https://doi.org/10.2478/bsrj-2018-0021

[45] Chen H, Cheng T and Zhang Y 2019. Locating Stations in Bike-Sharing Service: A Special Maximal Covering Location Problem. http://newcastle.gisruk.org/proceedings/

[46] Gehrke S R and Welch T F 2019. A Bikeshare Station Area Typology to Forecast the Station-Level Ridership of System Expansion. *Journal Of Transport and Land Use*, 12(1), 221-235 https://www.jstor.org/stable/26911265

[47] Hu Y, Zhang Y, Lamb D, Zhang M and Jia P 2019. Examining And Optimizing the Bicycle Bike-Sharing System–A Pilot Study in Colorado, US. *Applied Energy*, 247, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.007

[48] Jahanshahi D, Minaei M, Kharazmi O A and Minaei F 2019. Evaluation And Relocating Bicycle Sharing Stations in Mashhad City Using Multi-Criteria Analysis. *International Journal of Transportation Engineering*, 6(3), 265-283.

[49] Shu S, Bian Y, Rong J and Xu D 2019. Determining the exact location of a public bicycle station—The optimal distance between the building entrance/exit and the station. *PloS one*, 14(2), e0212478. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212478

[50] Eren E 2020. (Master Of Science Master Thesis). Adana Alparslan Turkes Science and Technology University.

[51] Lee T Y, Jeong M H, Jeon S B and Cho J M 2020. Location Optimization of Bicycle-Sharing Stations Using Multiple-Criteria Decision Making. *Sensors And Materials*, 32(12), 4463-4470. https://doi.org/10.18494/SAM.2020.3125

[52] Salih-Elamin R and Al-Deek H 2021. A New Method for Determining Optimal Locations of Bike Stations to Maximize Coverage in A Bike Share System Network. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(5), 540-553. https://doi.org/10.1139/cjce-2020-014

[53] Alkılınç E, Cenani Ş and Çağdaş G 2021. Bisiklet Paylaşım Istasyonlarının Belirlenmesi: CBS Tabanlı Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 23(2), 471-489 https://doi.org/10.25092/baunfbed.893434

[54] Guler D and Yomralioglu T 2021. Location Evaluation of Bicycle Sharing System Stations and Cycling Infrastructures with Best Worst Method Using GIS. *The Professional Geographer*, 73(3), 535-552. https://doi.org/10.1080/00330124.2021.1883446

[55] Öztaşçi D D, Ünalan G and Ersoy U 2021. Cost-Benefits Analysis of Establishing a Bike-Sharing System Between Başkent University and Koru Metro. Journal of Public Finance Studies, (66), 107-137. https://doi.org/10.26650/mcd2021-989630

[56] Bahadori M S, Gonçalves A B and Moura F 2022. A GIS-MCDM Method For Ranking Potential Station Locations in The Expansion of Bike-Sharing Systems. *Axioms*, 11(6), 263. https://doi.org/10.3390/axioms11060263

[57] Mix R, Hurtubia R and Raveau S 2022. Optimal location of bike-sharing stations: A built environment and accessibility approach. *Transportation research part A: policy and practice*, 160, 126-142 https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.03.022

[58] Qian X, Jaller M and Circella G 2022. Equitable Distribution of Bikeshare Stations: An Optimization Approach. *Journal of Transport Geography*, 98, 103174. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103174

[59] Chai L, Zeng C, Zhao L and Hu J 2023. Location Selection of Shared Bicycle Distribution Points Based on User Demand. IEEE Access, 11, 22629-22636. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3248304.

[60] Zhou J, Guo Y, Sun J, Yu E and Wang R 2022. Review Of Bike-Sharing System Studies Using Bibliometrics Method. *Journal Of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition), 9(4), 608-630 https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.08.003

[61] Eslami V, Ashofteh P S, Golfam P and Loáiciga H A 2021. Multi-Criteria Decision-Making Approach for Environmental Impact Assessment to Reduce the Adverse Effects of Dams. *Water Resources Management*, 35(12), 4085-4110. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02932-1

[62] Zavadskas E K and Podvezko V 2016. Integrated determination of objective criteria weights in MCDM. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(02), 267-283. https://doi.org/10.1142/S0219622016500036

[63] Shannon C E A 1948. Mathematical Theory of Communication. Bell Syst. Tech. J. 27, 379–423 https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x/

[64] Ding Z, Zhu M, Wu Z, Fu Y and Liu X 2018. Combining AHP-Entropy Approach with GIS For Construction Waste Landfill Selection—A Case Study of Shenzhen. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 15(10), 2254. https://doi.org/10.3390/ijerph15102254

[65] Taheriyoun M, Karamouz M and Baghvand A 2010. Development Of an Entropy-Based Fuzzy Eutrophication Index for Reservoir Water Quality Evaluation. *Journal Of Environmental Health Science & Engineering*, 7(1), 1-14. Transport Standardization (23) (2010), P. 61

[66] Ali T, Aghaloo K, Chiu Y R and Ahmad M 2022. Lessons Learned from the COVID-19 Pandemic in Planning the Future Energy Systems Of Developing Countries Using An Integrated MCDM Approach In The Off-Grid Areas Of Bangladesh. *Renewable Energy*, 189, 25-38. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.099

[67] Aktaş N and Demirel N 2021. A Hybrid Framework for Evaluating Corporate Sustainability Using Multi-Criteria Decision Making. *Environment, Development and Sustainability*, 23(10), 15591-15618 https://doi.org/10.1007/s10668-021-01311-5

[68] Hwang C L and Yoon K 1981. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications Springer-Verlag. New York, NY, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3

[69] Wu J, Sun J, Liang L and Zha Y 2011. Determination Of Weights for Ultimate Cross Efficiency Using Shannon Entropy. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5162-5165. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.10.046

[70] Čereška A, Podvezko V and Zavadskas E K 2016. Operating Characteristics Analysis of Rotor Systems Using MCDM Methods. *Studies In Informatics and Control*, 25(1), 59-68.

[71] Ustinovichius L, Zavadskas E K and Podvezko V 2007. Application Of a Quantitative Multiple Criteria Decision Making (MCDM-1) Approach to The Analysis of Investments in Construction. *Control And Cybernetics*, 36(1), 251-268.

[72] Yazdani M, Zarate P, Kazimieras Zavadskas E and Turskis Z 2019. A Combined Compromise Solution (Cocoso) Method for Multi-Criteria Decision-Making Problems. *Management Decision*, 57(9), 2501-2519. https://doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458

[73] Ecer F and Pamucar D 2020. Sustainable Supplier Selection: A Novel Integrated Fuzzy Best Worst Method (F-BWM) And Fuzzy Cocoso with Bonferroni (Cocoso'b) Multi-Criteria Model. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121981. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121981

[74] Hashemkhani Zolfani S, Yazdani M, Ebadi Torkayesh A and Derakhti A 2020. Application Of a Gray-Based Decision Support Framework for Location Selection of a Temporary Hospital During COVID-19 Pandemic. *Symmetry*, 12(6), 886. https://doi.org/10.3390/sym12060886

[75] Leigh C, Peterson J and Chandra S 2009. Campus Bicycle-Parking Facility Site Selection: Exemplifying Provision of An Interactive Facility Map. *In Proceedings of The Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference, Adelaide* (Pp. 389-398).

[76] Wuerzer T, Mason S and Youngerman R 2012. Boise Bike Share Location Analysis. *Community And Regional Planning*

[77] Croci E and Rossi D 2014. Optimizing The Position of Bike Sharing Stations. The Milan Case.

[78] Ekundayo O E 2023. Optimizing Bike-Sharing in Glasgow Using a Multi-Criteria Analysis Approach.

[79] Eren E and Uz V E 2020. A Review on Bike-Sharing: The Factors Affecting Bike-Sharing Demand. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101882. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101882

[80] Hagwall R 2023. Mapping Stockholm's Bike-share Future: A GIS-based Analysis of Bicycle-sharing Stations in Stockholm.

[81] Kayseri Municipality. 2023. Kayseri Population Density In 2022. Retrieved From Https://Cbs.Kayseri.Bel.Tr/ (Access Date: 20.11.2023)

[82] Zavadskas E K and Turskis Z 2010. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and economic development of economy*, 16(2), 159-172. https://doi.org/10.3846/tede.2010.10

[83] Zavadskas E K, Kaklauskas A and Šarka V 1994. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/111916

[84] Borda, J. D. (1781). M'emoire sur les' elections au scrutin. Histoire de l'Acad'emie Royale des Sciences.

[85] Church, R., & Velle, C. R. (1974). The maximal covering location problem. Papers in regional science, 32(1), 101-118. https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x

[86] Ozdemir, S. (2024). Unveiling environmental resilience: A data-driven multi-criteria decision-making approach. Environmental Impact Assessment Review, 108, 107607. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107607

Appendices

Appendix A. Latitude-Longitude and Population for Neighborhoods

Neighbourhood	Latitude- Longitude	Population
Köşk	38.71950555, 35.51655239	24305
Yıldırım Beyazıt	38.72965915, 35.53900303	26221
Fevzi Çakmak	38.73089905, 35.50069996	18282
Esentepe	38.72730214, 35.42303087	18079
Hürriyet	38.71649354, 35.46353909	14841
Erciyesevler	38.73558712, 35.52086609	15301
Alpaslan	38.72801421, 35.51918750	23731
Mevlana	38.70802382, 35.56138269	89989
Bahçelievler	38.68857823, 35.54719064	22821
Kılıçarslan	38.72355930, 35.50386112	9133
Gültepe	38.71623017, 35.50509099	10713
Esenyurt	38.69332760, 35.48971069	21980
Kiçiköy	38.68951314, 35.55703780	5320
Hunat	38.71994542, 35.49533488	3560
Sahabiye	38.72780123, 35.49057548	16296
Gülük	38.71857801, 35.47837230	8353
Selçuklu	38.69455384, 35.47090074	20838
Kazımkarabekir	38.71492238, 35.43478894	12291
Cumhuriyet	38.71955321, 35.48767597	434
Tacattinveli	38.71374702, 35.48643880	6090
Gevhernesibe	38.72427997, 35.48271453	3452
Aydınlıkevler	38.71998800, 35.46965804	10613
Battalgazi	38.70762796, 35.48130103	22141
Erenköy	38.67933492, 35.51804378	12794
Yenidoğan	38.69831447, 35.54856019	27497
Tablakaya	38.69387831, 35.56918577	2462
Germir	38.73387191, 35.55756651	10947
Alsancak	38.74066265, 35.50599397	4079
Osman Kavuncu	38.72915606, 35.44339276	9634
Sanayi	38.72806123, 35.4629570	1145

"This article is derived from the doctoral thesis conducted at Kayseri University under the supervision of Prof. Dr. Oğuz Öcal and Prof. Dr. Neslihan Demirel."

"This study was supported by TÜBİTAK under the 1002 - A (Project No: 125M277)."

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Ölü Deniz Fay Zonu Yesemek Segmenti'nin Morfometrik Analiz Yöntemleriyle Araştırılması

Musa Balkaya*[1]

*[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, KAHRAMANMARAŞ

(Alınış / Received: 27.03.2025, Kabul / Accepted: 16.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Yesemek Segmenti,
Morfometrik analiz,
Drenaj havzası,
Morfotektonik

Öz: Ölü Deniz Fay Zonu'nun (ÖDFZ) Türkiye sınırları içerisindeki segmentlerinden biri olan Yesemek Segmenti, Karasu Havzası'nın doğu kenarını Sakçagöz ile Reyhanlı arasında sınırlayan sol yanal doğrultu atımlı bir faydır. Yaklaşık 110 km uzunluğundaki segment, 3 km genişliğindeki sola sıçramayla birbirinden ayrılan kuzey ve güney bölümlerinden oluşur. Bu çalışmada, Karasu Havzası'nın doğu kesimini kapsayacak şekilde Yesemek Segmenti'nin geçtiği bölgenin morfometrik analizlere dayalı morfotektonik özellikleri ve segmentin davranış biçiminin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Literatürde Karasu Havzası ve Yesemek Segmenti ile alakalı morfometrik analizlere dayalı herhangi bir morfotektonik çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan bu ilk morfometrik analizler kapsamında, Yesemek Segmenti ile ilişkili dağ önlerinde Dağönü Eğriselliği (S_{mf}); drenaj ağı ve havzaları üzerinde ise Vadi Tabanı Genişliğinin-Vadi Yüksekliğine Oranı (V_f), Asimetri faktörü (AF), Hipsometrik Eğri ve İntegral (HI) ve Akarsu Uzunluk - Gradyan İndisi (SL) hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde Yesemek Segmenti'nin Geç Kuvaterner döneminde aktif olduğu, segmentin bölgenin tektonik evriminde ve morfolojik gelişiminde önemli bir rol oynadığı anlaşılmıştır.

Investigation of the Yesemek Segment of the Dead Sea Fault Zone Using Morphometric Analysis Methods

Keywords
Yesemek Segment,
Morphometric analysis,
Drainage basin,
Morphotectonics

Abstract: The Yesemek segment, one of the segments of the Dead Sea Fault Zone (DSFZ) within the borders of Turkey, is a left-lateral strike-slip fault that delimits the eastern edge of the Karasu basin between Sakçagöz and Reyhanlı. The segment is about 110 km long and consists of northern and southern sections separated by a 3 km wide left-slip step-over. The aim of this study is to reveal the morphotectonic characteristics based on morphometric analysis of the region through which the Yesemek segment passes, covering the eastern part of the Karasu basin, and the characteristics of the segment. No morphotectonic study based on morphometric analysis related to Karasu basin and Yesemek segment has been encountered in the literature. Within the scope of these first morphometric analyses, the mountain front sinuosity (S_{mf}) was calculated in the mountain fronts related to the Yesemek segment. Valley floor width-to-height ratio (V_f), basin asymmetry factor (AF), hypsometric curve and integral (HI), and stream gradient index (SL) were calculated on the drainage network and basins. As a result of the calculations, it was understood that the Yesemek segment was active during the Late Quaternary period and that the segment played an important role in the tectonic evolution and morphological development of the region.

*İlgili Yazar, email: musabalkaya@ksu.edu.tr

1. Giriş

Depremler, tarih boyunca insanoğlunun süregelen yaşamını ve yaşam ortamını etkileyen başlıca doğa olaylarından biri olmuştur. Bu doğa olayı, sosyal hayatı şiddetli derecede etkileyecek şekilde insanın yaşadığı çevrede meydana geldiği zaman olay olmaktan çıkıp doğal afete dönüşmektedir. Ülkemiz nüfusunun önemli bir bölümünü barındıran yerleşim yerleri büyük deprem üretme potansiyeline sahip diri fayların üzerinde veya yakınında konumlanmıştır. Çalışma konusu olarak seçilen bölgede, Afrika-Arabistan ve Avrasya levhalarının hareketleri sonucu oluşan Güneydoğu Anadolu Bindirme Kuşağı, Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) gibi yüksek deprem potansiyeline sahip aktif deformasyon zonları bulunmaktadır. Bu deformasyon zonlarının morfotektonik özelliklerinin iyi bir şekilde bilinmesi sayesinde fayların davranış biçimleri daha iyi anlaşılabilmektedir.

Karasu Havzası'nın doğu kesimi, Kurt Dağları'nın batı kesimi ve bu iki jeomorfolojik yapı arasında bir nevi sınır olacak şekilde uzanan ÖDFZ Yesemek Segmenti'ni kapsayan bölge, bu çalışmanın inceleme alanı olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Önceki çalışmalarda birçok kaynakta Doğu Hatay Fayı olarak geçen inceleme alanındaki bu fay [1-5] Duman ve Emre [6] tarafında ÖDFZ Yesemek Segmenti olarak adlandırılmış olup bazı güncel kaynaklarda da bu isimle kullanılmıştır [Örn. 7-9]. İnceleme alanı ve yakın çevresinde mevcut birçok aktif fay bulunduğundan herhangi bir karışıklığa mahal vermemek için bu çalışmada faylar isimlendirilirken Duman ve Emre [6] tarafından kullanılan isimlendirme baz alınmıştır (Şekil 1b).

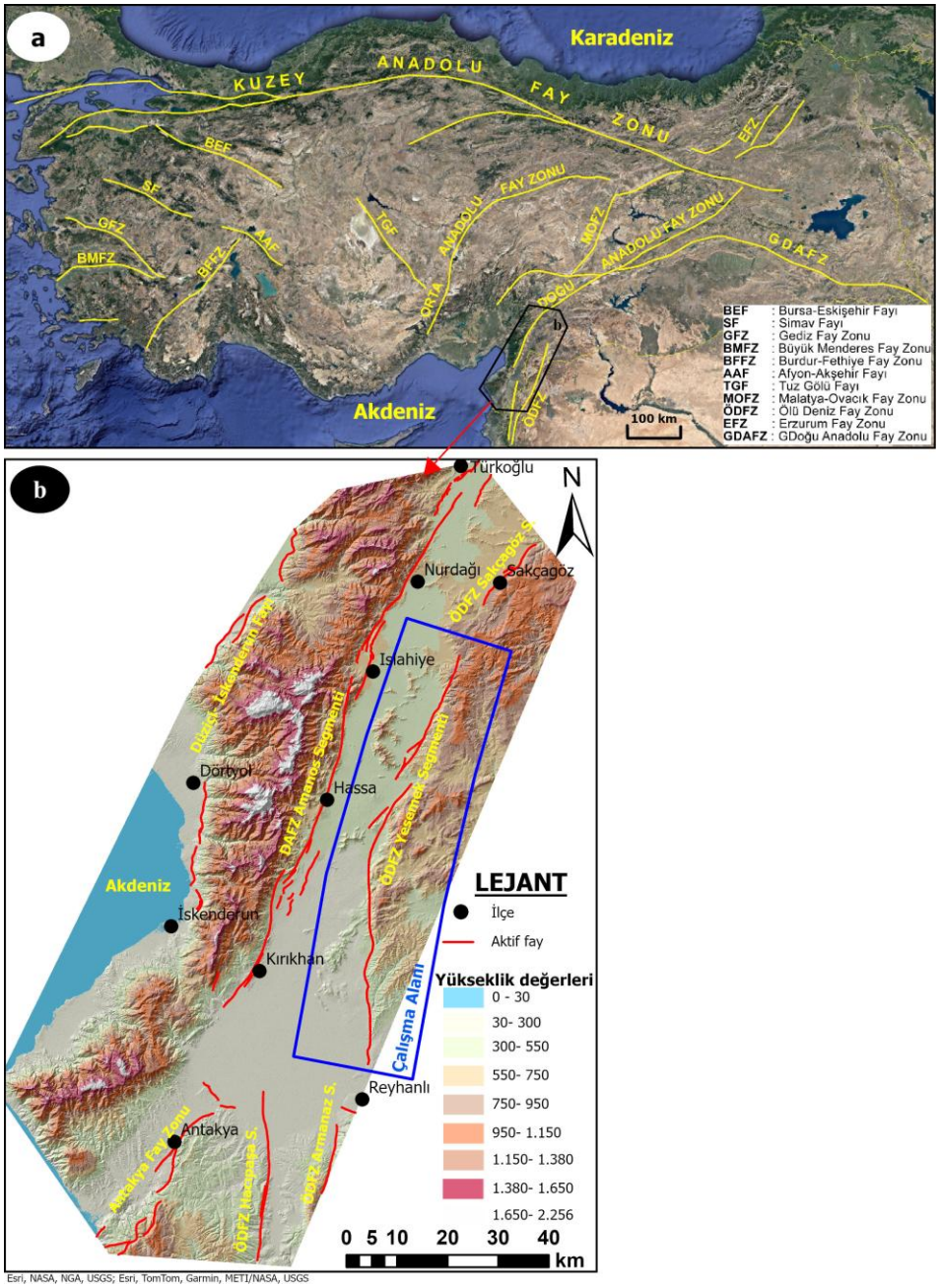
1.1. Yesemek segmenti ve yakın çevresinin tektonik özellikleri

Ölü Deniz Fay Zonu: Doğu Akdeniz bölgesinin önemli aktif tektonik yapılarından biri olan sol yanal ÖDFZ, güneyde Kızıldeniz'den kuzeyde Türkiye'nin güneyine kadar uzanmaktadır. Yaklaşık K-G doğrultulu bu fay zonu, Hula Havzası'nın güneyinde genellikle basit bir geometriye sahipken kuzeye doğru farklı kollara ayrılmaktadır. Fay zonunun yaşı ve toplam sol yanal atımı tartışmalıdır. Ancak, ÖDFZ ile ilişkili tektonik deformasyonun Kızıldeniz'deki deniz tabanının yayılmasıyla başladığı ve fay zonundaki toplam kaymanın jeolojik kanıtlara göre güney kesim için yaklaşık 110 km [Örn. 10, 11], kuzey kesim için 70-80 km [Örn. 12] olduğu kabul görmektedir. Önceden yapılan çalışmalar kapsamındaki jeolojik kanıtlar, kinematik modeller, GPS modelleri ve paleosismolojik araştırmalar ÖDFZ boyunca kayma hızının yılda 1 ile 10 mm arasında değiştiğini göstermiştir [10, 13, 12, 14, 15]. ÖDFZ kuzey kesimindeki kayma hızı da tartışılmaktadır. Arazi gözlemleri, yeraltı jeofizik verileri ve GPS verilerine dayanan önceki çalışmalarda, ÖDFZ'nin güney Türkiye'de birkaç fay koluna ayrıldığı ve kayma hızının bu kollar arasında bölündüğü öne sürülmektedir [16-21, 2, 14, 12, 1, 22, 4, 23].

Karasu Havzası: KKD-GGB doğrultulu Karasu Havzası 160 km uzunluğa, 12 km ile 35 km arsında değişen genişliklere sahip olup karmaşık morfotektonik yapılar sergiler. Bu havza, Duman ve Emre [6] tarafından iki kıtasal levhayı ayıran sol yanal Doğu Anadolu ve Ölü Deniz fay zonlarının bağlantısıyla ilişkili bir açılma bendi olarak yorumlanmıştır. Aynı çalışmada Karasu Havzası kuzey, orta ve güney olmak üzere 3 morfotektonik bölüme ayrılarak detaylandırılmıştır. Kuzey kesimi Aksu Nehri ile ilişkili Sağlık ve Narlı ovalarını kapsamaktadır. Sağlık ovası havzanın KB kısmını, Narlı Ovası ise KD kısmını oluşturmaktadır. Orta kısım, ortasında Kuvaterner yaşlı lavlarla sınırlanmış ofiyolitik kayaları açığa çıkaran, dar, doğrusal, tepelik bir aralıktır. Amik Havzası'nı da kapsayan güney kesimi üç bölümün en büyüğüdür. Karasu Havzası'nın doğu kenarının kuzey kesimi, ÖDFZ'nin Narlı ve Sakçagöz segmentleri ile güney kesimi ise bu çalışmanın konusu olan Yesemek Segmenti ile sınırlanmaktadır. Havzanın batı kenarı ise DAFZ'nin Amanos Segmenti ile sınırlanmaktadır. Amanos Dağları'nın doğu kenarı boyunca yaklaşık K30°D doğrultulu olarak uzanan Amanos Segmenti, Duman ve Emre [6] tarafından üç bölüme (Nurdağı, Hassa ve Kırıkhan) ayrılmıştır. Amanos Segmenti yaklaşık 120 km uzunluğunda olup inceleme alanının batısında kalmaktadır.

ÖDFZ Yesemek Segmenti: ÖDFZ'nin Türkiye sınırları içerisindeki segmentlerinden biri olan Yesemek Segmenti, Karasu Havzası'nın doğu kenarını Sakçagöz (Nurdağı, Gaziantep) ile Reyhanlı (Hatay) arasında sınırlayan sol yanal doğrultu atımlı bir faydır. Yaklaşık 110 km uzunluğundaki segment, Duman ve Emre [6] tarafında 3 km genişliğindeki sola sıçramayla iki bölüme ayrılmıştır. 57 km uzunluğundaki güney bölümü boyunca Holosen akarsularının sistematik sol yanal ötelenmeleri, çizgisel bazalt çıkışları, sıcak su çıkışları ve volkanik koniler bulunmaktadır. Fay, Yalankoz'un (Şehitkâmil, Gaziantep) kuzeydoğusunda Kuvaterner yaşlı volkanitleri kesmektedir. K35°D gidişli 54 km uzunluğundaki kuzey kesim, drenaj ağları ile uzamış sırtları öteleyerek ofiyolitik bir araziden geçmektedir. Bu bölümün kuzey ucu engebeli bir arazide uzanmakta olup fayı arazide takip etmek oldukça zordur. Bölümün geri kalan kısmında fay boyunca travertenler ve Holosen fay sarplıkları yaygındır [6]. Karabacak [24] ile Karabacak ve arkadaşları [22] tarafından yapılan çalışmalarda; Yesemek Segmenti'nin olduğu kesimde, Karasu Havzası doğu kenarının Türkiye-Suriye sınır bölgesindeki askeri yasaklı alanda kaldığı için yeteri kadar incelenemediği, yaklaşılabilen yerlerde uzaktan yapılan gözlemler neticesinde bu uzanım boyunca Karasu

Havzası doğu yamaçlarında herhangi bir diri faylanma belirtisi gözlenmediği belirtilmiştir. Ancak fayın aktif olduğuna dair bölgede yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan Duman ve Emre [6] tarafından yapılan çalışmada muhtelif yerlerde fay boyunca nehir kanallarında ve muhtemelen Son Buzul-Holosen döneminde gelişen alüvyon yelpazelerinde kümülatif 30-40 m ötelenmeler ölçüldüğü, özellikle Karakaya'nın (Islahiye, Gaziantep) yaklaşık 2 km kuzeyinde alüvyon içerisindeki bir dere yatağında 40 m sola ötelenme olduğu belirtilmiştir. Seyrek ve arkadaşları [23] tarafında yapılan çalışmada aynı noktada (Karakaya'nın kuzeyi) genç alüvyon yelpazesine oyulmuş olan küçük bir derenin Yesemek Segmenti tarafından 37 m sola ötelendiği ve bunun fayın aktifliğine dair bir kanıt olduğu ileri sürülmüştür.



Şekil 1. a) Basitleştirilmiş aktif tektonik fay haritası üzerinde inceleme alanı ve yakın çevresinin konumu (Balkaya ve arkadaşlarından [25] değiştirilerek alınmıştır). b) Çalışma alanı ve yakın çevresini gösteren SYM. Aktif faylar Duman ve Emre'den [6] basitleştirilmiştir.

Yesemek Segmenti'nin kayma hızına ilişkin yapılan bazı çalışmalarda; Westaway [1] yılda yaklaşık 2,5 mm, Seyrek ve arkadaşları [4] yılda yaklaşık 2,7 mm kayma hızına işaret etmektedirler. Duman ve Emre [6] Geç Kuvaterner-Holosen dönemindeki ötelenmelere dayanarak 1,5-2 mm/yıllık bir kayma hızı önermektedir. Seyrek ve arkadaşları [23], Karakaya kuzeyindeki 37 m sol yanal ötelenmeye dayanarak Yesemek Segmenti'ndeki kısa bir zaman ölçeğinden (en geç Pleyistosen sonrası) türetilmiş sol yanal kayma oranına ilişkin en iyi tahminlerinin yılda yaklaşık 2,5 mm olduğunu belirtmişlerdir.

İnceleme alanı içerisinde (Amanos ve Yesemek segmentleri arasında) meydana geldiği düşünülen 13 Ağustos 1822 depreminin [26, 27] Amanos ve Yesemek segmentlerinden hangisi üzerinde meydana geldiği konusu tartışılmaktadır. Güncel bazı çalışmalarda depremin Amanos Segmenti'nden ziyade Yesemek Segmenti tarafından üretildiği belirtilmektedir [Örn. 6, 7, 9]. Duman ve Emre [6], 1822 tarihsel depreminin Yesemek Segmenti üzerinde meydana geldiğini ve büyüklüğünün de M=7,5 olabileceğini ileri sürmektedirler. Liang ve arkadaşları [9] tarafından yapılan çalışmada, 1822 depreminin, 2023'te kırılan Amanos Segmenti'nden ziyade Yesemek Segmenti'nde meydana geldiği ve Yesemek Segmenti'nde birikmiş stresin 1822 yılında serbest kaldığı varsayılmıştır. Buna dayanarak 2023 depremlerindeki kırılmanın ve artçı şoklarının Narlı Segmenti'nden güneye doğru uzamasının engellenmiş olabileceği ileri sürülmektedir [7, 9]. Bununla birlikte Wang ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada, 2023 Kahramanmaraş depremlerinin Yesemek Segmenti dâhil yakın çevresindeki birçok fay üzerinde pozitif bir Coulomb stres etkisi ortaya çıkardığı ve bu bölgelerde artan sismik tehlikenin devam ettiği ileri sürülmektedir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalardan, fay boyunca oluşmuş aktivitelerin yeryüzünde farklı jeomorfolojik izler bıraktığı anlaşılmaktadır [28]. Bu izlerin anlamlandırılmasında en çok kullanılan yöntemlerden biri morfometrik analizlerdir. Yapılan literatür taramaları neticesinde, Karasu Havzası'nın morfotektonik özellikleri ile alakalı sadece bir çalışmaya rastlanmıştır. Ege [29] tarafından yapılan bu çalışmada, Karasu Havzası'nı de kapsayacak şekilde Antakya-Kahramanmaraş çöküntü alanının fay morfolojisinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Araştırmada, bu makale kapsamında yapılan morfometrik analizlerin hiçbiri kullanılmamıştır. Sonuç olarak, literatürde Karasu Havzası ve ÖDFZ Yesemek Segmenti ile alakalı morfometrik analizlere dayalı herhangi bir morfotektonik çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada yapılan morfometrik analiz çalışmalarıyla, Karasu Havzası'nın doğu tarafını sınırlayan Yesemek Segmenti'nin Geç Kuvaterner aktivitesi, fayın bölgenin morfolojik gelişimindeki etkisi ve Kurt Dağları'nın yükselimi hakkında bilgi üretilerek literatüre önemli bir katkı sağlanmış olacaktır. Uzaktan algılamaya dayalı yapılan bu ilk morfometri temelli çalışma neticesinde, inceleme alanının jeomorfolojik evrimi ve bu evrim üzerinde tektonizmanın etkisi hakkında verilen bilgilerle özgün bir değer ortaya konulmuştur. Ayrıca Yesemek Segmenti'yle ilişkili dağönleri, vadiler ve drenaj ağları üzerinde farklı morfometrik yöntemlerle yapılan hesaplamalar neticesinde aktif fay-morfoloji ilişkisinin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Herhangi bir fay zonu ve yakın çevresinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi ve morfometrik analizlerinin yapılabilmesi için, fay zonu ve yakın çevresini kapsayan 1/25.000 ölçekli sayısal topoğrafik paftaların 10 m çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli'nin (SYM) oluşturulması gerekmektedir. Bununla birlikte bazı uluslararası veri indirme platformlarından 12,5 m (Alos Palsar) veya 30 m (Landsat) çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri indirilerek de SYM oluşturulabilmektedir. Makale kapsamındaki morfometrik analiz çalışmaları, inceleme alanını kapsayacak şekilde 12,5 m çözünürlüğe sahip Alos Palsar verilerinden oluşturulan SYM verilerinin https://search.asf.alaska.edu/#/ internet adresinden indirilmesi ile başlamıştır [30]. İndirilen bu veriler üzerinde ArcGIS Pro yazılımı yardımıyla çeşitli veri-işlem adımları izlenmiş, SYM'deki boşluklar enterpolasyon yapılarak (Tool-Fillsinks) doldurulmak suretiyle homojen bir veri elde edilmiştir. Ardından inceleme alanının gölgelendirme haritası (Hill-Shade) hazırlanmış olup Yesemek Segmenti ve yakın çevresindeki aktif faylar Duman ve Emre [6]'den basitleştirilerek alınmış ve haritaya eklenmiştir (Şekil 1b). Bundan sonra ArcGIS Pro yazılımı kapsamındaki ArcHydro Tools vasıtasıyla, SYM üzerinde bölgenin drenaj havzaları ve akarsu ağı belirlenmiş olup morfometrik analiz çalışmalarına altlık hazırlanmıştır.

Çalışma alanındaki dağ önlerinde Dağönü Eğriselliği (S_{mf}); drenaj ağı ve havzaları üzerinde ise Vadi Tabanı Genişliğinin-Vadi Yüksekliğine Oranı (V_f), Asimetri Faktörü (AF), Hipsometrik Eğri ve İntegral (HI), Akarsu Uzunluk - Gradyan İndisi (SL) gibi morfometrik indis hesaplamaları yapılarak bölgenin jeomorfolojik evrimi ve bu evrim üzerinde tektonizmanın etkisi hakkında bilgi edinilmiştir. Çalışma kapsamında ağırlıklı olarak ArcGIS Pro kullanılmış olup bu bilgisayar yazılımının sahip olduğu farklı algoritmalar vasıtasıyla hesaplanan morfometrik indislerin ayrıntıları aşağıda açıklanmıştır.

2.1. Dağönü eğriselliği (S_{mf})

Dağönü eğriselliği indisi, tektonik olarak aktif dağ önleri ile aktif olmayan dağ önlerini ayırt etmekte kullanılan etkili yöntemlerden biri olup $\mathbf{S_{mf} = L_{mf}/L_s}$ eşitliği ile hesaplanmaktadır [28]. Burada, L_{mf} dağönü boyunca ani topografya değişimi ile oluşan çizgiselliğin toplam uzunluğu, L_s ise dağönünün düz bir çizgi boyunca uzunluğundan ibarettir (Şekil 2a). Bu indis dağönü boyunca meydana gelen tektonik aktivitenin oranını ölçmek için kullanılmaktadır [28]. Bull [31] tarafından yapılan çalışmada S_{mf} değerlerinin 1,4'ten küçük olması durumunda düşük, 1,4 ile 3 arasında olması durumunda ise orta derece olduğu ifade edilmiştir. Keller ve Pinter [28] tarafından yapılan çalışmada, düşük ve orta dereceli S_{mf} değerlerinin yüksek tektonik aktiviteye sahip dağ önlerinin bir göstergesi olduğu belirtilmiştir.

2.2. Vadi tabanı genişliğinin – vadi yüksekliğine oranı (V_f)

Bu indis, yüksek V_f değerlerine sahip U-şekilli (düz tabanlı) vadiler ile nispeten düşük V_f değerlerine sahip V-şekilli vadiler arasındaki farklılıkları gözler önüne seren bir jeomorfik indistir [28]. Bir bölgede meydana gelen tektonik yükselme hızının anlaşılmasında yaygın olarak kullanılan bir indis olan V_f, $\mathbf{V_f=2.V_{fw}/[(E_{ld}-E_{sc})+(E_{rd}-E_{sc})]}$ formülü ile hesaplanmaktadır [28]. Bu formüldeki V_{fw} vadi tabanının genişliğini, E_{ld} vadinin sol su bölümü çizgisi yükseklik değerini, E_{rd} vadinin sağ su bölümü çizgisi yükseklik değerini ve E_{sc} vadi tabanı kotunu göstermektedir (Şekil 2b). Birçok çalışma neticesinde elde edilen indislere göre V_f değerleri 3 sınıfa ayırılmaktadır [32-34]. Bu ve benzer çalışmalarda; V_f indisinin 0,5 ten düşük olması durumunda tektonik aktivitenin fazla olduğu (Sınıf 1), V_f indisinin 0,5 ile 1 arasında olması durumunda tektonik aktivitenin orta seviyede olduğu (Sınıf 2) ve V_f değerinin 1'den fazla olması durumunda tektonik aktivitenin düşük seviyede olduğu (Sınıf 3) belirtilmiştir.

2.3. Asimetri faktörü (AF)

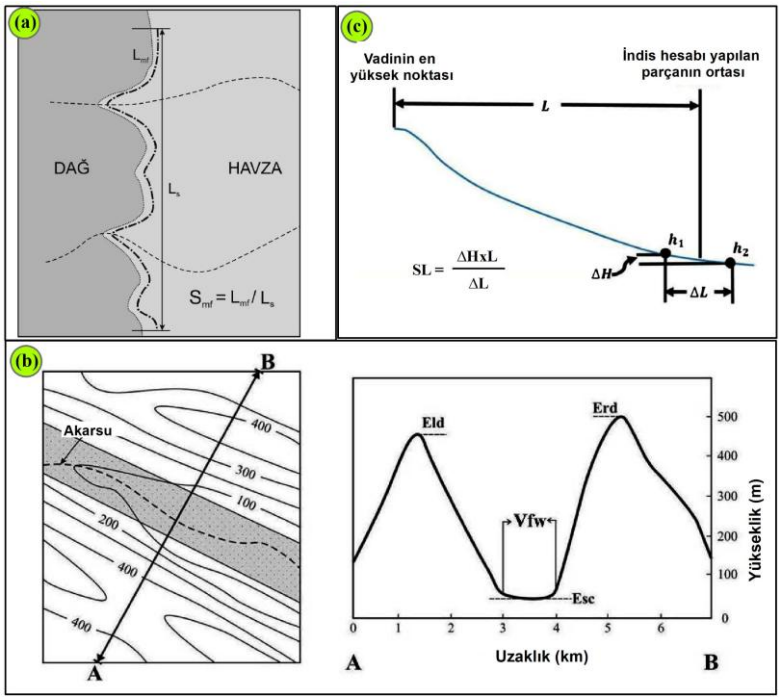
Drenaj havzalarında akışa dik bir doğrultu boyunca tektonik eğimlenme (tiltlenme) sınıfının belirlenmesi amacı ile uygulanan bir yöntem olup AF değeri $\mathbf{AF=100.(A_r/A_t)}$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada A_r, drenaj havzasının akış yönünde bakılırken ana derenin sağında kalan alanı, A_t ise drenaj havzasının toplam alanını temsil etmektedir [28]. AF değerinin 50 civarında olması, havzada herhangi bir eğimlenme olmadığı dolayısıyla havzayı etkileyen bir tektonizmanın bulunmadığını gösterir. Bu değerin 50 den uzaklaşması havzanın asimetrik bir yapı kazandığını gösterir ve bu durum havzanın tektonik olarak aktif olduğu anlamına gelir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda [33, 35, 36, 34, 37] AF değerlerinin 50 den uzaklığına bağlı olarak 3 tektonik sınıf belirlenmiştir. Buna göre mutlak değer içinde AF indisinden 50 çıkardığımızda sonuç 15 ve üzeri ise bölgenin tektonik olarak Sınıf 1 (yüksek tektonik aktivite ve eğimlenme), sonuç 7-15 arasında ise Sınıf 2 (orta seviye tektonik aktivite ve eğimlenme), sonuç 7'den küçük ise Sınıf 3 (düşük derecede tektonik aktivite ve eğimlenme) olarak yorumlanabileceği belirtilmiştir.

2.4. Hipsometrik eğri ve integral (HI)

Hipsometrik eğri, bir bölgede bulunan drenaj alanından kot farklılıkları olan havzaların evrim süreci ve arazinin aşınımı hakkında bilgi vermektedir [38]. Bu hesaplamalar ile farklı büyüklüklerdeki drenaj havzaları birbirleri ile karşılaştırılabilmektedir. Dışbükey hipsometrik eğriler nispeten genç, zayıf erode olmuş (erozyona uğramış) alanlara işaret ederler. S-şekilli eğriler orta derecede erode olmuş bölgeleri, içbükey eğriler ise nispeten eski, yüksek derecede erozyona uğramış bölgeleri temsil ederler [28]. Havzanın yükseklik değerlerinin dağılımı ile hesaplanan hipsometrik integral, gerçek manada hipsometrik eğrinin altında kalan alanı tanımlamaktadır. HI değeri $\mathbf{HI=(h_{ort}-h_{min})/(h_{mak}-h_{min})}$ formülü ile bulunmaktadır. Burada, h_{ort} havzanın ana akış sisteminin ortalama yüksekliğini, h_{min} ve h_{mak} sırasıyla minimum ve maksimum yükseklikleri ifade etmektedir [28]. Bazı çalışmalarda hipsometrik integral değerlerinin; 0,5'ten büyük olduğu zaman (HI>0,5) genç havzaları ifade ettiği, 0,3'ten küçük (HI<0,3) olması durumunda havzanın yaşlı olduğuna işaret ettiği, 0,3 ile 0,5 arasında (0,3<HI<0,5) olmasının ise havzanın oluşumunu tamamladığına işaret ettiği belirtilmiştir [Örn. 39].

2.5. Akarsu uzunluk - gradyan indisi (SL)

Bu indis, akarsu vadilerinde akış kanalı boyunca muhtemel tektonik aktivite, kayaç direnci ve topografya arasındaki ilişkileri değerlendirmek için kullanılır. SL indisi, $\mathbf{SL=\Delta HxL/\Delta L}$ formülü ile (Şekil 2c) hesaplanmaktadır [40, 28]. Burada SL: akarsu uzunluk-gradyan indisini, ΔH: Kanal yüksekliğindeki değişimi, ΔL: Ölçülen kısmın kanal uzunluğu ve L: İndis hesabı yapılan kesimin orta noktasından vadinin en yüksek noktasına kadar olan mesafenin metre olarak değerini ifade etmektedir [39]. El Hamdouni ve arkadaşları [33] çalışması baz alınarak yapılan birçok çalışmada [Örn. 36, 41] SL indis değerleri sınıf 1 (500<SL), sınıf 2 (300<SL<500) ve sınıf 3 (SL<300) olarak 3 tektonik sınıfa ayrılmıştır. Benzer kaynaklarda SL hesaplamalarında alınan yükseklik aralıkları 100 ile 250 metre arasında değişkenlik göstermektedir [42, 37]. Bu çalışmada hesaplanan vadilerin uzunlukları 3250 ile 19830 metre arasında değişmekte olup nispeten kısa olan bu vadilerdeki SL ölçümü yükseklik aralıkları, ölçülen vadinin uzunluğuna bağlı olarak, 20-60 m arasında alınmıştır. Bu sebepten, büyük vadileri kapsayan çalışmalarda SL indisi tektonik sınıflandırması ile ilgili yukarıda verilen değerlerin yarısı alınarak bu çalışmanın SL değerleri sınıf 1 (250<SL), sınıf 2 (150<SL<250) ve sınıf 3 (SL<150) olmak zere 3 tektonik sınıfa ayrılmıştır.



Şekil 2. Çalışma kapsamında kullanılan indislerden bazılarını gösterir şekil [43].
(a): Dağönü eğriselliğinin hesaplanmasında kullanılan diyagram [28],
(b): V_f hesaplamalarında kullanılan parametreler [28],
(c): Akarsu uzunluk – gradyan indisinin hesaplanmasına dair çizim [40].

3. Morfometrik Analiz Bulguları

Morfometrik analizler, jeomorfolojik süreçlerin ve yeryüzü morfolojisinin gelişiminde etkili olan aktif tektoniğin araştırılmasında kullanılan en önemli yöntemlerdendir [28]. Morfometrik indisler yardımıyla yapılan bu analizler neticesinde elde edilen sayısal veriler, geniş çaplı alanların jeomorfolojik evriminin anlaşılmasında veya buradaki aktif fay segmentlerinden hangisinin daha aktif olduğunun belirlenmesinde kullanılabilmektedir [28, 44-46, 43]. Bu çalışma kapsamında inceleme alanında bulunan drenaj ağı ve havzaları üzerinde dağönü eğriselliği, vadi tabanı genişliğinin-vadi yüksekliğine oranı, asimetri faktörü, hipsometrik eğri ve integral ile akarsu uzunluk - gradyan indisi morfometrik analizleri yapılmıştır. Bu bölümde Karasu Havzası doğu kenarında bulunan 17 alt havzanın analizlerinin yapılması neticesinde elde edilen veriler değerlendirilerek ulaşılan sonuçlar aktarılmış olup bu sonuçların Yesemek Segmenti ile ilişkisi irdelenmiştir.

3.1. Dağ önü eğriselliği (S_{mf})

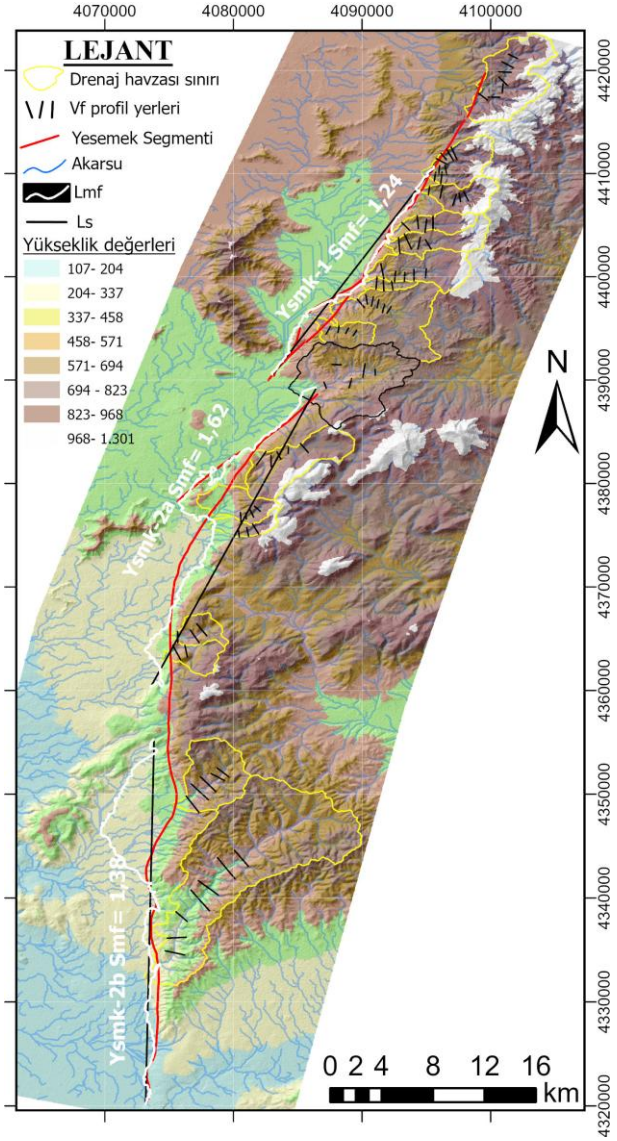
Aktif dağ önlerinde meydana gelen yükselmeler, doğal olarak erozyonal süreçlere karşı baskındır. Dolayısıyla nispeten düz dağ önlerinin olduğu kısımlarda hesaplanan S_{mf} değerleri düşük olur. Tektonik olarak nispeten az aktif dağ önlerinde ise erozyonal süreçler baskın olduğu için düzensiz ya da daha yüksek S_{mf} değerleri gözlenmiştir [28, 32]. İnceleme alanında biri Yesemek Segmenti kuzey bölümünde, ikisi güney bölümünde olmak üzere toplam 3 adet S_{mf} değeri hesaplanmıştır. Karasu Havzası doğu kenarı boyunca uzanan Yesemek Segmenti kuzey bölümünde (Ysmk-1) L_{mf}: 23516 m ve L_s: 18998 m olarak ölçülmüştür. Böylece burada S_{mf} 1,24 olarak hesaplanmıştır. Segmentin güney bölümünde iki ayrı S_{mf} değeri hesaplanmıştır. Yesemek Segmenti orta kesiminde (Ysmk-2a) L_{mf}: 41032 m, L_s: 25348 m ve S_{mf}: 1,62 olarak hesaplanmıştır. Segmentin güney bölümünün güney kesiminde ise (Ysmk-2b) L_{mf}: 39111 m, L_s: 28273 m olarak ölçülmüş olup S_{mf}: 1,38 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Yesemek Segmenti boyunca hesaplanan düşük (Ysmk-1 ve Ysmk-2b) ve orta dereceli (Ysmk-2a) Smf değerleri, yüksek tektonik aktiviteye sahip dağ önlerinin bir göstergesi olup buradaki havza gelişiminde erozyonal olaylardan ziyade tektonizmanın etkin olduğunu göstermektedir. Ayrıca S_{mf} değerlerine bakılarak fayın kuzey ve güney kesimlerindeki aktif tektonik etkinin orta kesime nazaran daha yüksek olduğu da söylenebilir.

3.2. Vadi tabanı genişliğinin – vadi yüksekliğine oranı (V_f)

Vadi tabanı genişliğinin - vadi yüksekliğine oranı, bir bölgede meydana gelen tektonik yükselme hızının anlaşılmasında yaygın olarak kullanılan indislerden biridir. Analizler sonucu ulaşılan düşük V_f değerleri "V" şekilli vadilere işaret eder ve bu da bölgede yükselme hızının yüksek olduğunu gösterir. Ulaşılan yüksek V_f değerleri ise

yükselme hızının az olduğunu dolayısıyla bölgede tektonizmanın erozyonal süreçlere göre daha az etkili olduğunu göstermektedir [28, 32].

Bu çalışma kapsamında, dağönleri ile ilişkili akarsu kanallarında V_f değerleri hesaplanarak segmentlerin göreceli aktiviteleri ve yükselme hızlarının tektonik sınıflara ayrılması amaç edinilmiştir. V_f değeri hesaplanırken, daha önce S_{mf} indis hesabı yapılmış dağ önlerinde, her bir vadi için dağ cephesinden başlanarak akış yönünde yaklaşık 350 metrede bir profil alınmıştır (Şekil 3). Bu çerçevede Yesemek Segmenti ile ilişkili 17 drenaj havzasında toplam 80 adet V_f değeri hesaplanmıştır. Her bir vadi için ölçülen V_f değerlerinin ortalaması alınarak 17 vadiden (drenaj havzası) ortalama V_f değerleri elde edilmiştir. Bu değerler ve ilişkili oldukları S_{mf} değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Yesemek Segmenti kuzey bölümü ile ilişkili 9 vadiden elde edilen ortalama V_f değerlerinin 0,31 ile 1,48 arasında değiştiği ve bu bölüm boyunca hesaplanan V_f değerlerinin ortalamasının 0,60 olduğu görülmüştür. Bölümün güney ucundaki küçük bir vadide (D9) V_f değeri 1,48 olarak ölçülmüştür. Bu istisnai durum dışında Yesemek Segmenti kuzey bölümündeki V_f değerleri yüksek (sınıf 1) ve orta seviye (sınıf 2) tektonik aktiviteye işaret etmektedir. Segmentin güney bölümü ile ilişkili vadilerden elde edilen ortalama V_f değerleri 0,41 ile 1,28 arasında değişmektedir (Tablo 1). Güney bölümü boyunca 8 vadide ölçülen V_f değerlerinin ortalaması 0,75 olarak tespit edilmiştir. Yesemek Segmenti güney bölümünün kuzey kesiminde ölçülen 1,28 ve 1,11 değerleri dışındaki tüm vadilerdeki V_f değerleri 1'den küçük olup yüksek (sınıf 1) ve orta seviye (sınıf 2) tektonik aktiviteye işaret etmektedir. Yesemek Segmenti boyunca dağönleri ile ilişkili akarsu kanallarında ölçülen V_f değerlerinin genel olarak segmentin orta kesiminde yüksek olduğu, kuzey ve güney kesimlerde düşük olduğu görülmüştür.

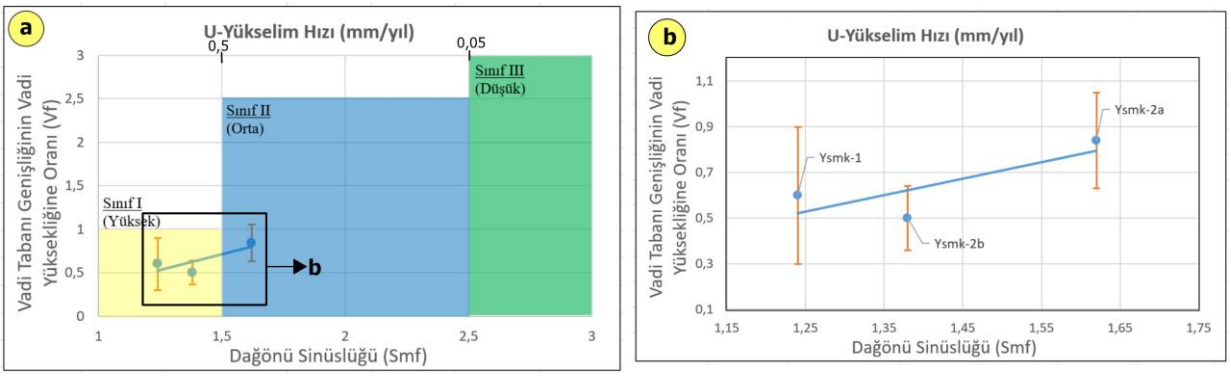


Şekil 3. İnceleme alanındaki dağ önlerinde hesaplanan S_{mf} değerleri ile bunlarla ilişkili vadilerden ölçülen V_f profillerinin SYM üzerindeki lokasyonları.

Tablo 1. Yesemek Segmentiyle ilişkili dağönlerinde hesaplanmış olan S_{mf} değerleri ile vadilerde hesaplanmış ortalama V_f değerleri.

Yesemek Segmenti kuzey bölümü				Yesemek Segmenti güney bölümü			
S_{mf} adı	S_{mf} değeri	Drenaj havzası	V_f ort.	S_{mf} adı	S_{mf} değeri	Drenaj havzası	V_f ort.
Ysmk-1	1,24	D1	0,62	Ysmk-2a	1,62	D10	1,28
		D2	0,31			D11	1,11
		D3	0,32			D12	0,70
		D4	0,40			D13	0,62
		D5	0,34			D14	0,78
		D6	0,52			D15	0,52
		D7	0,59	Ysmk-2b	1,40	D16	0,41
		D8	0,76			D17	0,59
		D9	1,48				

Yapılan bazı çalışmalarda V_f değerleri ile S_{mf} değerleri arasında bir orantı olduğu ve buna bağlı olarak fayların aktiflik derecelerinin belirlenebileceği iddia edilmiştir [47, 32]. Ayrıca S_{mf} ve V_f indislerinin beraber analiz edilmesi sonucu fay bloklarının yükselme hızı hakkında fikir edinilebileceği son yıllarda birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur [Örn. 48]. Bu bilgiler ışığında Yesemek Segmenti'yle ilişkili her bir vadinin ortalama V_f değeri ile aynı kesimin S_{mf} değerleri kıyaslandığında; Yesemek Segmenti kuzey ve güney kesimleri boyunca görülen yükselme ve aktiflik derecesinin, segmentin orta kesimine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum V_f ve S_{mf} arasında oldukça iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir. İnceleme alanından elde edilen S_{mf} ve V_f değerlerinin birlikte analiz edilmesi sonucunda genel olarak Yesemek Segmenti kuzey ve güney kesimlerinin yüksek aktiviteye (Sınıf I) sahip olduğu ve yükselim hızının 0,5 mm/yıldan fazla olduğu, segmentin orta kesiminin (Yskm-2a) ise orta derece aktiviteye (Sınıf II) sahip olduğu ve yükselim hızının yılda 0,5 ile 0,05 mm arasında olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 4).



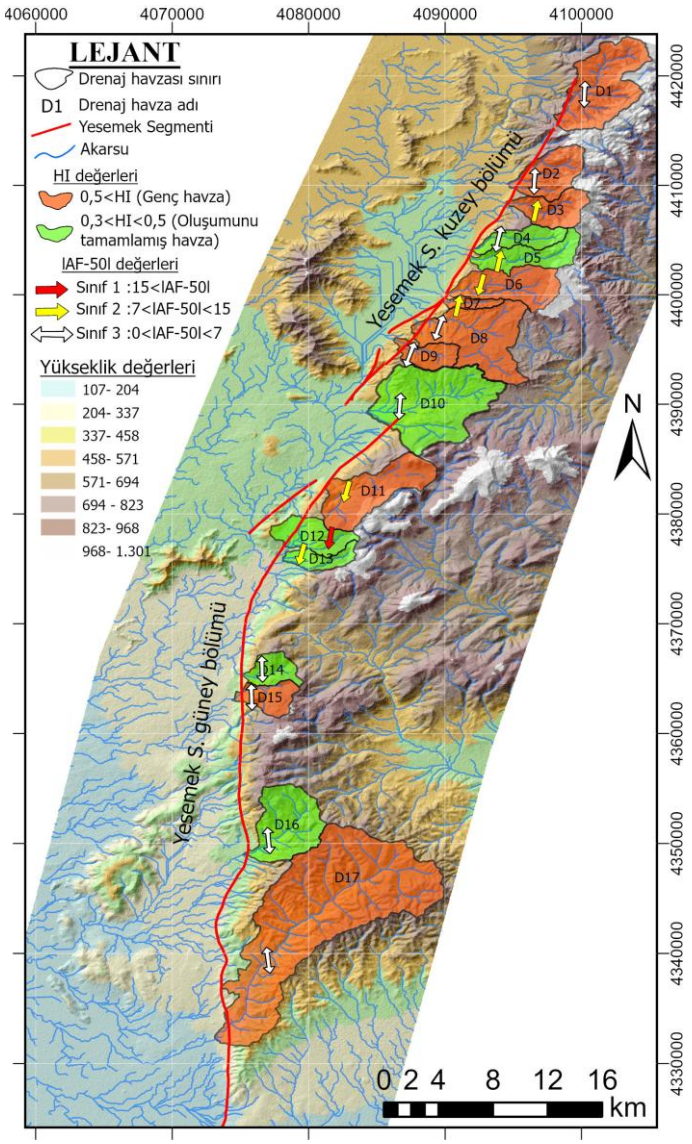
Şekil 4. (a): Rockwell ve arkadaşları [47] tarafından ileri sürülen yükselme oranlarını gösteren grafik. (b): Dağönlerinde hesaplanan S_{mf} ile V_f değerleri arasındaki korelasyonu gösteren grafik.

3.3. Asimetri faktörü (AF)

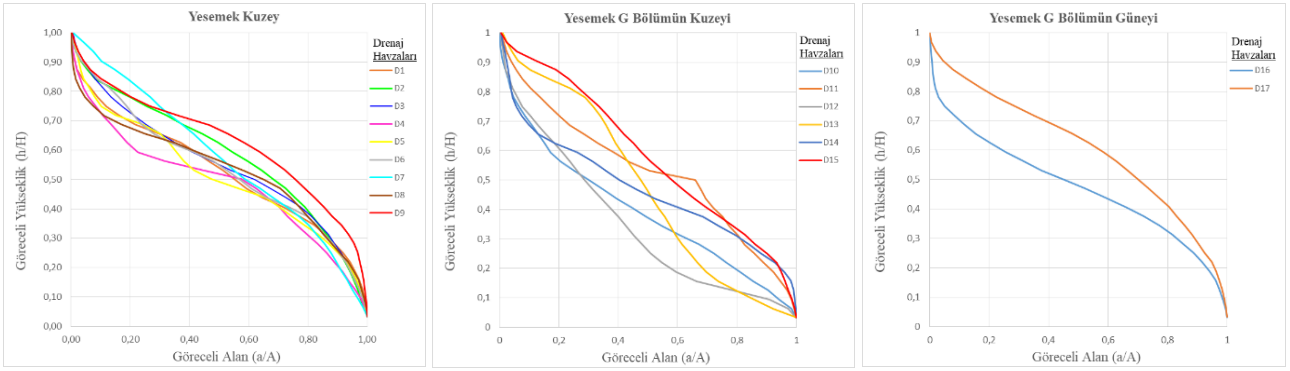
Yesemek Segmenti ile ilişkili 17 drenaj havzasında hesaplanan AF değerleri 39,44 ile 74,21 arasında değişmektedir. Materyal ve Metot kısmında bahsedilen 3 tektonik sınıf baz alınarak yapılan değerlendirmede; AF'nin 50'den farkının (AF-50) mutlak değeri 0-7 arasında değişen D1, D2, D4, D8, D9, D10, D14, D15, D16 ve D17 drenaj havzalarının simetrik oldukları ve düşük derecede tektonik aktivite ve eğimlenmeye (Sınıf 3) sahip oldukları anlaşılmıştır. Değerleri 7-15 arasında değişen D3, D5, D6, D7, D11 ve D13 drenaj havzalarının asimetrik oldukları ve orta seviye tektonik aktivite ve eğimlenmeye (Sınıf 2) sahip oldukları gözlenmiştir. AF değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. AF-50 mutlak değeri 24,21 olarak hesaplanan D12 drenaj havzasının asimetrik olduğu ve yüksek derecede eğimlenmeye (Sınıf 1) sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 5). Ancak D12 dernaj havzası sınırlarının Quaterner çökellerinin yaygın olduğu havza içerisine yayıldığı göz önüne alındığında, bu değerin ortaya çıkmasında tektonik aktivitenin yanında litolojik farklılıktan kaynaklanan erozyonun da baskın bir şekilde etkili olduğu söylenebilir. Yesemek Segmenti ile ilişkili asimetrik drenaj havzalarında eğimlenme yönleri farklılık göstermektedir. Segmentin kuzey bölümünde D3, D5 ve D7 drenaj havzaları KD'ya eğimli iken D6 drenaj havzasının GB'ya eğimli olduğu gözlenmiştir. Segmentin güney bölümü kuzey kesimindeki (Yesemek Segmenti orta kesimi) asimetrik drenaj havzalarının (D11, D12 ve D13) ise GB'ya eğimli olduğu görülmüştür (Şekil 5).

3.4. Hipsometrik eğri ve integral (HI)

Yesemek Segmenti kuzey bölümünde 9, güney bölümünün kuzey kesiminde 6 ve güney bölümünün güney kesiminde 2 adet olmak üzere segmentle ilişkili toplam 17 derenaj havzasının hipsometrik eğri ve integral değerleri hesaplanmış olup değerler Tablo 2'de verilmiştir. Segmentin kuzey bölümü ile ilişkili drenaj havzalarında (D1-D9 nolu havzalar) hesaplanan hipsometrik integral değerleri 0,46 ile 0,60 arasında değişmekte olup en düşük hipsometrik integral değeri D4 nolu, en yüksek değer ise D9 nolu drenaj havzasında hesaplanmıştır (Şekil 5). Bu bölümdeki havzalarda oluşturulan hipsometrik eğrilerin genel olarak dış bükey ve S şekilli olduğu ortaya çıkmıştır. Segmentin güney bölümünde hesaplanan hipsometrik integral değerleri 0,32 ile 0,57 arasında değişmekte olup buradaki hipsometrik eğri şekilleri farklılık göstermektedirler (Şekil 6). Hipsometrik eğrilere ve hipsometrik integral değerlerine bakılarak; Yesemek Segmenti kuzey bölümü ile ilişkili havzaların baskın olarak genç olduğu ve bunların gelişiminde ezozyonal süreçlere nazaran tektonizmanın daha fazla etkili olduğu, segmentin orta kesiminde nispeten daha olgun veya olgunlaşmaya başlamış havzaların bulunduğu söylenebilir. Segmentin güney ucundaki havzanın da genç olduğu, D17 nolu drenaj havzasında elde edilen net dış bükey hipsometrik eğri ve 0,57 hipsometrik integral değeri baz alınarak, söylenebilir (Şekil 6).



Şekil 5. Yesemek Segmenti ile ilişkili drenaj havzalarında hesaplanan AF ve hipsometrik integral değerlerinin SYM üzerinde birlikte gösterimi.



Şekil 6. Yesemek Segmenti ile ilişkili drenaj havzalarında hesaplanan hipsometrik eğri grafikleri.

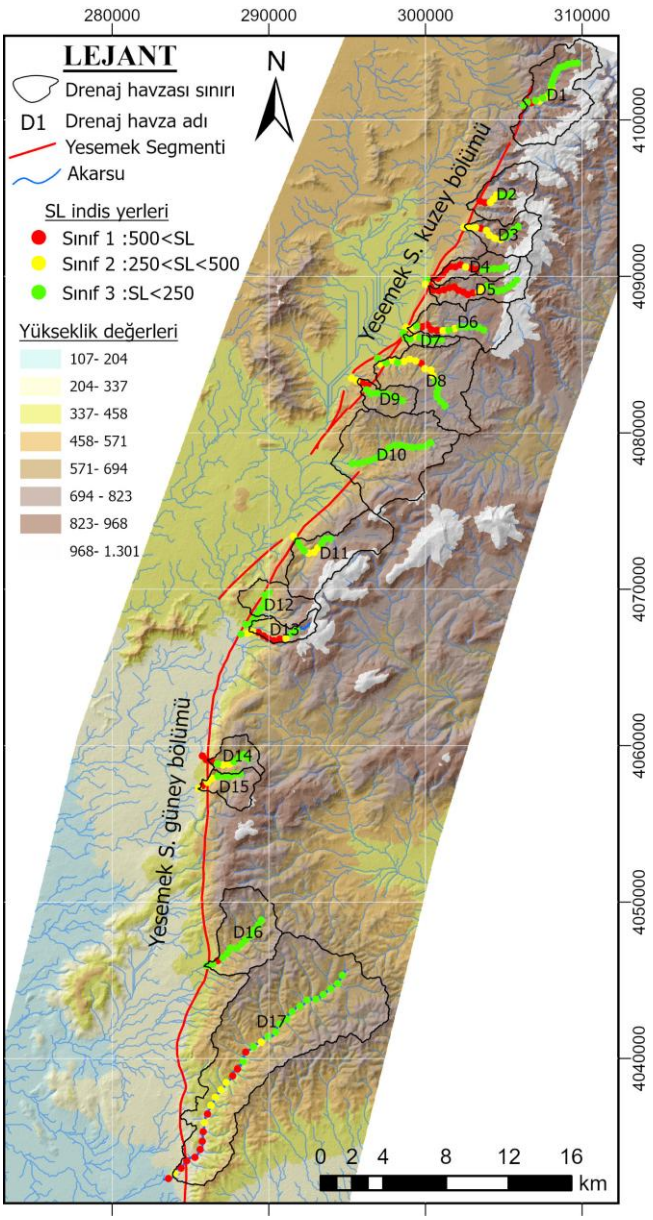
Tablo 2. Yesemek segmenti ile ilişkili drenaj havzalarında hesaplanan AF ve HI değerleri.

	Drenaj havzası	AF	lAF-50l	HI
Yesemek Segmenti kuzey bölümü	D1	54,94	4,94	0,50
	D2	54,58	4,58	0,56
	D3	40,83	9,17	0,52
	D4	50,07	0,07	0,46
	D5	42,85	7,15	0,48
	D6	57,11	7,11	0,51
	D7	39,44	10,56	0,54
	D8	56,41	6,41	0,50
	D9	51,54	1,54	0,6

	Drenaj havzası	AF	lAF-50l	HI
Yesemek Segmenti güney bölümü	D10	47,8	2,2	0,36
	D11	59,21	9,21	0,50
	D12	74,21	24,21	0,32
	D13	62,96	12,96	0,44
	D14	53,15	3,15	0,44
	D15	53,48	3,48	0,55
	D16	54,66	4,66	0,44
	D17	51,93	1,93	0,57

3.5. Akarsu uzunluk – gradyan indisi (SL)

Bu çalışma kapsamında Yesemek Segmenti kuzey bölümünde 9, güney bölümünde 8 olmak üzere 17 vadide toplam 238 SL indisi hesaplanmıştır. Ölçülen SL değerleri 9 ile 504 arasında değişmekte olup en yüksek değer Segmentin kuzey bölümündeki D5 drenaj havzasında görülmüştür (Şekil 7). Yesemek Segmenti boyunca ölçülen SL indis profilleri incelendiğinde; D10 ve D12 vadilerinde SL değerlerinin düşük olduğu, değerlerde ani değişimlerin olmadığı ve dolayısıyla bu çalışmada baz alınan tektonik sınıflamada SL ölçümlerinin "sınıf 3" değer aralığında oldukları görülmüştür. D7, D8 ve D11 profilleri SL indis değerlerinin fay segmenti yakın civarında "sınıf 2" tektonik sınıflandırma değer aralığında olduğu gözlenmiştir. Geri kalan 12 vadide SL ölçüm değerlerinin, özellikle fay segmentinin üzerinde veya yakın civarında "sınıf 1" tektonik sınıflandırma değer aralığında, yüksek değerler gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 7). Bu veriler ışığında, inceleme alanında yapılan SL indisi analizleri neticesinde Yesemek Segmenti'nin bölgenin tektoniğinde aktif rol oynadığı söylenebilir.



Şekil 7. İnceleme alanındaki 17 drenaj havzasında ölçülen SL indilerinin SYM üzerindeki lokasyonları ve tektonik sınıfları.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında Yesemek Segmentiyle ilişkili dağönleri, vadiler ve drenaj ağları üzerinde çeşitli morfometrik yöntemlerle yapılan hesaplamalar neticesinde aktif fay-morfoloji ilişkisinin daha iyi anlaşılması amaç edinilmiştir. İnceleme alanındaki dağ önlerinde Yesemek Segmentiyle ilişkili 3 adet dağönü eğriselliği değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan düşük (1,24 ve 1,38) ve orta dereceli (1,62) S_{mf} değerleri, yüksek tektonik aktiviteye sahip dağ önlerinin bir göstergesi olup [28] buradaki havza gelişiminde erozyonal olaylardan ziyade tektonizmanın etkin olduğunu göstermektedir. Çalışma kapsamında daha önce S_{mf} indis hesabı yapılmış dağ önleri ile ilişkili akarsu kanallarında 17 vadiden ortalama V_f değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan V_f değerleri 0,31 ile 1,48 arasında değişmektedir. Yesemek Segmenti ile ilişkili 14 vadiden elde edilen V_f değerleri 1'den küçük olup yüksek (sınıf 1) ve orta seviye (sınıf 2) tektonik aktiviteye işaret etmektedir. Segmentin orta kesimindeki vadilerden düşük tektonik aktiviteye (Sınıf 3) işaret eden 3 adet V_f değeri hesaplanmıştır. Yesemek Segmentiyle ilişkili her bir vadinin ortalama V_f değeri ile aynı kesimin S_{mf} değerleri kıyaslanarak, Yesemek Segmenti kuzey ve güney kesimleri boyunca görülen yükselme ve aktiflik derecesinin, segmentin orta kesimine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

İnceleme alanındaki 17 drenaj havzasında hesaplanan AF değerleri 39,44 ile 74,21 arasında değişmektedir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde 10 drenaj havzasının simetrik, 7 havzanın ise asimetrik olduğu ve asimetrik havzaların genel olarak orta seviye tektonik aktivite ve eğimlenmeye (Sınıf 2) sahip oldukları görülmüştür.

Yesemek Segmenti ile ilişkili 17 derenaj havzasında hipsometrik eğri ve integral değerleri hesaplanmıştır. Hipsometrik integral değerleri kuzey bölümde 0,46 ile 0,60 arasında değişmekte olup bu bölümdeki havzalarda oluşturulan hipsometrik eğrilerin genel olarak dış bükey ve S şekilli olduğu görülmüştür (Şekil 6). Güney bölümde 0,32 ile 0,57 arasında değişen hipsometrik integral değerleri elde edilmiş olup bu bölümdeki hipsometrik eğri şekilleri farklılık göstermektedir. Hipsometrik eğrilere ve hipsometrik integral değerlerine bakılarak, Yesemek Segmenti kuzey bölümü ile ilişkili havzaların baskın olarak genç olduğu ve bunların gelişiminde erozyonal süreçlere nazaran tektonizmanın daha fazla etkili olduğu, segmentin orta kesiminde nispeten daha olgun veya olgunlaşmaya başlamış havzaların bulunduğu söylenebilir (Tablo 2 ve Şekil 5).

Yesemek Segmenti'nin kestiği vadilerde 17 adet akarsu uzunluk – gradyan indisi profili oluşturulmuştur. Oluşturulan SL indis profilleri incelendiğinde, 12 vadinin SL ölçüm değerlerinin, özellikle fay segmentinin üzerinde veya yakın civarında "sınıf 1" tektonik sınıflandırma değer aralığında, yüksek değerler gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 7). Bu veriler ışığında, inceleme alanında yapılan SL indisi analizleri neticesinde Yesemek Segmenti'nin bölgenin jeomorfolojik gelişiminde aktif rol oynadığı anlaşılmıştır.

İnceleme alanında yapılan bu ilk morfometrik analizlere dayalı morfotektonik çalışma neticesinde, Karasu havzasını batıdan sınırlayan Amanos Segmenti gibi havzanın doğusundaki Yesemek Segmenti'nin de morfolojiyi denetlediği, erozyonal süreçlerden ziyade tektonik kontrolün etkin olduğu belirlenmiştir.

Kaynakça

[1] Westaway, R. (2004). Kinematic Consistency between the Dead Sea Fault Zone and The Neogene and Quaternary Left-Lateral Faulting in SE Turkey. *Tectonophysics*, 391, 203–237. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.014

[2] Yurtmen, S., Guillou, H., Westaway, R., Rowbotham, G., & Tatar, O. (2002). Rate of strike-slip motion on the Amanos Fault (Karasu Valley, southern Turkey) constrained by K–Ar dating and geochemical analysis of Quaternary basalts. *Tectonophysics*, *344*(3-4), 207-246. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00265-7

[3] Tatar, O., Piper, J.D.A., Gürsoy, H., Heimann, A., Koçbulut, F., (2004). Neotectonic de-formation in the transition zone between the Dead Sea Transform and the East Anatolian Fault Zone, Southern Turkey: a palaeomagnetic study of the Karasu Rift Volcanism. Tectonophysics 385, 17–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.005

[4] Seyrek, A., Demir, T., Pringle, M. S., Yurtmen, S., Westaway, R. W. C., Beck, A., & Rowbotham, G. (2007). Kinematics of the Amanos Fault, southern Turkey, from Ar/Ar dating of offset Pleistocene basalt flows: transpression between the African and Arabian plates. Geological Society, London, Special Publications, 290(1), 255-284. DOI: https://doi.org/10.1144/SP290.9

[5] Kavak, K. Ş., Tatar, O., Piper, J., Kocbulut, F., & Levent Mesci, B. (2009). Determination of neotectonic features of the Karasu Basin (SE Turkey) and their relationship with Quaternary volcanic activity using Landsat ETM+ imagery. International Journal of Remote Sensing, 30(17), 4507-4524. DOI: https://doi.org/10.1080/01431160802578004

[6] Duman, T.Y. ve Emre, O., (2013). The East Anatolian fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *GeolSoc* 372:495–529. DOI: https://doi.org/10.1144/SP372.14

[7] Carena, S., Friedrich, A. M., Verdecchia, A., Kahle, B., Rieger, S., & Kübler, S. (2023). Identification of source faults of large earthquakes in the Turkey-Syria border region between 1000 CE and the present, and their relevance for the 2023 Mw 7.8 Pazarcık earthquake. *Tectonics*, *42*(12), e2023TC007890. DOI: https://doi.org/10.1029/2023TC007890

[8] Wang, W., Liu, Y., Fan, X., Ma, C., & Shan, X. (2023). Coseismic deformation, fault slip distribution, and coulomb stress perturbation of the 2023 Türkiye-Syria Earthquake doublet based on SAR offset tracking. *Remote Sensing*, *15*(23), 5443. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15235443

[9] Liang, P., Xu, Y., Zhou, X., Li, Y., Tian, Q., Zhang, H., ... & Li, J. (2025). Coseismic surface ruptures of MW7. 8 and MW7. 5 earthquakes occurred on February 6, 2023, and seismic hazard assessment of the East Anatolian Fault Zone, Southeastern Türkiye. *Science China Earth Sciences*, *68*(2), 611-625. DOI: https://doi.org/10.1007/s11430-024-1457-7

[10] Garfunkel, Z., (1981). Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. Tectonophysics 80, 81–108. DOI: https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90143-8

[11] Quennell, A.M., (1984). The Western Arabia rift system. In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds.), Geological Evolution of the Eastern Mediterranean. Geol. Soc. By Blackwell Sci. Publ., Oxford, London, p. 824.

[12] Westaway, R., (2003). Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean updated. Turkish Journal of Earth Sciences 12, 5–46.

[13] Gomez, F., Meghraoui, M., Darkal, A.N., Hijazi, F., Mouty, M. Suleiman, Y., Sbeinati, R. Darawcheh, R., …R. Barazangi, M. (2003). Holocene faulting and earthquake recurrence along the Serghaya branch of the Dead Sea fault system in Syria and Lebanon. Geophysical Journal International 153, 1–17.

[14] McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Sari, D.B., Tealeb, A., 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motion. Geophysical Journal International 155, 126–138.

[15] Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... & Nadariya, M. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5). DOI: https://doi.org/10.1029/2005JB004051

[16] Muehlberger, R.W., Gordon, M.B. (1987). Observations on the complexity of the East Anatolian Fault, Turkey, J.Structural Geol., 9, 899-903. DOI: https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90091-5

[17] Perinçek, D. ve Çemen, I., (1990). The structural relationship between the East Anatolian and Dead Sea fault zones in southeastern Turkey. Tectonophysics172, 331–340. DOI: https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90039-B

[18] Perinçek, D. ve Eren, A. G. (1990). Doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fayı ve Ölü Deniz Fay Zonları etki alanında gelişen Amik havzasının kökeni. In Turkey 8th Petroleum Congress Proceedings (pp. 180-192).

[19] Şaroğlu, F., Emre, O., Kuşçu, I. (1992). The East Anatolian Fault Zone of Turkey. Annalae Tectonicae 6, 99–125.

[20] Rojay, B., Heimann, A., Toprak, V., (2001). Neotectonic and volcanic characteristics of the Karasu fault zone (Anatolia, Turkey): the transition zone between the Dead Sea transform and the East Anatolian fault zone. Geodin. Acta14, 197–212. DOI: https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432444

[21] Adiyaman, Ö. ve Chorowicz, J. (2002). Late Cenozoic tectonics and volcanism in the northwestern corner of the Arabian plate: a consequence of the strike-slip Dead Sea fault zone and the lateral escape of Anatolia. Journal of Volcanology and geothermal Research, 117(3-4), 327-345. DOI: https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00296-2

[22] Karabacak, V., Altunel, E., Meghraoui, M. ve Akyüz, H.S., (2010). Field evidences from northern Dead Sea Fault Zone (South Turkey): new findings for the initiation age and slip rate. Tectonophysics 480, 172–182. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.001

[23] Seyrek, A., Demir, T., Westaway, R., Guillou, H., Scaillet, S., White, T. S., & Bridgland, D. R. (2014). The kinematics of central-southern Turkey and northwest Syria revisited. Tectonophysics, 618, 35-66. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.008

[24] Karabacak, V., (2007). Ölü Deniz Fay Zonu Kuzey Kesiminin Kuvaterner Aktivitesi. Doktora tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Natural and Applied Sciences Institute, p. 325.

[25] Balkaya, M., Özden, S. ve Akyüz, H. S. (2021). Morphometric and Morphotectonic characteristics of Sürgü and Çardak Faults (East Anatolian Fault Zone). Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 7(3), 375-392. DOİ: https://doi.org/10.28979/jarnas.939075

[26] Ergin, K., Güçlü, U., Uz, Z. (1967). Türkiye ve civarının deprem kataloğu (MS. 11-1964). İstanbul, İTÜ, Maden Fakültesi, Arz Fiziği Enstitüsü ywayınları.

[27] Ambraseys, N.N. (1989). Temporary Seismic Quiescence: SE Turkey, Geopyhsical Journal International, 96, 311-331 s. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1989.tb04453.x

[28] Keller, E.A., Pinter, N., (2002). Active tectonics: Earthquakes, Uplift, andLandscape (2nd Edn.): New Jersey, PrenticeHall, 432 p.

[29] Ege, I. (2011). Determination of fault morphology of Antakya-Kahramanmaraş depression area by using methods of Remote Sensing (RS) and Geographical Information Systems (GIS). *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *19*, 702-708. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.188

[30] ASF, (2020). Alaska Satellite Facility Data Search User Manual, Retrieved from: https://search.asf.alaska.edu/#/

[31] Bull, W.B. (2008). Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology. *John Wiley and Sons*, Oxford, 315 s. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470692318

[32] Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Bardají, T. (2003). Faulth generated mountain fronts in southeast Spain: Geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology* 50, 203-225. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00215-5

[33] El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004

[34] Coşkuner, B., Eren, Y., Demircioğlu, R., Aksoy, R. (2019). Fethiye Burdur Fay Zonu'nun Kuzeydoğu Kesiminin (Burdur-Güneybatı Anadolu) Göreceli Tektonik Aktivitesinin Jeomorfik İndislerle İncelenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 62(3), 221-246. DOI: https://doi.org/10.25288/tjb.546135

[35] Selim, H., Tüysüz, O., Karakaş, A. ve Taş, K., (2013). Morphotectonic evidence from the southern branch of the North Anatolian Fault (NAF) and basins of the south Marmara sub-region, NW Turkey. Quaternary international, 292, 176-192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.022

[36] Köle, M.M. (2016). Devrez Çayı vadisinin tektonik özelliklerinin morfometrik indisler ile araştırılması, *İstanbul Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi Coğrafya Dergisi*, 33, 21-36. Retrieved from: http://www.journals.istanbul.edu.tr/iucografya.

[37] Topal, S. (2019). Karacasu Fayı'nın (GB Türkiye) göreceli tektonik aktivitesinin jeomorfik indislerle incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *9*(1), 37-48. DOI: https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.409561

[38] Strahler, A.N., (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America, 63: 1117-1142.

[39] Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., & Azor, A. (2009). CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, *35*(6), 1214-1223. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.06.006

[40] Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream gradient index. *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1 (4), 421-429.

[41] Saber, R., Isik, V., Caglayan, A. (2018). Assessment of relative tectonics activity along Aras Valley (NW Iran) using morphometric indices. *Paper presented at: The 36th national and the 3rd international geosciences congress*, Tehran, Iran.

[42] Troiani, F., Galve, J. P., Piacentini, D., Della Seta, M., & Guerrero, J. (2014). Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: a case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology,* 214, 183-197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.004

[43] Balkaya, M., Özden, S. ve Akyüz, H. S. (2021). Morphometric and Morphotectonic characteristics of Sürgü and Çardak Faults (East Anatolian Fault Zone). Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 7(3), 375-392. DOİ: https://doi.org/10.28979/jarnas.939075

[44] Tarı, U. ve Tüysüz, O., (2011). İzmit Körfezi ve çevresinin morfotektoniği. İTÜ Dergisi/d, 7(1).

[45] Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., (2012). Tectonic geomorphology of the Spildağı high ranges, western Anatolia. *Geomorphology*, 173, 128-140. DOİ: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.003

[46] Selçuk, A. S., Düzgün, M. (2017). Başkale Fay Zonu'nun Tektonik Jeomorfolojisi. *Maden Tetkik Ve Arama Dergisi*, (155), 33-47. DOİ: http://dx.doi.org/10.19076/mta.53825

[47] Rockwell, T.K., Keller, E.A., & Johnson, D.L. (1984). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Andntura, California. *Tectonic Geomorphology*, 183-207.

[48] Sançar, T. (2018). Yüksekova Havzası'nın (Güneydoğu Türkiye) Yükselim Hızı Tarihçesi'nin Araştırılması. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 61(2), 207-240. DOI: https://doi.org/10.25288/tjb.439182